

UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

Doktorska disertacija

**RAZVOJ NOVEGA POSTOPKA ZA OJAČITEV  
STARIH LESENIH STROPOV**

OKTOBER 2020

ŽIGA UNUK



UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

Doktorska disertacija

**RAZVOJ NOVEGA POSTOPKA ZA OJAČITEV  
STARIH LESENIH STROPOV**

OKTOBER 2020

Avtor: Žiga UNUK

Mentor: red. prof. dr. Miroslav PREMROV

Somentorica: izr. prof. dr. Vesna ŽEGARAC LESKOVAR

UDK: 624.011.1.078.82:692.54(043.3)





## Zahvala

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Miroslavu Premrovu in somentorici izr. prof. dr. Vesni Žegarac Leskovar za pomoč in vodenje pri raziskovanju in izdelavi doktorske disertacije.

Hvala red. prof. dr. Andreju Štruklju za opravljanje meritev pri strižnem preizkusu točkovnega stika steklo-les in štiritočkovnih upogibnih preizkusih ojačanih lesenih stropnikov.

Hvala izr. prof. dr. Samu Lubeju in izr. prof. dr. Andreju Ivaniču za pomoč in izvedbo strižnih preizkusov lepljenih stikov steklo-les. Zahvaljujem se tudi g. Alešu Hanzelu za vsestransko pomoč pri strižnih preizkusih točkovnega stika steklo-les, pri izdelavi preizkušancev za štiritočkovne upogibne preizkuse in pri izvedbi štiritočkovnih upogibnih preizkusov.

Hvala doc. dr. Primožu Jelušiču, asist. Denisu Imamoviću in Mateju Mohariću za pomoč pri transportu CLT plošč za štiritočkovne upogibne preizkuse ojačanih lesenih stropnikov.

Zahvala velja tudi izr. prof. dr. Sergeju Medvedu iz Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani za izvedbo nateznih preizkusov majhnih lesenih vzorcev.

Zahvaljujem se podjetju STARMAN d.o.o. (Žeje pri Komendi) za donacijo lesnih vijakov in podjetju Mapei d.o.o. Slovenija iz Grosuplja za donacijo epoksidnega lepila Mapei Adesilex PG1.

Posebej hvala tudi g. Branku Klanjšku (Kovinarstvo Klanjšek, Branko Klanjšek s.p.) za dobavo aluminijastih vstavkov za točkovne stike steklo-les ter za praktične nasvete glede obdelave aluminija in izdelavo pripomočkov za dimenzijsko korektno izdelavo preizkušancev. Hvala tudi prijatelju Tomažu Repniku za varjenje orodja za izvedbo strižnih preizkusov točkovnega stika steklo-les in izdelavo podaljška za induktivni merilec sile. Posebna zahvala gre g. Marku Reiterju (RMTD, svetovanje in montaža stekla, Marko Reiter s.p.), ki je bil edini pripravljen in sposoben dobaviti steklene trakove za ojačitve lesenih stropnikov.

Zahvaljujem se Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za financiranje programa usposabljanja mladega raziskovalca.

Iskrena hvala staršem, ki so mi vsa študijska leta, tudi po vrnitvi iz tujine, stali ob strani. Hvala, oče, za pomoč pri »drobnih« opravilih, pomembnih za izdelavo in dobavo preizkušancev za eksperimentalni del doktorske disertacije.

Nika, predvsem pa hvala tebi za podporo, razumevanje in pomiritev v stresnih situacijah.



## RAZVOJ NOVEGA POSTOPKA ZA OJAČITEV STARIH LESENIH STROPOV

**Ključne besede:** leseni stropi, CLT plošče, konstrukcijsko steklo, lesni vijaki, adhezivi, ojačitev konstrukcij

**UDK:** 624.011.1.078.82:692.54(043.3)

### Povzetek

Leseni stropi se pogosto ojačujejo na način, da se na spodnjo stran stropnikov, ki lesene stropne sestavljajo, prilepijo ali drugače pritrdijo kovinski ali polimerni trakovi. S tem postopkom se zakrije večji del površine, ki določa videz lesenega stropa, in posledično je prvobitni videz lesenega stropa izgubljen. Z razvojem področja steklenih in delno steklenih konstrukcij (kompozitov) ter z napredkom tehnologije proizvodnje stekla in s tem tudi kakovosti tega transparentnega materiala, pa se ponuja neobičajna možnost uporabe stekla tudi za ojačitve, npr. lesenih konstrukcij. Če bi za ojačitev lesenih stropov uporabili steklene elemente, bi v veliki meri ohranili prvobitni videz. Ta ideja odpira številna vprašanja, ki so predmet te doktorske disertacije. V disertaciji je v kontekstu leseno-steklenih konstrukcij obravnavan razvoj postopka za ojačitev starih lesenih stropov s steklenimi elementi v obliki trakov, v natezni coni upogibnega prereza, ki kot prvi korak že zajema uporabo plošč iz križno lepljenega lesa (CLT) v tlačni coni upogibnega prereza. Za zvezo CLT plošče in stropnika so bili upoštevani lesni vijaki, za stik steklenega traku in stropnika pa sta bila upoštevana lepljeni in točkovni (mehanski) stik, ki je bil razvit v sklopu priprave doktorske disertacije.

Doktorska disertacija obsega strižne preizkuse lepljenih stikov steklo-les pri različnih vlažnostih lesa in različnih temperaturah. Potrjeno je bilo, da ima lepljeni stik steklo-les potencial za uporabo pri starih lesenih konstrukcijah, ki so lahko podvržene različnim okoljskim pogojem. S strižnimi preizkusi novega točkovnega stika steklo-les je bilo dokazano, da se lahko pod določenimi pogoji stekleni elementi povežejo z lesenimi elementi tudi lesnimi vijaki. Točkovno pritrdjevanje steklenih elementov z lesnimi vijaki je neinvaziven, reverzibilen in za videz konstrukcije neškodljiv način. Razviti so bili tudi analitični izrazi za oceno nosilnosti in togosti novega točkovnega stika, vzporedno pa je bila opravljena še numerična analiza togosti točkovnega stika. Z numeričnim izračunom so bili ocenjeni faktorji napetosti v steklu v okolici točkovnega stika pri različnih obremenitvah, s pomočjo katerih se lahko tudi z analitičnim izračunom ocenijo napetosti v točkovno pritrjenem steklenem traku. Najpomembnejši del doktorske disertacije predstavljajo štiritočkovni upogibni preizkusi z novim postopkom ojačanih lesenih stropnikov. Uporabljeni so bili stari leseni stropniki iz dvorca na Zgornji Polskavi, ki so bili iz objekta odstranjeni zaradi številnih poškodb. Mehanske lastnosti lesenih stropnikov so bile določene na podlagi nateznih preizkusov lesenih vzorcev, izdelanih iz lesa uporabljenih starih lesenih stropnikov. Vzporedno so bili opravljeni analitični in numerični izračuni nosilnosti in togosti ojačanih stropnikov z obtežbo, enako obremenitvi pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu. Predstavljena je tudi parametrična analiza nosilnosti z novim postopkom ojačanih lesenih stropnikov, s pomočjo katerih so bili identificirani najpomembnejši parametri, ki vplivajo na nosilnost ojačanih lesenih stropnikov.

Dokazan je bil prispevek steklenih trakov k upogibni togosti lesenih stropnikov. Pod določenimi pogoji lahko stekleni trak poveča tudi nosilnost. Za bolj učinkovitega se je izkazal



prilepljen stekleni trak, a tudi s točkovnim stikom pritrjen oz. privit stekleni trak lahko prispeva k nosilnosti lesenega stropnika.



## **DEVELOPMENT OF A NEW PROCEDURE FOR STRENGTHENING OF OLD TIMBER FLOORS**

**Key words:** timber floors, CLT panels, structural glass, self-tapping screws, adhesives, structural strengthening

**UDK:** 624.011.1.078.82:692.54(043.3)

### **Abstract**

Timber floors are often strengthened in such a way that metal or polymer strips are attached to the underside of its timber joists. This process blocks the surface view that determines the appearance of the timber floor and consequently the original architecture of the timber floor is compromised. With the development in the field of glass and partial glass structures (composite materials) and with the development of the quality of the production of glass, a transparent material, there is also the unconventional possibility of using glass for reinforcements, e.g. in timber structures. In the case of glass elements used to strengthen timber floors, the original appearance would largely be retained. The idea of using glass elements to strengthen timber floors raises many questions which are the subject of this dissertation. In the context of timber-glass composites, the dissertation deals with the development of a method for the strengthening of old timber floors with glass elements in the form of strips in the tensile zone of the cross section. As a first step of the reinforcement method, cross laminated timber panels (CLT) are already provided in the compression zone of the cross section. Self-tapping screws were considered for the connection of the CLT panel with the timber floor joist, while for the contact of the glass strip with the timber floor joist, adhesive bonding and point (mechanical) fastening were considered. The point (mechanical) fastening for the glass-timber connection was developed within the scope of this dissertation.

The dissertation includes shear tests of timber-glass adhesive joints at different timber moisture contents and different temperatures. It was confirmed that the bonded timber-glass contact has the potential to be used for old timber structures which may be exposed to different environmental conditions. The shear tests of the new timber-glass point connection have shown that under certain conditions glass elements can also be connected to timber elements using self-tapping screws. The timber-glass point connection with self-tapping screws represents a non-invasive, reversible and optically inconspicuous connection of the two materials. Analytical expressions were also developed to evaluate the load-bearing capacity and stiffness of the new point connection, and a numerical analysis of the stiffness of the point connection was also carried out. The numerical analysis was also used to estimate the stress factors in the glass element around the point connection under various loads, which provides the possibility to estimate the glass stresses around the point connection by analytical calculation. The most important part of the dissertation are the four-point bending tests with the new procedure for strengthening old timber floors. Old timber floor joists from the Manor Zgornja Polskava were used, which were removed from the building due to severe damage. The mechanical properties of the timber floor joists were determined on the basis of tensile





tests on timber samples taken from the old timber floor joists. In parallel, analytical and numerical calculations of the load-bearing capacity and stiffness of the strengthened timber floor joists were carried out, whereby the loading conditions were equal to the load in the four-point bending test. In addition, a parametric analysis of the new procedure for strengthening of old timber floors is presented, which was used to determine the most important parameters influencing the load-bearing capacity of the strengthened timber floor joists.

Finally, the contribution of glass strips to the bending stiffness of the timber floor joists was demonstrated. Under certain conditions, glass strips can also increase the load-bearing capacity. The adhesively bonded glass strip was shown to be more effective, but the mechanically connected glass strip can also contribute to the load-bearing capacity of a timber floor joist under certain conditions.



## Kazalo

1	UVOD .....	1
1.1	Opredelitev problema .....	1
1.2	Struktura disertacije .....	5
1.3	Hipoteza .....	7
1.4	Cilji doktorske disertacije .....	8
2	LESENI STROPI IN OJAČITVE .....	9
2.1	Razvoj stropnih konstrukcij .....	9
2.2	Leseni stropi v Sloveniji .....	9
2.3	Nasutje v lesenih stropih .....	11
2.4	Ojačitev lesenih stropov .....	13
3	ZASNOVA OJAČITVE LESENIH STROPNIKOV S KRIŽNO LEPLJENO LESENO PLOŠČO IN STEKLOM .....	14
3.1	Stekleni trak .....	15
4	PREISKAVE VPLIVA TEMPERATURE IN VLAGE NA NOSILNOST LEPLJENIH STIKOV LES-STEKLO .....	17
4.1	Orodje za strižni preizkus in leseno-stekleni preizkušanci .....	18
4.1.1	Leseni vzorci .....	19
4.1.2	Stekleni vzorci .....	20
4.1.3	Epoksidni adheziv .....	21
4.2	Okoljski pogoji .....	22
4.2.1	Temperaturni pogoji .....	22
4.2.2	Vlažnost lesa in pogoji med strjevanjem adheziva .....	23
4.3	Procedura strižnih preizkusov in način merjenja pomikov .....	24
4.4	Rezultati .....	24
4.4.1	Strižna trdnost .....	24
4.4.2	Krivulje sile v odvisnosti od pomika .....	27
4.4.3	Oblike loma .....	29
4.4.4	Vpliv širine branik .....	31
4.4.5	Simulacija preizkusa z metodo končnih elementov .....	32
4.5	Končni komentar strižnih preizkusov lepljenih stikov steklo-les .....	36
5	TOČKOVNI STIK STEKLO-LES .....	38
5.1	Preiskave točkovnega stika les-steklo .....	39
5.1.1	Leseni kvadri .....	40
5.1.2	Stekleni trakovi .....	40
5.1.3	Epoksidni adheziv .....	41
5.1.4	Priprava preizkušancev .....	41
5.1.5	Priprava za strižne preizkuse točkovnega stika in procedura preizkusov .....	42
5.1.6	Nosilnost, krivulje sile v odvisnosti od pomika in modul pomika .....	43
5.1.7	Oblike porušitev .....	45
5.1.8	Analitični izračun modula pomikov in nosilnosti novega točkovnega stika .....	46



5.1.9	Numerični izračun modula pomika in nosilnosti novega točkovnega stika ter ocena napetosti v steklenem traku .....	49
5.1.10	Primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih rezultatov za nosilnost in modul pomika novega točkovnega stika .....	53
5.1.11	Končni komentar preiskav točkovnega stika steklo-les.....	54
5.2	Ocena faktorjev koncentracij napetosti v steklenem traku .....	54
6	<b>PREISKAVE KOMPOZITNIH NOSILCEV CLT-LES-STEKLO.....</b>	<b>62</b>
6.1	Zasnova preizkušanca stropnega elementa .....	62
6.2	Natezni preizkusi majhnih lesenih vzorcev .....	66
6.3	Obseg rezultatov upogibnih preizkusov .....	72
6.4	Skupina 1 – Konfiguracija C .....	73
6.4.1	Stropnik 4 .....	73
6.5	Skupina 2 – Konfiguracija B .....	75
6.5.1	Stropnik 6 .....	75
6.6	Skupina 3 – Konfiguracija A1 .....	77
6.6.1	Stropnik 1 .....	77
6.6.2	Stropnik 7 .....	79
6.7	Skupina 4 – Konfiguracija A2 .....	81
6.7.1	Stropnik 2 .....	81
6.7.2	Stropnik 3 .....	83
6.7.3	Stropnik 5 .....	85
6.7.4	Stropnik 8 .....	96
6.8	Primerjava rezultatov upogibnih preizkusov .....	98
7	<b>ANALITIČNO MODELIRANJE OBNAŠANJA OJAČANIH STROPNIH ELEMENTOV.....</b>	<b>103</b>
7.1	Analitični model .....	103
7.1.1	Efektivna upogibna togost CLT plošče .....	103
7.1.2	Efektivna upogibna togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo.....	103
7.1.3	Izračun normalnih napetosti .....	105
7.1.4	Izračun strižnih napetosti v CLT plošči in lesenem stropniku .....	105
7.1.5	Izračun sil v veznih sredstvih .....	106
7.1.6	Izračun nosilnosti in modula pomikov lesenih vijakov .....	106
7.1.7	Izračun pomika in zdrsov CLT plošče ter steklenega traku .....	108
7.1.8	Upoštevanje različnih mejnih stanj.....	109
7.2	Analitični izračuni preizkušenih konfiguracij lesenih stropnikov .....	110
7.2.1	Analitični izračuni konfiguracij A1, A2 in B z lesenimi stropniki s trdnostnimi razredi C14–C24.....	115
7.3	Parametrična analiza z analitičnimi izračuni nosilnosti in togosti sovprežnih nosilcev CLT-stropnik-steklo .....	116
7.3.1	Parameter 1: Trdnostni razred stropnikov .....	118
7.3.2	Parameter 2: Tip oz. debelina CLT plošče .....	119
7.3.3	Parameter 3: Razmik med vijaki CLT plošče.....	120
7.3.4	Parameter 4: Tip vijakov CLT plošče.....	120



7.3.5	Parameter 5: Strižni modul adheziva .....	120
7.3.6	Parameter 6: Debelina steklenega traku .....	120
7.3.7	Parameter 7: Širina steklenega traku .....	120
7.3.8	Parameter 8: Razmik med točkovnimi stiki steklenega traku .....	121
7.3.9	Parameter 9: Odmik točkovnih stikov steklenega traku od sredine razpona....	121
7.3.10	Rezultati parametrične analize.....	121
8	NUMERIČNO MODELIRANJE OBNAŠANJA OJAČANIH STROPNIH ELEMENTOV .....	130
9	PRIMERJAVA REZULTATOV EKSPERIMENTOV TER ANALITIČNIH IN NUMERIČNIH IZRAČUNOV .....	135
9.1	Skupina 1 – Konfiguracija C .....	135
9.1.1	Stropnik 4 .....	135
9.2	Skupina 2 – Konfiguracija B .....	136
9.2.1	Stropnik 6 .....	136
9.3	Skupina 3 – Konfiguracija A1 .....	137
9.3.1	Stropnik 1 .....	137
9.3.2	Stropnik 7 .....	138
9.4	Skupina 4 – Konfiguracija A2 .....	139
9.4.1	Stropnik 2 .....	139
9.4.2	Stropnik 3 .....	140
9.4.3	Stropnik 5 .....	141
9.4.4	Stropnik 8 .....	150
9.5	Skupna primerjava .....	151
9.5.1	Poenostavljeni način za upoštevanje strižnih deformacij .....	157
9.5.2	Primerjava rezultatov alternativnega analitičnega izračuna z upoštevanjem trdnostnih razredov glede na gostoto stropnikov.....	159
9.6	Primerjava z drugimi raziskavami .....	163
10	ZAKLJUČKI .....	166
10.1	Diskusija .....	166
10.2	Smernice za nadaljnje raziskovanje.....	168
11	LITERATURA .....	171
12	PRILOGE .....	181
12.1	Rezultati analitičnega izračuna preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi iz standarda [124] .....	181
12.2	Rezultati parametrične študije .....	185
12.2.1	Konfiguracija A2, parameter: indeks CLT plošče .....	185
12.2.2	Konfiguracija B, parameter: indeks CLT plošče .....	187
12.2.3	Konfiguracija A2, parameter: razmik med vijaki CLT plošče .....	189
12.2.4	Konfiguracija B, parameter: razmik med vijaki CLT plošče .....	192
12.2.5	Konfiguracija A2, parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les.....	193
12.2.6	Konfiguracija A2, parameter: indeks vijaka CLT plošče .....	196
12.2.7	Konfiguracija B, parameter: indeks vijaka CLT plošče .....	199
12.2.8	Konfiguracija A2, parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika .....	201





12.2.9 Konfiguracija B, parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika.....	203
12.2.10 Konfiguracija A2, parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona .....	205
12.2.11 Konfiguracija A1, parameter: indeks CLT plošče.....	208
12.2.12 Konfiguracija A1, parameter: razmik med vijaki CLT plošče .....	210
12.2.13 Konfiguracija A1, parameter: strižni modul adheziva.....	212
12.2.14 Konfiguracija A1, parameter: indeks vijaka CLT plošče .....	214
12.2.15 Konfiguracija A1, parameter: debelina steklenega traku .....	216
12.2.16 Konfiguracija A1, parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika .....	218
12.2.17 Konfiguracija A1, parameter: širina steklenega traku .....	220
12.2.18 Konfiguracija C, parameter: debelina steklenega traku.....	222
12.3 Primer uporabe naprave za akustično tomografijo lesa.....	224
Seznam tabel.....	227
Seznam slik.....	235
Življenjepis .....	243



# 1 UVOD

## 1.1 Opredelitev problema

Obstoječa stavbna dediščina zajema stavbni fond, zgrajen v različnih obdobjih, za katera so bile značilne specifične gradbene tehnike in gradbeni predpisi. Zaradi starosti, dotrajanosti, pomanjkljivega vzdrževanja in tudi drugih razlogov se pojavlja potreba po prenovi objektov, obseg prenove pa je odvisen od mnogih dejavnikov, vezanih na stanje objekta in namen prenove. Poznamo različne stopnje in obsege prenov, od parcialnih prenov posameznih komponent stavbe do kompleksnih prenov, v sklopu katerih se obravnavajo izboljšave gradbeno-fizikalnih lastnosti, nosilnosti, požarne varnosti, zvočne izolativnosti, energijske učinkovitosti, funkcionalnosti, estetskih in drugih lastnosti stavbe. Prenova objektov je kompleksen proces, pri katerem dobre in celovite rešitve narekujejo stalno in simultano integracijo arhitekturnih, energijskih in konstrukcijskih idej.

V kontekstu prenove so zelo pomembne tudi rekonstrukcije starih objektov z lesenimi stropi, ki predstavljajo poseben načrtovalski izziv z vidika uporabnosti, estetike, tehnologije, gradbeno-fizikalnih lastnosti in nosilnosti. V sklopu prenove starejših objektov namreč mnogokrat zaradi funkcionalnih zahtev izvedemo tudi spremembo namembnosti objekta ali posameznih prostorov, pri tem pa lahko pride do povečanja vertikalnih ali horizontalnih obtežb na celoten objekt ali na njegove posamezne nosilne elemente. Sočasno je pomembno, da se v največji možni meri ohrani tudi prvobitnost lesenega nosilnega elementa, najsi bo zaradi zahtev z vidika varstva kulturne dediščine ali preprosto zaradi želje arhitekta, lastnika, investitorja ipd.

Za ojačitev lesenih stropov obstajajo ukrepi, pri katerih se na obstoječe stropnike privijejo ali pribijejo dodatni leseni elementi, ki stropnikom povečajo statično višino, vendar takšni ukrepi ne prispevajo k delovanju stropa kot toge diafragme, kar je pomembno za globalno obnašanje objekta, katerega sestavni del je leseni strop, v primeru delovanja horizontalnih obtežb (veter in potres). Prav tako imajo ploskovni elementi pozitivnejši učinek tudi glede na vibracije stropov, saj povečajo upogibno togost stropne konstrukcije tudi v na stropnike prečni smeri. Plošče iz armiranega betona in plošče iz križno lepljenega lesa (CLT plošče), ki so z obstoječimi stropniki povezane tako, da delujejo sovprežno, zagotavljajo večjo nosilnost, poleg tega pa pozitivno vplivajo tudi na globalno obnašanje objektov in vibracije stropov.

Za uporabo sovprežne armirano-betonske ali CLT plošče pa velja, da se s tem večinoma poveča le nosilnost lesenega stropnega elementa v tlačni coni upogibnega prereza. Za povezavo armirano-betonske plošče z lesenim stropnikom obstaja več različnih veznih sredstev, npr. armaturne palice, žebliji, sponke, lesni vijaki. Za nove konstrukcije se uporabljajo tudi stiki, za katere se v lesenih stropnikih napravijo zaseki, strižne sile pa se prenašajo preko stikov med armirano-betonsko ploščo in lesenim stropnikom. Znani so tudi primeri, ko se armirano-betonska plošča prilepi na lesene stropnike oz. leseno ploščo. Za CLT plošče velja, da se običajno privijejo z lesnimi vijaki.

Armirano-betonske plošče se običajno izdelajo oz. ulijejo kar na lesenem stropu. Gre torej za ukrep, pri katerem se pojavlja večja količina vlage in pri katerem neposredni stik tekočega betona z lesnim stropom težko popolnoma preprečimo (npr. s hidroizolacijo), saj je armirano-betonska plošča s stropniki povezana z različnimi veznimi sredstvi, ki predirajo hidroizolacijo. V študijah [1, 2] je tako navedeno, da v Italiji tovrstni ukrep pogosto zavrnejo organi za varstvo kulturne dediščine, saj ni zadostno reverzibilen. V pogledu reverzibilnosti predstavlja rešitev uporaba montažnih armirano-betonskih plošč, pri čemer je v armirano-betonsko ploščo predhodno treba vgraditi vezna sredstva, in to na način, da je z njimi mogoče priviti oz. kako drugače pritrditi armirano-betonsko ploščo na lesene stropnike. Z vidika reverzibilnosti je uporaba plošč iz križno lepljenega lesa primernejša, saj jih z lesnimi vijaki lahko tudi brez predhodnega vrtanja lukenj privijemo v leseni stropnik. Dodatno prednost predstavlja tudi manjša masa križno lepljenih lesenih plošč (CLT) v primerjavi z armirano-betonskimi, pri starejših objektih je lahko namreč problematična tudi nosilnost zidov in temeljev. Prednost sovprežnih leseno-betonskih stropov je boljša zvočna izolativnost [3] in boljše vibracijsko obnašanje [4]. Za plošče, najsi bo armirano-betonske ali CLT, je v primerih, ko z njimi ojačujemo obstoječe lesene stropne, zaželeno, da imajo čim manjšo višino, saj želimo v sklopu prenove objekta ohraniti vsaj približno enake svetle višine etaž (zaradi funkcionalnosti prostorov). V [5] je predstavljena uporaba CLT plošč in lesnih vijakov za ojačitev tlačne cone lesenih stropnikov, predstavljen pa je tudi učinek tvorjenja špranj s pomočjo distančnikov med CLT ploščo in lesenim stropnikom, ki bi se lahko uporabile za vodenje inštalacij. Taka konfiguracija pozitivno vpliva na nosilnost stropa, saj se tako poveča statična višina upogibnega prereza, vendar pa je v nasprotju z vodilom minimalnega spreminjanja višine etaž.

Na UM FGPA [6, 7] je že bila eksperimentalno in računsko analizirana tudi možnost, da se dodatno k na zgornji strani stropnikov dodani armirano-betonski plošči na spodnjo stran obstoječih lesenih stropnikov nalepi CFRP trakove (trakovi iz polimerov, ojačanih s karbonskimi vlakni) in se s tem poveča tudi nosilnost takšnega sovprežnega elementa v natezni coni upogibnega prereza. Metoda je pomanjkljiva v smislu ohranitve prvotnega videza lesenega stropa, saj CFRP trak prekrije celotno spodnjo stran stropnikov. V smislu ohranjanja vidljivosti spodnje strani stropnikov bi bil namesto CFRP trakov veliko boljši transparentni material, z v primerjavi z lesom – lesenim stropnikom (ki ga je treba ojačati) večjo natezno trdnostjo.

Takšnemu opisu (transparentni material in z v primerjavi z lesom večjo natezno trdnostjo) ustreza steklo. Glede trdnosti stekla se sicer pogosto pojavljajo izrazi upogibna trdnost, natezna trdnost ali natezno-upogibna trdnost. Praktično se za vse omenjene trdnosti uporabljajo enake vrednosti. Razlog za več izrazov pa je način, kako se v večini standardov določa natezna trdnost stekla, ta se namreč določa z upogibnimi preizkusi. Steklo se obnaša kot linearno elastičen material, zato velja, da je upogibna napetost, pri kateri se stekleni element pri upogibu zlomi, enaka natezni trdnosti stekla. Ideja o uporabi stekla kot nosilnega elementa za namene arhitekturnega konzerviranja sicer ni nova. V [8] je že bila raziskovana ideja o uporabi stekla za rekonstrukcijo nosilcev, sten in stropov, v prispevkih [9] in [10] je bila diskutirana ideja o uporabi steklenih zidakov za rekonstrukcijo starih zidov, v [11] pa so razpravljali o uporabi leseno-steklenih nosilcev za renovacije zgodovinsko pomembnih stavb.

V gradbeništvu se steklo ne uporablja le za fasade, vedno pogosteje se pojavlja tudi kot material za primarne konstrukcijske elemente. Tako so v [12] obravnavani stekleni nosilci, v [13] pa stekleni stebri. Pogosto se steklo pojavlja tudi kot sestavni del kompozitnih nosilcev: v [14] so obravnavani jekleno-stekleni nosilci, v [15] pa leseno-stekleni nosilci. Nekoliko novejša različica so stekleni nosilci z vsidranimi polimernimi ali jeklenimi palicami, kot je predstavljeno v [16]. Napredek pri uporabi stekla se kaže tudi v naporih za izdajo posebnega evrokoda (evropski standardi za projektiranje gradbenih konstrukcij) za steklene konstrukcije [17] [18]. Novi evrokod za dimenzioniranje steklenih elementov bo predvidoma izšel leta 2024 [19]. Kljub manjkajočemu evrokodu pa obstajajo standardi ali predstandardi za dimenzioniranje steklenih elementov. Tako npr. standard DIN 18008 [20] in predstandard prEN 16612 [21] za karakteristično natezno oz. upogibno trdnost navadnega stekla predvidevata vrednost 45 MPa, za upogibno trdnost delno kaljenega stekla vrednost 75 MPa in za upogibno trdnost kaljenega stekla vrednost 120 MPa. V primerjavi s trdnostnim razredom lesa C24 z upogibno trdnostjo 24 MPa (velja za povprečni trdnostni razred za les iglavcev) je že navadno steklo trdnejši material, poleg tega pa ima steklo (ne glede na stopnjo prednapetja oz. kaljenja) tudi višji modul elastičnosti (70 GPa). Tlačne trdnosti stekla se v strokovni literaturi skoraj ne omenja, saj je zelo velika in je ob tlačni obremenitvi steklenih elementov zaradi njihove vitkosti problematična predvsem njihova stabilnost. Standard DIN 1249-10 za tlačno trdnost stekla predvideva vrednosti med 700 MPa in 900 MPa, kar pomeni, da je praktično skoraj nemogoče doseči tolikšno tlačno napetost v steklu, ne da bi se v nekem steklenem elementu dodatno pojavile natezne napetosti, ki presegajo upogibno trdnost stekla. Tudi podatka za strižno trdnost stekla ni mogoče najti, saj je napetostno stanje čistega striga praktično nemogoče doseči oz. se pred morebitno strižno porušitvijo stekla vedno zgodi porušitev zaradi nateznih napetosti. Nekateri avtorji za strižno trdnost upoštevajo upogibno trdnost stekla – predpostavka, značilna za krhke materiale [22].

Leseni strop, pri katerem bi uporabili steklo kot dodaten element za ojačitev lesenih stropnikov (dodatno k CLT plošči), bi spadal na področje leseno-steklenih kompozitnih elementov (npr. [23–27]), ki so postali pomemben segment moderne gradnje. Predstavitev napredka na tem področju je podana npr. v [28] in [29]. Steklo je transparenten in relativno trden material (v primerjavi z lesom), zelo negativna lastnost pa je njegova krhkost. To lastnost lahko do določene mere omilimo, če steklo kombiniramo z lesom. Dobljeni kompozitni element je namreč lahko duktilnejši kot primerljivi element, ki je samo iz stekla. Primer takšnega elementa so leseno-stekleni nosilci, ki imajo stekleno stojino in lesene pasnice. Tovrstni elementi po prvi razpoki v steklu (predvsem kadar je uporabljeno navadno steklo) še ohranijo določeno nosilnost. V [30] so tako vsi leseno-stekleni nosilci pri upogibnih preizkusih izkazovali duktilno obnašanje. Leseno-steklene kompozitne elemente lahko razdelimo na tri glavne skupine, in sicer na prej omenjene leseno-steklene nosilce ([31], [15], [32], [33], [34], [35]), leseno-steklene stenske elemente ([27], [29], [36]) in leseno-steklene stropne oz. strešne elemente ([37], [38], [39]). Med slednje lahko uvrstimo leseni strop, pri katerem bi uporabili steklo kot dodaten element za ojačitev lesenih stropnikov (dodatno k CLT plošči).

Pri vseh naštetih primerih je način stikanja steklenega in lesenega elementa lepljenje oz. uporaba adhezivov. Za lepljenje se uporabljajo različni adhezivi, npr. silikon, poliuretan,

akrilne in epoksidno smole ipd. Kriterij za izbiro primernega adheziva ni samo nosilnost, temveč tudi togost. Prednost lepljenja je, da se sile prenašajo preko relativno velikih stičnih površin in so posledično enakomerno razporejene. Predvsem koncentrirane sile so namreč največji problem pri steklu, ki v primerjavi z npr. jeklom nima sposobnosti lokalne plastifikacije (steklo je krhek material) in posledično ne pride do razporeditve sile na plastificirano površino, temveč do porušitve večjega dela elementa ali celega steklenega elementa.

Pri lepljenju ne gre za reverzibilni ukrep, kar je v nasprotju s smernicami za lesene konstrukcije pod spomeniškim varstvom Mednarodnega sveta za spomenike in spomeniška območja [40], po katerih morajo biti ukrepi reverzibilni. Pri lepljenju pride namreč tudi do penetracije lepila v les, ki je porozen material. Ob morebitni odstranitvi lepila bi bilo treba obdelati tudi obstoječi leseni stropnik, vendar bi to pretirano vplivalo na videz oz. prvobitnost stropnika. Pri stropih spomeniško zaščitenih stavb lepljenje načeloma (ukrepi se presojujejo individualno) ne sme biti uporabljeno.

Enega izmed prvih preizkusov uporabe leseno-steklene plošče je mogoče najti v [31, 41, 42]. Pri tem preizkusu je bilo steklo nameščeno na zgornji strani lesenih stropnikov oz. v tlačni coni upogibnega prereza. Preizkuse leseno-steklenih plošč je mogoče najti tudi v [37, 43], pri čemer pa so steklo namestili na zgornjo in spodnjo stran stropnikov. V vseh naštetih primerih je bilo steklo prilepljeno na lesene stropnike s togimi adhezivi. V [37] se je pri upogibnem preizkusu pri leseno-steklenih ploščah vzpostavil porušni mehanizem, pri katerem se je prva razpoka pojavila v lesenem stropniku. Sila je po prvi razpoki še naraščala in šele nato se je porušilo steklo na spodnji strani stropnikov (v natezni coni). Takšen porušni mehanizem je zaželen, saj do porušitve ni prišlo hipoma. Konstrukcija je izkazala določeno duktilnost.

Ugoden način pritrjevanja stekla na obstoječi stropnik bi predstavljalo vijachenje z lesnimi vijaki. Ti so v zadnjih letih doživeli razcvet. Izdelujejo jih v dolžinah do 1 m in posledično omogočajo prenos večjih osnih sil, ob tem pa tudi ohranjajo lesene konstrukcije v največji možni meri nepoškodovane, saj so običajni premeri od 6 mm do 10 mm [44]. Kot je prikazano v [45–47], so najbolj učinkoviti stiki, pri katerih so vijaki nameščeni pod kotom  $45^\circ$  glede na stično površino, saj tako izkoristimo omenjeno večjo osno nosilnost in togost teh vijakov. V omenjenih raziskavah gre sicer za stike les-les, tako da so v našem primeru neposredno uporabni le za stik med CLT ploščo v tlačni coni in lesenim stropnikom. Za uporabo lesnih vijakov za pritrjevanje stekla na lesene stropnike bi bili potrebni dodatni konstrukcijski elementi, ki bi omogočali prenos sil med lesnimi vijaki in steklom tako, da bi kontaktne napetosti rezultirale v čim manjših koncentracijah napetosti v steklu. Dodaten konstrukcijski element bi lahko bil kovinski vstavek, ki bi bil v neposrednem stiku z lesnimi vijaki in bi preko določenega podajnega materiala prenašal sile v steklo. Kot iztočnica za tak stik med kovino in lesnimi vijaki služijo raziskave [48, 49], v katerih so bili obravnavani stiki jeklenih plošč in lesenih elementov, povezanih z lesnimi vijaki.

Po našem najboljšem vedenju namenska držala oz. stiki za ojačitev obstoječih lesenih elementov s steklenimi elementi v času izdelave te doktorske disertacije še niso obstajala. Obstajajo pa različni sistemi za steklene fasade, steklene ograje ipd., po katerih se lahko pri

razvoju stika zgledujemo. Obstajajo različne vrste pritrjevanja stekla. Ločimo med linijskim in točkovnim pritrjevanjem stekla. V kontekstu ohranitve videza lesenega elementa so točkovna držala primernejša kot linijska, saj pokrivajo manjšo površino lesenega elementa (katerega vidljivost, videz želimo ohraniti). Točkovna držala nadalje delimo na držala na robovih in držala v luknjah v steklu. Nekoliko novejša so točkovna držala, ki so prilepljena na površino stekla [50], in tako imenovana trenjska držala [51], ki sile prenašajo s pomočjo prednapetja in posledične sile trenja. Znana so tudi držala, pri katerih je kovinski trak vlepljen med plošče lameliranih steklenih elementov oz. v ravnini laminacije [52]. Pri ojačevanju obstoječih lesenih stropnikov bi bilo smiselno uporabiti točkovno pritrjevanje preko izvrtanih lukenj v steklu, ki bi omogočale, da bi privili steklo na lesene stropnike in bi ga lahko tudi enostavno odvili. Ravno zaradi montaže se zdi, da pritrjevanje s točkovno prilepljenimi držali v našem primeru ne bi bilo enostavno izvedljivo. Klasična točkovna držala so kovinska in vstavljena v izvrtane luknje v steklu, zaradi boljše (enakomernejše) razporeditve napetosti v luknji pa so med kovinskim valjem in površino luknje v steklu uporabljeni različni materiali z nekoliko manjšo togostjo (npr. posebne cementne paste, različna lepila, aluminijasti obročki). Z razporeditvijo napetosti na robovih lukenj v steklu so se ukvarjali npr. v [53, 54]. V [55] je bilo prikazano, da lepljena točkovna držala rezultirajo v večjih nosilnostih točkovnih stikov s steklom v primerjavi z držali v izvrtanih luknjah v steklu. Za namene sovprežnega delovanja stekla in lesenega stropnika bi bilo smiselno uporabiti nekakšen hibrid med točkovnim vstavljivim držalom in točkovnim lepljenim držalom, saj bi tako izkoristili prednosti obeh sistemov, torej enostavno montažo in večjo nosilnost.

## 1.2 Struktura disertacije

V doktorski disertaciji je predstavljen razvoj novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov. Poglavja si sledijo tako, kot je potekal dejanski razvoj. Doktorska disertacija je razdeljena na deset glavnih poglavij, vključno z obširnimi uvodom, v katerem so postavljeni temelji za raziskovanje. Kot je predstavljeno v nadaljevanju, so raziskovalne metode obsegale pregled in sintezo dognanj predhodnih študij iz področja lesenih stropov, ojačevanja konstrukcij, steklenih konstrukcij ter različne eksperimentalne preiskave, analitične in numerične izračune.

V drugem poglavju je predstavljeno področje lesenih stropov in njihova ojačitev. Podan je jedrnat pregled razvoja stropnih konstrukcij od pradavnine do 20. stoletja našega štetja. Predstavljena sta tudi področje in razširjenost lesenih stropov na območju Slovenije. Navedeni so tipi nasutij v lesenih stropih, ki smo jih ovrednotili glede na prispevek k lastni teži različnih lesenih stropov. Nadalje so predstavljeni tudi glavni načini ojačitev lesenih stropov.

V tretjem poglavju sta predstavljena zasnova in ozadje predlaganega novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov. Predstavljene so značilne geometrije lesenih stropov, na podlagi katerih je bila izbrana tudi geometrija lesenega stropa, s katero smo opravljali raziskave. Podrobneje je predstavljen stekleni element oz. stekleni trak za ojačitev lesenih stropov.

V četrtem poglavju so predstavljeni strižni preizkusi lepljenih stikov med steklom in lesom, za katere smo razvili posebno strižno orodje za uporabo na nateznem trgalnem stroju. Za lepljenje steklenih in lesenih vzorcev smo uporabili adheziv, ki bazira na epoksidni smoli. Strižne preizkuse smo opravili pri različnih temperaturah in z različno vlažnim smrekovim lesom oz. s preizkušanci, ki so bili predhodno izpostavljeni različnim pogojem relativne zračne vlažnosti. Namen preizkusov je bil določiti strižno trdnost lepljenega stika pri različnih pogojih oz. določiti kritične pogoje za lepljene stike steklo-les, ter oceniti primernost izbranega adheziva za lepljenje steklenih elementov na obstoječe lesene stropnike, ki so lahko podvrženi različnim okoljskim pogojem. Opravljeni so bili tudi natezni preizkusi izbranega epoksidnega adheziva, na podlagi katerih smo ocenili modul elastičnosti in natezno trdnost. Strižne preizkuse smo simulirali z numeričnim izračunom po metodi končnih elementov, da bi ocenili kritične točke lepljenega stika in ocenili vpliv geometrijske tolerance strižnega orodja na rezultate strižnih preizkusov.

V petem poglavju je predstavljen razvoj točkovnega stika z lesnimi vijaki za povezavo steklenih elementov z lesenimi elementi oz. v našem primeru lesenimi stropniki. Na novo razviti stik sestoji iz steklenega elementa, s katerim želimo ojačati obstoječi leseni element, lesnih vijakov in aluminijastega vstavka, ki je z epoksidnim adhezivom vlepljen v luknjo v steklenem elementu. Opravili smo strižne preizkuse nosilnosti in togosti novega točkovnega stika. Preizkušanci so bili sestavljeni iz lesenih kvadrov smrekovega lesa in trakov iz kaljenega stekla, povezanih s točkovnimi stiki z lesnimi vijaki. Za namen uporabe trgalnega stroja za strižne preizkuse smo razvili posebno orodje, s katerim smo stekleni trak preko trenja obremenjevali s silo trgalnega stroja. Za izračun nosilnosti in togosti oz. modula pomika smo razvili analitične izraze. Dodatno smo togost novega točkovnega stika ocenjevali tudi z numeričnim izračunom po metodi končnih elementov. V poglavju smo s pomočjo numeričnih izračunov po metodi končnih elementov podali tudi oceno faktorjev koncentracij napetosti v steklenem traku pri različnih obremenitvah in način, kako faktorje uporabiti za oceno napetosti v steklenem traku ob uporabi za natezne ojačitve lesenih stropnikov.

V šestem poglavju so predstavljeni štiritočkovni upogibni preizkusi lesenih stropnikov, ojačanih s CLT ploščami in steklenimi trakovi. CLT plošče so bile na stropnike privite z lesnimi vijaki. Za pritrditev steklenega traku na stropnik smo pri dveh preizkušancih uporabili lepljenje, pri štirih pa novi točkovni stik za povezavo steklenih in lesenih elementov. Preizkusili smo tudi en stropnik brez ojačitev in enega ojačanega samo s CLT ploščo. Na majhnih vzorcih, izvzetih iz lesenih stropnikov, so bili opravljeni natezni preizkusi. Na podlagi teh smo ocenili mehanske lastnosti uporabljenih lesenih stropnikov. Med štiritočkovnimi upogibnimi preizkusi smo na nosilcih merili upogibe ter zdrse med stropniki in CLT ploščami in steklenimi trakovi. Rezultate različnih konfiguracij smo med seboj primerjali in tako poskušali ugotoviti vpliv ocenjenih mehanskih lastnosti stropnikov na uspešnost novega postopka za ojačitev lesenih stropov.

V sedmem poglavju smo predstavili analitični izračun nosilnosti in togosti lesenega stropa, ojačanega s CLT ploščo in steklenim trakom. Za izračun efektivne upogibne togosti sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo smo uporabili gama metodo oz. metodo za nosilce s



sestavljenimi prečnimi prerezi iz standarda [56], ki se uporablja za izračun upogibne togosti sovprežnih nosilcev s podajnimi veznimi sredstvi. Z analitičnim izračunom smo simulirali štiritočkovne upogibne preizkuse. Uporabili smo ocenjene mehanske lastnosti stropnikov in mehanske lastnosti standardiziranih trdnostnih razredov lesa iglavcev. Dodatno smo opravili tudi analizo vpliva različnih parametrov na nosilnost za mejno stanje nosilnosti (ULS) in uporabnosti (SLS). Pri SLS smo upoštevali samo kriterij deformacij, ne pa tudi kriterija vibracij. Pri tem smo upoštevali enakomerno zvezno obtežbo, na katero se stropne konstrukcije dimenzionirajo v praksi.

V osmem poglavju smo po metodi končnih elementov opravili numerični izračun nosilnosti in togosti lesenega stropa, ojačanega s CLT ploščo in steklenim trakom. Simulirali smo štiritočkovne upogibne preizkuse. Uporabili smo ocenjene mehanske lastnosti stropnikov.

V devetem poglavju smo primerjali rezultate štiritočkovnih upogibnih preizkusov, analitičnih izračunov in numeričnih izračunov. Primerjali smo upogibne togosti, nosilnosti, togosti priključnih ravnin. Primerjali smo tudi prispevke stekla k nosilnosti in upogibni togosti preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov, CLT plošč in steklenih trakov. Na poenostavljen način smo preverili vpliv strižnih deformacij na rezultate analitičnega izračuna.

Zadnje, deseto poglavje predstavlja diskusija o izvedenih raziskavah v okviru razvoja novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov. Ovrednoten je pomen rezultatov raziskave. Podane so tudi smernice za nadaljnje raziskovanje.

### 1.3 Hipoteza

V določenih situacijah lahko steklo uporabimo kot ojačitev že obstoječih konstrukcijskih elementov. Stare lesene stropne oz. stropnike starih lesenih stropov je mogoče ojačati s CLT ploščo (privito z lesnimi vijaki) in steklenim trakom, ki je prilepljen s togim adhezivom. Stekleni panel v natezni coni stropa v sklopu systemske rešitve rekonstrukcije starih lesenih stropov, ki kot prvi korak že zajema uporabo CLT plošče v tlačni coni, prispeva k povečanju nosilnosti stropa v natezni coni in k večji upogibni togosti stropa. Stekleni trak je namesto z lepljenjem možno pritrditi tudi z vijachenjem oz. z lesnimi vijaki, za kar se lahko uporabi nov točkovni stik. Točkovni stik omogoča prenos sil iz lesnih vijakov na stekleni trak z zadostno nizkimi koncentracijami napetosti v steklenem traku, da lahko privit stekleni trak prispeva tako k večji upogibni togosti kot tudi nosilnosti. Nosilnost in togost novega točkovnega stika lahko ocenimo z analitičnim izračunom. Numerični izračun lahko uporabimo za izračun togosti oz. modula pomika novega točkovnega stika. Numerični izračun lahko uporabimo za oceno faktorjev koncentracij napetosti v steklenem traku pod različnimi obremenitvami. Obnašanje s CLT ploščo in s steklenim trakom ojačanega lesenega stropnika lahko analiziramo z analitičnim izračunom. Dodatno lahko obnašanje s CLT ploščo in s steklenim trakom ojačanega lesenega stropnika analiziramo tudi z numeričnim izračunom po metodi končnih elementov.

## 1.4 Cilji doktorske disertacije

Cilj doktorske disertacije je razviti nov postopek za ojačitev starih lesenih stropov, ki bo predstavljal inovativno rešitev, uporabno na področju prenove stavb z lesenimi stropi. Nov postopek bo rezultiral v večji nosilnosti in togosti ojačanega lesenega stropa ob tem pa bo rešitev v veliki meri ohranjala prvobitni videz stropnega elementa. Rešitev bo arhitektom, inženirjem, konservatorjem in drugim, vpletenim v prenovo grajene kulturne dediščine, predstavljala pomembno izhodišče za iskanje alternativ v postopkih prenove in rekonstrukcije starih objektov.

Doktorska disertacija bo predstavljala tudi pomemben prispevek na področju aplikacije steklenih konstrukcij. Izvirnost se bo kazala predvsem v uporabi stekla kot transparentnega sredstva za ojačitve.

Z eksperimentalnimi preiskavami bomo odgovorili tudi na vprašanje, ali je z izbrano vrsto stikanja lesenega stropnika in stekla možno doseči zadostno togost priključne ravnine, da bo steklo delovalo kot ojačitev. Hkrati želimo doseči, da bo pred porušitvijo stekla prišlo do večjih upogibov, kot so meje za upogibe določene z gradbenimi standardi, evrokodi. Slednje bo pomenilo uporabnost novega postopka v praksi.

Način ojačevanja lesenih konstrukcij s steklom bo predstavljal novo možnost za konstrukcije grajene kulturne dediščine, saj bo steklo zaradi svoje transparentnosti v veliki meri ohranjalo in še dodatno poudarilo prvobitni videz lesenih konstrukcij. Prav tako bo raziskana metoda predstavljala reverzibilno tehniko, ki pa bo tudi minimalno invazivna oz. bo minimalno preoblikovala zaščiteno leseno konstrukcijo.

Lepljeni stik v osnovi ni reverzibilni ukrep, vendar se razvija tudi področje lepil. Cilj je dokazati učinkovitost ojačitev stropnikov s prilepljenim steklom in tako ustvariti dodatni motiv za razvoj namenskega lepila za stik les-steklo, ki bi imel boljše lastnosti v smislu transparentnosti in reverzibilnosti.

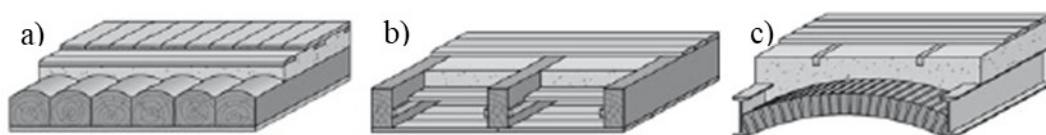
Rezultati raziskave, tako rezultati eksperimentalnih preiskav kakor tudi rezultati analitičnih in numeričnih izračunov leseno-steklenih stropnih elementov s CLT tlačno pasnico in s stekleno natezno pasnico, bodo predstavljali izviren znanstveni prispevek k znanju s področja obnašanja sovprežnih leseno-steklenih elementov.

## 2 LESENI STROPI IN OJAČITVE

### 2.1 Razvoj stropnih konstrukcij

V zgradbah prvih naprednih kultur so bile edina alternativa lesenim nosilcem razne tvorbe iz naravnih ali obdelanih kamnov (pozneje tudi ločne konstrukcije) [57]. Medtem ko je bil razvoj stenskih konstrukcij zelo dinamičen, so leseni stropi ostali bolj ali manj stalnica, edina izjema so bili oboki kletnih prostorov in zgradbe premožnejših ljudi, kjer so se tudi v višjih nadstropjih uporabljali oboki [57]. Šele z industrializacijo in z večjo dostopnostjo železa se je pojavila težnja po alternativnih načinih gradnje stropov [57].

V [57] je navedeno, da lahko do zadnje četrtine 19. stoletja stropne konstrukcije ločimo na tri tipe, in sicer na strope iz stikajočih se lesenih stropnikov (slika 1 a), strope iz lesenih stropnikov z razmiki (slika 1 b) in oboke (slika 1 c). Zaradi večje nosilnosti so bili stropi iz stikajočih se lesenih stropnikov pogosteje uporabljeni za najvišja nadstropja, saj so zagotavljali večjo požarno varnost v primeru požara v strehi (ščitili so pred razširitvijo požara v nižja nadstropja, saj so lahko nosili obtežbo porušene strehe). Stropi iz lesenih stropnikov z razmiki so bili uporabljeni med pritličjem in najvišjim nadstropjem. Oboki so bili uporabljeni v nižjih nadstropjih (nad kletmi) in nad stopnišči.



Slika 1: Različni tipi stropnih konstrukcij do konca 19. stoletja: a) strop iz stikajočih se lesenih stropnikov, b) strop iz lesenih stropnikov z razmiki, c) obok oz. obok med železnimi nosilci (vir slike: [57])

V [57] je nadalje navedeno, da sta se na začetku 20. stoletja za strope začela v večjem obsegu uporabljati beton in jeklo (kot armatura). Kasneje so bile razvite različne oblike, ki so zmanjšale porabo materiala in posledično maso stropa (prefabricirani betonski elementi, opečnata polnila itd.). Sledil je razvoj sovprežnih konstrukcij in prednapetih konstrukcij.

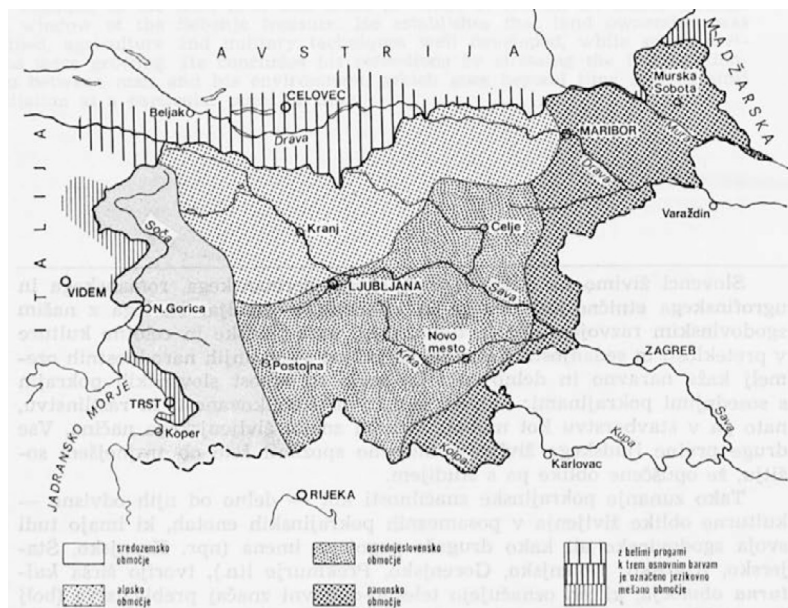
### 2.2 Leseni stropi v Sloveniji

V [58] je na podlagi primerjave slovenskega in nemškega stanovanjskega sklada navedena trditev, da je v Sloveniji stavb z obnove potrebnimi lesenimi stropi vsaj 5 % celotnega stanovanjskega sklada. Natančni podatki o razširjenosti lesenih stropov na območju Slovenije ne obstajajo, kljub vsemu pa lahko trdimo, da so leseni stropi v Sloveniji še vedno razširjena vrsta stropov tako v stanovanjskih kot v drugih (npr. industrijskih) zgradbah. Temu zagotovo botruje velika gozdnatost in posledično cenovna ugodnost lesa v primerjavi z armirano-betonskim ali jeklenim nosilcem. Primer uporabe lesa za stropne konstrukcije je industrijska zgradba Intesovega mлина v Mariboru iz leta 1874, katere notranjo konstrukcijo tvorijo leseni podporni stebri in leseni stropni nosilci, kar je zanimivo, saj so takrat že bili razširjeni litoželezni gradbeni elementi [59]. V časopisnem članku iz leta 1956 [60] so opisani

alternativni materiali, s katerimi bi lahko nadomestili les, za katerega je obstajala nevarnost, da ga bo začelo izrazito primanjkovati. Tudi iz tega lahko sklepamo, da se je les po II. svetovni vojni še množično uporabljal za stropne v stanovanjski gradnji.

Najstarejši ohranjeni leseni strop na Slovenskem je mogoče najti v Hlebanjevi hiši na Srednjem vrhu nad Martuljkom, kjer je na stropniku izrezljana letnica 1506 [61, 62]. Gre torej za kmečko hišo in ne za kakšno graščino. Iz različnih virov je razvidno, da je že v srednjem veku obstajal nekakšen trend zamenjav lesenih stropov s kamnitimi ali opečnimi oboki. Kot primer navedimo grad Rajhenburg [63]. Podobno velja tudi za sakralne objekte. Tako je v [64] mogoče najti več primerov zamenjave lesenih stropov s kamnitimi oboki v cerkvah ljubljanske škofije. Leseni stropi so bili od nekdaj najbolj razširjena stropna konstrukcija, saj so bili cenovno najdostopnejši oz. edini dostopni širšemu krogu prebivalstva, različni oboki pa so bili »rezervirani« za premožnejše osebe. Dodaten razlog je zagotovo tudi enostavnost lesenega stropa, saj gre, statično gledano, za prostoležeči nosilec, kar laično pomeni, da z večanjem dimenzije prereza (do neke mere) večamo tudi nosilnost in tudi reakcije se pojavijo le v vertikalni smeri, kar je ugodno za zidove. Nosilnost obokov pa ni odvisna le od debeline oboka, temveč tudi od naklona oz. geometrijske linije oboka, prav tako pa se poleg vertikalnih pojavljajo tudi horizontalne reakcije, kar je za zidove dodatna obremenitev. Skratka, oboki so kompleksnejše konstrukcije kot prostoležeči nosilci in njihovo delovanje je težje razumeti. Dober primer je ponovno mogoče najti v [64], kjer je omenjen obisk škofa Rabatte v cerkvi na Bledu leta 1665. Obveščen je bil, da nameravajo v cerkvi odstraniti leseni strop in zgraditi obok iz tufa, ker da je to lažji material. Škof Rabatta je dejal, da bo to delo terjalo ogromne stroške in izkušene mojstre. Poudaril je tudi dejstvo, da je cerkev široka in jo je zato težko zajeti v obok, obstaja pa tudi nevarnost, da stranski zidovi ne bodo mogli nositi teže oboka.

Glede vrste lesa za stropne v Sloveniji velja, da je večinsko, torej kmečko prebivalstvo uporabilo les, ki je bil najbolj dostopen. Običajno je to les iglavcev. Obstaja pa tudi nemalo primerov, ko so bile uporabljene tudi druge lesne vrste, npr. hrast v gradu Rajhenburg [63] ali pa celo oreh v nekdanji hiši mejnih grofov v Kranju [65]. V [66] je podana etnološka ločitev Slovenije (oz. geografskega območja Slovencev) na štiri glavna kulturna območja: na alpsko, panonsko, sredozemsko in osrednjeslovensko (slika 2). V alpskem območju so v stavbarstvu uporabljali predvsem smreko, jelko, macesen, ponekod tudi hrast in kostanj, v panonskem območju, bogatem z listavci, posledično v glavnem listavce hrast, bukev, jelšo, gaber, akacijo, lesko, pa tudi iglavec smreko, v osrednjeslovenskem območju so uporabljali smreko, bukev, hrast, v sredozemskem pa hrast, akacijo, smreko in ostale iglavce. Glede stropov se v [66] omenja macesnove in smrekove tramove v alpskem svetu, v osrednjeslovenskem in panonskem območju pa hrastove in kostanjeve tramove ter opaže iz smreke.



Slika 2: Etnološka območja na Slovenskem (vir slike: [67])



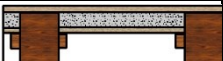




### 2.3 Nasutje v lesenih stropih

Glavna funkcija nasutja v lesenih stropih je obtežitev oz. povečanje lastne mase stropa. Večja masa povzroči daljši lastni nihajni čas stropne konstrukcije, posledično so vibracije stropa manj moteče, izboljša pa se tudi zvočna izolativnost stropa. Za nasutje so uporabljali negorljive materiale, tako da je nudilo tudi določeno varnost pri požarih oz. je upočasnilo širjenje požara. V [68] je navedeno, da vmesni opaži in na njih ležeče nasutje predstavljajo kritično točko v primeru požara pod stropno konstrukcijo, saj je maksimalni čas obstojnosti takšnega opaža običajno manj kot 30 minut. V [69] je navedeno, da so za nasutje v starih lesenih stropih uporabljali:

- odpadni gradbeni material (predvsem drobljeni ostanki zidovja, ki so bili pogosto toplotno obdelani oz. »požgani«) z gostoto okoli  $1400 \text{ kg/m}^3$ ,
- žlindro (brez žvepla) z gostoto okoli  $850 \text{ kg/m}^3$ ,
- pepel črnega premoga z gostoto okoli  $750 \text{ kg/m}^3$ ,
- pesek z gostoto okoli  $1400 \text{ kg/m}^3$ ,
- ilovico z gostoto okoli  $1800 \text{ kg/m}^3$ .

V [70] je mogoče najti več variant lesenih stropov z opisi sestavnih elementov. Te podatke smo uporabili za določitev razmerja mase nasutja in celotne mase stropa. Rezultati so razvidni iz tabele 1. Vidimo, da se deleži nasutja zelo razlikujejo, kar je predvsem posledica različnih mas nasutij. Minimalni delež je 20%, maksimalni pa 65%. Teža nasutij v vseh primerih znaša več kot  $0,5 \text{ kN/m}^2$ . Glede na to, da so sodobni polnilni materiali zelo lahki, lahko odstranitev nasutja omogoči občutno povečanje koristne obtežbe ali povečanje lastne teže stropa (npr. zaradi ojačitev).

Tabela 1: Teža različnih lesenih stropov in izračun deleža teže nasutja

Tip stropa (razviden s slike)	Površinska teža stropa [kN/m <sup>2</sup> ]	Vrsta nasutja	Poraba nasutja [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	Površinska teža nasutja [kN/m <sup>2</sup> ]	Delež teže nasutja glede na težo celega stropa [%]
	2,24	žlindra	0,075	0,64	28,5
	2,07	pesek	0,04	0,56	27,1
	2,20	odpadni gradbeni material	0,046	0,64	29,3
	2,20	pesek	0,062	0,87	39,5
	2,88	pepel	0,078	0,59	20,3
	1,50	žlindra	0,079	0,67	44,8
	2,20	ilovica	0,079	1,42	64,6

V Sloveniji so se predpisane koristne obremenitve v prejšnjem stoletju povečale vsaj trikrat, in sicer, ko so bili spremenjeni gradbeni standardi v nekdanji Jugoslaviji in kasneje, ko so bili ti standardi nadomeščeni z evrokodi oz. z veljavnimi gradbenimi standardi v Evropski uniji. Povzetek starih jugoslovanskih gradbenih predpisov iz leta 1948, PTP-2 (»Privremeni tehnički propisi za opterečenja zgrada«), je na voljo v [71]. Leta 1988 je bil uveden standard s predpisanimi koristnimi obtežbami JUS U.C7.121, ki je bil enak standardu ISO 2103: 1986 [72]. Po vstopu Slovenije v Evropsko unijo leta 2004 pa je za predpisane koristne obtežbe začel veljati Evrokod 1 [73]. V tabeli 2 so prikazane predpisane obremenitve stanovanjskih prostorov, pisarn in površin brez ovir za gibanje ljudi (muzeji, razstavišča, javne in upravne stavbe) iz omenjenih standardov. Če primerjamo razlike med predpisanimi koristnimi obtežbami in površinskimi težami nasutij (tabela 1), vidimo, da lahko povečanje predpisanih koristnih obtežb (npr. zaradi spreminjanja standardov ali spremembe namembnosti) delno ublažimo (površine brez ovir za gibanje ljudi) ali popolnoma izravnamo (stanovanja in pisarne) z odstranitvijo ali zamenjavo nasutij s sodobnimi izolacijskimi materiali (z zelo majhno maso).

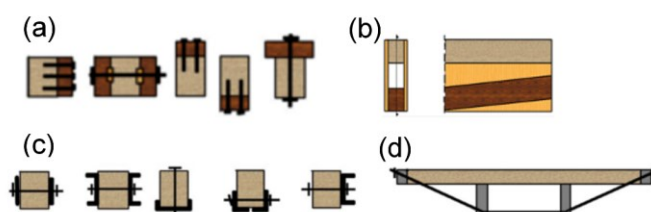
Tabela 2 Predpisane koristne obtežbe v različnih standardih

	PTP-2 [71]	JUS U.C7.121 (ISO 2103:1986 [72])	Evrokod 1 [73]
Kategorija namembnosti	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]
Stanovanja	1,25–1,5	1,5	2,0
Pisarne	2,0	2,0	3,0
Površine brez ovir za gibanje ljudi	2,0	2,5	5,0

## 2.4 Ojačitev lesenih stropov

Za ojačitev lesenih stropov obstaja mnogo ukrepov, vendar se v praksi pogosto izbere zamenjava celotnega lesenega stropa z armiranobetonsko ploščo. Po [70] med ukrepe prištevamo:

- zmanjšanje medsebojne oddaljenosti stropnikov oz. zgostitev stropnikov,
- vgradnja vmesnih podpornih gred,
- uporaba dodatnih stropnikov pod koncentriranimi obtežbami (npr. stenami),
- na stropnike pribite ali prilepljene lesene elemente oz. obloge na spodnji ali zgornji strani za povečanje statične višine (slika 3 a),
- v primeru zadostnega prostora izvedba škatlastih nosilcev (s pomočjo dodatnih stropnikov in obložnih plošč) (slika 3 b),
- uporaba jeklenih nateznih ali upogibnih elementov (slika 3 c),
- uporaba nateznih elementov in distančnikov, ki povečajo statično višino stropnika (slika 3 d),
- izvedba sovprežne betonske plošče nad stropniki (slika 4) ali uporaba sovprežne CLT plošče [74]



Slika 3: Načini za ojačitev lesenih stropov oz. stropnikov: a) uporaba dodatnih lesenih elementov, b) tvorba škatlastih nosilcev iz obstoječih nosilcev z dodajanjem stropnikov in obložnih plošč, c) uporaba dodatnih jeklenih elementov, d) uporaba jeklenih nateznih elementov in distančnikov za povečanje statične višine stropnika (slika povzeta po [70])

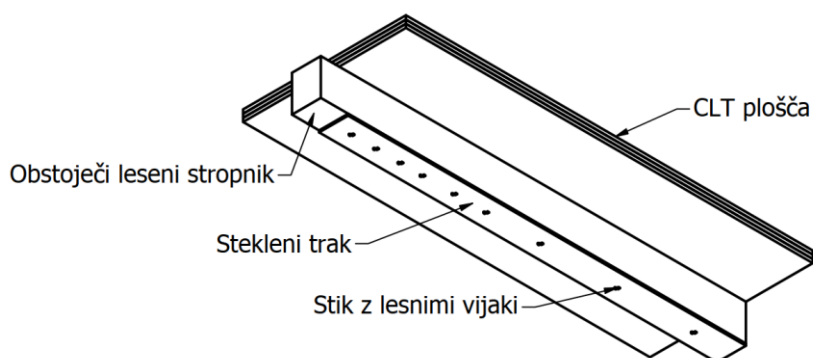
Znani so tudi poizkusi ojačitve lesenih stropnikov s sovprežno betonsko ploščo, tako da so v natezni coni uporabljeni različni trakovi iz umetnih mas [7] (slika 4). V [75] je prikazan še en možen ukrep, in sicer uporaba jeklenih objemk, ki objemajo lesene stropnike tako tesno (s pomočjo stiskanja z vijaki), da se strižne sile lahko prenašajo preko trenja. Trenje zagotavlja gumijasti sloj med jekleno objemko in stropnikom. Na jeklene objemke se lahko pričvrstijo poljubni elementi, ki ojačajo obstoječi leseni stropnik (npr. armirano-betonske plošče). Prednost omenjenega pristopa je reverzibilnost, saj v integriteto stropnika, razen s stiskanjem, ne posegamo.



Slika 4: Sovprežni leseno-betonski nosilci z nateznimi ojačitvami oz. CFRP trakovi na spodnji strani stropnikov (vir slike: [16])

### 3 ZASNOVA OJAČITVE LESENIH STROPNIKOV S KRIŽNO LEPLJENO LESENO PLOŠČO IN STEKLOM

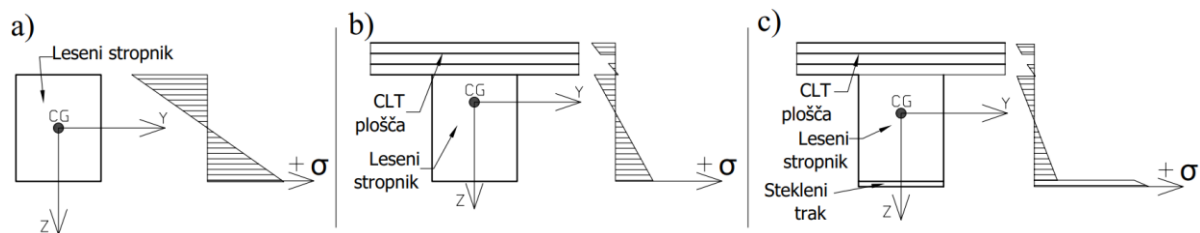
Predlagani novi postopek za ojačitev starih lesenih stropov obsega uporabo CLT plošče (plošča iz križno lepljenega lesa), ki je nameščena na zgornjo stran obstoječega stropnika in nanj privita z lesnimi vijaki, ter steklenega traku, ki je nameščen na spodnjo stran obstoječega stropnika in je nanj lahko ali prilepljen ali privit (z lesnimi vijaki). Predlagani postopek v veliki meri ohranja prvobitni videz lesenega stropa. Stekleni trak je transparenten, zato na videz stropnika vplivata le izbrani adheziv in stik z lesnimi vijaki. Postopek oz. rezultat postopka je prikazan na sliki 5, prikazana je različica s privitim steklenim trakom. Rezultat je nov kompozitni nosilec CLT-stropnik-steklo. Funkcija CLT plošče je poleg izboljšanja upogibnega obnašanja stropnika tudi zagotovitev delovanja lesenega stropa kot toge diafragme, kar je pomembno za horizontalne obtežbe (veter, potres) na stavbo z lesenimi stropi.



Slika 5: Prikaz stropnika, ojačanega z novim postopkom

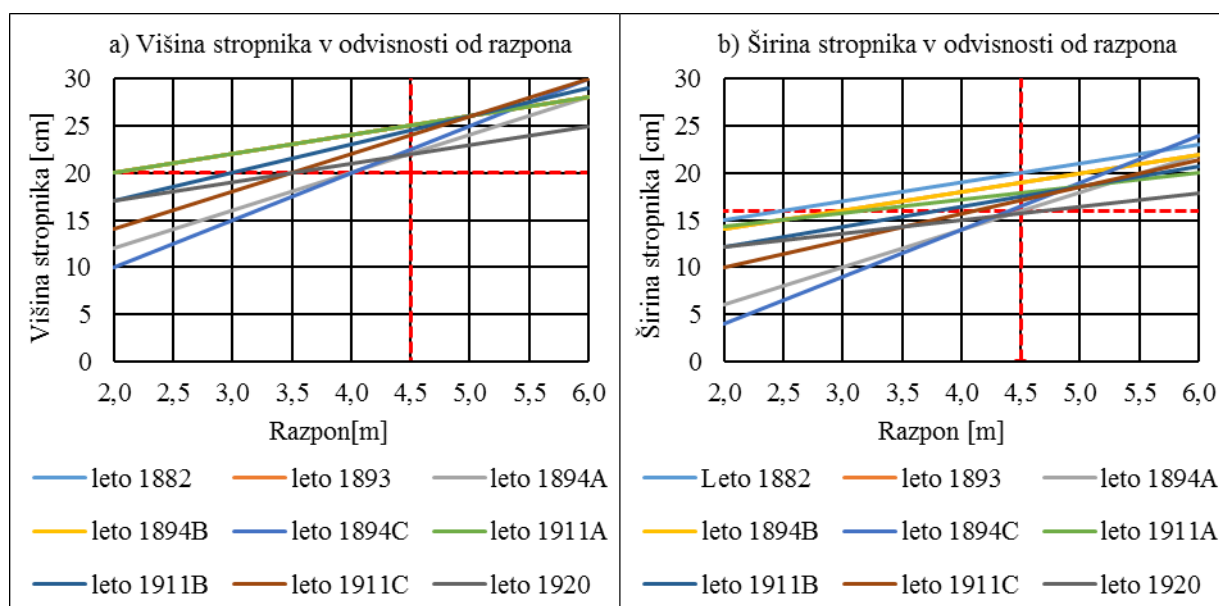
Predvideni učinek novega postopka na leseni stropnik lahko predstavimo z dodajanjem ojačitev (CLT plošča in stekleni trak) in s spremljanjem sprememb razporeditve normalnih napetosti v prerezu ob upogibni obremenitvi (glej sliko 6). Pri lesenem stropniku (slika 6 a) sta absolutni vrednosti ekstremnih nateznih in tlačnih napetosti enaki (pred plastifikacijo tlačnega dela prereza), ko dodamo CLT ploščo (slika 6 b), se absolutne vrednosti normalnih napetosti zmanjšajo, poleg tega pa je absolutna vrednost ekstremne natezne napetosti večja kot vrednost ekstremne tlačne napetosti. Z dodajanjem steklenega traku še zmanjšamo absolutne napetosti v stropniku, predvsem vrednost ekstremne natezne napetosti. Natezna trdnost lesa vzporedno z vlakni je za konstrukcijski les (les z napakami) običajno manjša kot tlačna trdnost vzporedno z vlakni, tudi zaradi tega učinek steklenega traku (natezna ojačitev) kljub manjši površini prereza v primerjavi s CLT ploščo ni zanemarljiv. Glede upogibne togosti je jasno, da bo CLT plošča prispevala največji delež, vendar bo imel učinek tudi stekleni trak. To lahko razložimo z opazovanjem položaja težišča prereza (CG), stekleni trak namreč oddalji težišče kompozitnega prereza od CLT plošče, s tem pa seveda poveča tudi prispevek CLT plošče k upogibni togosti kompozitnega prereza (v smislu Huygens-Steinerjevega teorema).





Slika 6: Različne konfiguracije lesenega stropnika in ojačitev s pripadajočimi diagrami normalnih napetosti ( $\sigma$ ) v prerezu ob delovanju upogibnega momenta v smeri osi  $y$  z označenim težiščem prereza (CG); a) samo stropnik, b) stropnik, ojačan samo s CLT ploščo, c) stropnik, ojačan s CLT ploščo in steklenim trakom

Novi postopek smo se odločili podrobneje raziskati na lesenem stropu z razponom 4,5 m, s prerezom stropnikov  $16\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  in z medosno razdaljo med stropniki 90 cm. Omenjeno dimenzijo za stare lesene stropne najdemo v [69]. Enako dimenzijo najdemo tudi v [70], kjer so zbrana stara tesarska pravila iz 19. in začetka 20. stoletja na območju srednje Evrope. Ta pravila smo vnesli v diagrame na sliki 7 in lahko služijo kot izhodišče za študije v povezavi z nosilnostjo starih lesenih stropov. Izbrane dimenzije za našo študijo predstavljajo spodnje meje možnih dimenzij za razpon 4,5 m, ki smo ga izbrali z namenom, da z našim raziskovanjem pokrijemo čim več obstoječih primerov, saj je npr. v [76] navedeno, da je približno štirimetrski razpon najpogostejši razpon stropnih konstrukcij stanovanjskih stavb v Srednji Evropi.



Slika 7: Tesarska pravila za dimenzije stropnikov (z medosno razdaljo od 0,8 m do 1,1 m) iz 19. in 20. stoletja na območju srednje Evrope [70] (z rdečo črtkano črto so označene dimenzije stropnika, na katerih smo preverjali novi postopek ojačitve starih lesenih stropov)

### 3.1 Stekleni trak

Novi postopek za ojačitev starih lesenih stropov predvideva uporabo steklenih trakov z enako širino, kot je širina obstoječih lesenih stropnikov. Glede na to, da smo želeli stropnike čim bolj ojačati in uporabiti tudi točkovne stike za povezavo steklenega traku in lesenega stropnika,

smo za steklene trakove izbrali kaljeno steklo. Stekleni trak, nameščen na spodnjo stran stropa, lahko uvrstimo v kategorijo »nadglavnih« zasteklitev, za katere je pomembno, da tudi po zlomu obstanejo na svojem mestu oz. ne padejo na uporabnike prostora pod njimi. To dosežemo z uporabo lameliranega stekla oz. z zlepljenimi steklenimi sloji. Pri naši študiji smo se odločili upoštevati steklo kot monolitno iz dveh razlogov. Prvi razlog je majhen vztrajnostni moment prereza steklenega traku, kar pomeni, da k večji upogibni togosti kompozitnega nosilca prispevata predvsem površina prereza steklenega traku ter razdalja med težiščem prereza steklenega traku in težiščem kompozitnega prereza. Podlaga za to trditve je Huygens-Steinerjev teorem. Drugi razlog pa je razmeroma visok strižni modul modernih folij za lameliranje stekla, ki omogočajo skoraj popolnoma monolitno delovanje zlepljenih steklenih plošč. Za ionoplast folije, kot je npr. folija SentryGlas Plus (SGP), ki tudi za deset let trajajočo obtežbo pri temperaturi 30 °C zagotavlja strižni modul 5,32 MPa [77], lahko izračunamo koeficient kompozitnega delovanja ( $\gamma$ ):

$$\gamma = \left( 1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{glass}} \cdot A_{\text{glass.sheet}} \cdot t_{\text{SGP}}}{L_{\text{glass}}^2 \cdot G_{\text{SGP}} \cdot b_{\text{glass}}} \right)^{-1} = 0,907 \quad (1)$$

kjer je  $E_{\text{glass}}$  modul elastičnosti stekla (70 GPa),  $A_{\text{glass.sheet}}$  prerez ene steklene plošče (v našem primeru polovica prereza steklenega traku oz. 5 mm × 160 mm),  $t_{\text{SGP}}$  debelina sloja folije SGP (1,52 mm),  $L_{\text{glass}}$  dolžina steklenega traku,  $G_{\text{SGP}}$  strižni modul folije SGP (5,32 MPa za deset let trajajočo obtežbo pri temperaturi 30 °C) in  $b_{\text{glass}}$  širina steklenega traku. Dobljeni koeficient kompozitnega delovanja ( $\gamma$ ) je enak 0,9 kljub zelo konzervativno izbranemu trajanju obtežbe in za notranje prostore visoki temperaturi.

Stropniki starih lesenih stropov so zaradi dolgotrajne obtežbe in lezenja lesa pogosto vidno povešeni. Postavlja se vprašanje, v kakšni meri je obremenjen stekleni element, ki ga pričvrstimo na leseni stropnik tako, da se ukrivljenost steklenega elementa ujema z ukrivljenostjo stropnika. V ta namen smo izračunali napetost v 10 mm debelem in 4,5 m dolgem steklenem elementu pri enakomerni zvezni obtežbi, ki rezultira v mejnem upogibu za dolgotrajne obtežbe (mejni upogib znaša eno dvestopetdesetino razpona). Napetost v steklenem elementu izračunamo z enačbo:

$$\sigma_{\text{glass}} = \frac{24 \cdot E_{\text{glass}} \cdot t_{\text{glass}}}{5 \cdot L_{\text{glass}}^2} \cdot \frac{L_{\text{glass}}}{250} = 3,0 \text{ MPa}, \quad (2)$$

kjer je  $t_{\text{glass}}$  debelina steklenega elementa. Izračunana napetost je zelo majhna (3,0 MPa), kar pomeni, da morebitna ukrivljenost lesenih stropnikov ni ovira za uporabo steklenih elementov. Prikazani izračun tudi pojasnjuje, zakaj so meje za dovoljene upogibe steklenih elementov tako visoke. Predstandard prEN 16612 [21] za steklene elemente predpisuje manjšo izmed vrednosti  $L_{\text{glass}}/65$  in 50 mm.

## 4 PREISKAVE VPLIVA TEMPERATURE IN VLAGE NA NOSILNOST LEPLJENIH STIKOV LES-STEKLO

Pri leseno-steklenih kompozitih je togost adheziva najpomembnejša lastnost, saj je steklo krhek material. Majhna togost adheziva zagotavlja enakomernjšo razporeditev napetosti na področju stika, hkrati pa je tudi indikator manjše trdnosti adheziva. Pri leseno-steklenih kompozitih so bili za uporabo že preizkušeni različni tipi adhezivov: od podajnih silikonskih do srednje togih adhezivov, kot so poliuretanski, in togih adhezivov, kot so akrilatni in epoksidni. Za mejo med omenjenimi skupinami lahko upoštevamo določila standarda [78], ki se pogosto uporablja za določitev mehanskih lastnosti adhezivov. Na podlagi tega standarda lahko ovrednotimo adhezive z modulom elastičnosti, večjim od 700 MPa, kot toge, adhezive z modulom elastičnosti od 70 MPa do 700 MPa kot srednje toge in adhezive z modulom elastičnosti, manjšim od 70 MPa, kot podajne. V [79] je navedeno, da so manjše debeline adhezivov v lepljenih stikih boljše v smislu manjših koncentracij napetosti, po drugi strani pa duktilni adhezivi izkazujejo boljše obnašanje pri večjih debelinah, saj se v večjem volumnu lažje zgodi disipacija energije. Kot je navedeno v [80], so duktilni adhezivi pogosto tudi podajni (in obratno), zato zgornja trditev drži tudi za podajne adhezive. Mehanske lastnosti adhezivov v strigu so za leseno-steklene kompozite najpomembnejše, kar je tudi razlog, da večina študij adhezivov za leseno-steklene kompozite obsega tudi različne variacije strižnih preizkusov. V [81] so tako prikazani strižni preizkusi leseno-steklenih preizkušancev, pri katerih sta dva vzorca iz lesa duglazije zlepljena z enim vzorcem kaljenega stekla tako, da so bili preizkušanci simetrični. Uporabljeni so bili različni adhezivi (silikonski, poliuretanski, akrilatni, meta-akrilatni, modificirani silanski in polivinil-butiralni), leseni vzorci z različno vsebnostjo vlažnosti, preizkusi pa so bili opravljeni pri različnih temperaturah. Ugotovljeno je bilo, da ima na lepljeni stik vlažnost lesa večji vpliv kot temperatura pri preizkusu. V [82] je predstavljena študija, za katero so preizkušali lepljene stike smrekovega lesa in navadnega stekla, zlepljene s silikonskimi, akrilatnimi in poliuretanskimi adhezivi. Izvedeni so bili natezni in strižni preizkusi, za izvedbo katerih je bilo uporabljeno posebno orodje. Za študijo [83] so bili opravljeni strižni preizkusi lepljenih stikov med lesenimi vzorci (iz smrekovega, bukovega in hrastovega lesa) ter vzorci iz kaljenega stekla, ki so bili zlepljeni s poliuretanskimi, akrilatnimi, epoksidnimi in epoksidno-silanskimi lepili. Pred strižnimi preizkusi so bili preizkušanci podvrženi cikličnemu spreminjanju vlažnosti in temperature, da bi tako simulirali negativne vplive okolja med življenjsko dobo stika. Preizkusi so bili izvedeni v skladu s standardom [84]. Rezultati so indicirali, da je degradacija lepljenega stika odvisna od vrste uporabljenega lesa. V [85] so bili izvedeni strižni in natezni preizkusi stikov lesa in stekla, za katere je bil uporabljen silikonski adheziv. Preizkušanci so bili podvrženi spreminjajoči se vlažnosti in temperaturi, osvetljevanju z ultravijolično svetlobo in delovanju kislin. Izkazalo se je, da imata klorovodikova kislina in spreminjajoča se temperatura največji vpliv na manjšanje strižne trdnosti obravnavanih preizkušancev. Verjetno najobširnejša študija o lepljenih stikih med steklom in lesom je predstavljena v [86]. Uporabljeni so bili silikonski, poliuretanski, epoksidno-silanski, akrilatni in epoksidni adhezivi, navadno in kaljeno steklo ter brezov in borov les. Uporabljene so bile tudi različne konfiguracije strižnih preizkusov, od posebnih orodij do direktnega vpetja preizkušancev v trgalni stroj (v skladu s standardom

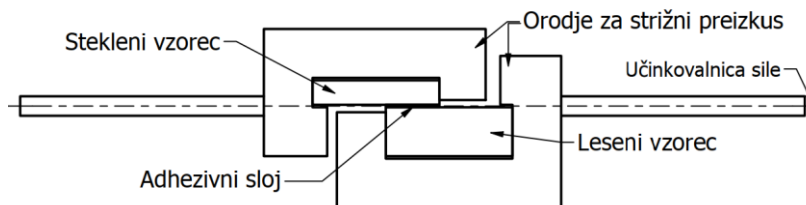
[87]). Preizkusi so bili opravljeni pri različnih temperaturah, leseni vzorci pa so imeli različne vsebnosti vlažnosti. Preizkušanci so bili podvrženi tudi osvetljevanju z ultravijolično svetlobo, namakanju v raztopini detergenta in umetni atmosferi z žveplovim dioksidom. Epoksidno lepilo se je izkazalo za najbolj odporno na osvetljevanje z ultravijolično svetlobo, za najbolj problematično pa se je izkazalo izpostavljanje žveplovemu dioksidu in raztopini detergenta. Slednje je mnogokrat rezultiralo v izgubi adhezije na stiku steklo-adheziv. Pri dolgotrajni obtežbi s konstantno silo se je izkazalo, da je lezenje pri epoksidnih adhezivih minimalno. Kot je predstavljeno že v [83], se razvoj leseno-steklenih kompozitov kaže tudi v prehodu od uporabe podajnih adhezivov do uporabe delno togih ali togih adhezivov. To lahko razumemo kot proces, pri katerem (v kompozitu) vedno večji delež obtežbe prevzema steklo. Pri leseno-steklenih stenskih elementih, ki so podvrženi vplivom notranjih in zunanjih klimatskih pogojev, trenutno stanje tehnike predvideva uporabo delno togih adhezivov, kot so poliuretanski adhezivi, ki lahko sledijo različnim temperaturnim raztezkom stekla in lesa. Za leseno-steklene elemente, ki so podvrženi le notranjim klimatskim pogojem, kjer je temperatura razmeroma konstantna, je ustrezna tudi uporaba togih adhezivov. Kot argument za uporabo epoksidnih adhezivov v zunanjih klimatskih pogojih je sicer treba upoštevati večjo obstojnost epoksidnih lepil [83].

Pri obstoječih primerih leseno-steklenih kompozitov gre za na novo zgrajene konstrukcijske elemente, v sklopu te doktorske disertacije pa smo se ukvarjali z ojačitvami obstoječih konstrukcij (lesenih stropov). Z ojačitvami želimo doseči, da bo dodani element (dodana ojačitev) prevzel čim večji delež obtežbe in posledično bo obstoječi element čim bolj razbremenjen. To je razlog, da se za lepljenje ojačitev v glavnem uporabljajo togi adhezivi, ki zagotavljajo sovprežno delovanje ojačane konstrukcije z ojačitvijo. Tudi mi smo zato za stik stekla in lesa uporabili togi adheziv, ki se uporablja za ojačitev obstoječih konstrukcij. Majhne leseno-steklene preizkušance smo preizkusili v smislu določitve strižne trdnosti. Zanimal nas je vpliv vlažnosti lesa in temperature (med preizkusom) na strižno trdnost lepljenega stika. Preizkušanci so imeli tri različne stopnje vlažnosti lesa, preizkusi so bili opravljeni pri treh različnih temperaturah, za vsako kombinacijo okoljskih pogojev pa smo opravili preizkuse na sedmih preizkušancih. Skupaj smo torej preizkusili triinšestdeset preizkušancev.

#### **4.1 Orodje za strižni preizkus in leseno-stekleni preizkušanci**

Za namen strižnega preizkusa smo razvili posebno orodje (slika 8), ki je bilo sestavljeno iz dveh delov iz konstrukcijskega jekla. Za strižni preizkus smo orodje vpeli v trgalni stroj Zwick/Roell Z010. Dela strižnega orodja sta imela različno geometrijo, saj je bil en del namenjen za fiksacijo lesenega dela preizkušanca, drugi del pa za fiksacijo njegovega steklenega dela. V [88] je prikazano, kako lahko sila trenja med orodjem in preizkušanci pomembno vpliva na ovrednotenje strižne trdnosti na podlagi strižnih preizkusov lepljenih stikov les-les. Naše orodje smo zato razvili tako, da kontakt med delom za fiksacijo stekla in lesenim delom preizkušanca ni mogoč, prav tako ni mogoč kontakt med delom za fiksacijo lesa in steklenim delom preizkušanca. Sila se z enega dela strižnega orodja na drugi del tako lahko prenaša le preko lepljenega stika. Našteto pomeni, da v izmerjeno silo trgalnega stroja niso vštete nobene trenjske sile, ki se sicer razvijejo med orodjem in preizkušancem. To je

pomembna lastnost našega orodja, saj bi lahko morebitne trenjske sile (ki jih sicer težko natančno določimo) povzročile nenatančnosti pri izmerjeni sili, poleg tega pa so trenjske sile (oz. koeficient trenja) odvisne od okoljskih pogojev (predvsem od vlažnosti drsnih površin).



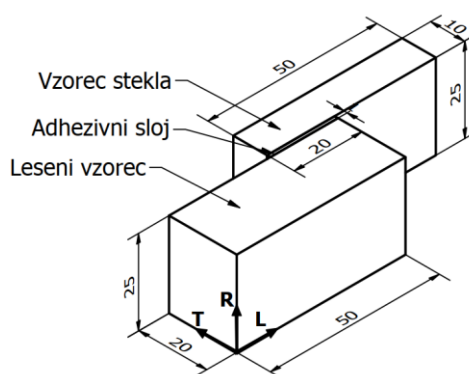
Slika 8: Orodje za strižni preizkus in leseno-stekleni preizkušavec

Pri razvoju strižnega orodja smo predvideli tudi 1-milimetrsko toleranco za dimenzije preizkušancev, tako da morebitne deviacije geometrije preizkušancev niso povzročale težav pri vstavljanju v orodje. Za zapolnitev špranj med preizkušanci in strižnim orodjem smo uporabili tanke jeklene ploščice (z debelinami od 0,1 mm do 1 mm).

Omenjena toleranca za geometrijo preizkušancev je sicer omogočala določeno rotacijo preizkušancev v strižnih orodjih, kar je neugodno, saj se zaradi tega povečujejo normalne napetosti v smeri pravokotno na ravnino lepljenega stika. Ta rotacija je bila ocenjena na  $1,5^\circ$  (ocenjena na podlagi predpostavke rotacije togega telesa). Vse preizkušance smo preizkusili na enak način, tako da je vpliv tolerance enak za vse okoljske pogoje.

Strižno orodje je bilo razvito tudi tako, da je učinkovalnica sile trgalnega stroja, v začetnem nedeformiranem stanju, potekala vzporedno z ravnino lepljenega stika in je razpolavljala adhezivni sloj po debelini.

Strižni preizkušanci so bili zlepljeni vzorci navadnega stekla in vzorci smrekovega lesa (slika 9). Širina adhezivnega sloja je bila 25 mm, dolžina 20 mm, debelina pa je bila 1 mm.

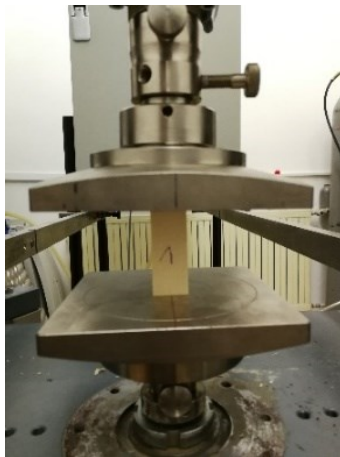


Slika 9: Leseno-stekleni preizkušavec z označenimi anatomskimi smermi v lesu (L – longitudinalna smer, R – radialna smer, T – tangencialna smer)

#### 4.1.1 Leseni vzorci

Debelina lesenega vzorca je bila 20 mm, širina 25 mm, dolžina pa 50 mm. Leseni vzorci so bili izdelani iz lesa navadne smreke. Vzorci so bili brez napak (npr. grč ali smolnih žepkov). Izdelani so bili tako, da je lepljena ploskev sovpadala z radialno anatomsko smerjo lesa. Tako

smo se izognili morebitnemu negativnemu vplivu deviacije posameznih branik. Daljša stranica vzorcev je bila vzporedna z longitudinalno anatomsko smerjo lesa, tako da je sila trgalnega stroja delovala vzporedno z vlakni lesa. Gostoto lesa smo določili v skladu s standardom [89]. Povprečna gostota lesa je bila  $444 \text{ kg/m}^3$  (izračunana z volumnom pri 12 odstotni vlažnosti lesa), koeficient variacije pa je znašal 10 %, kar je primerljivo z [90], kjer je bila gostota enaka  $417 \text{ kg/m}^3$  (koeficient variacije pa 10 %), ali z [91], kjer je bila gostota  $398 \text{ kg/m}^3$  (koeficient variacije pa 9 %). Na šestih lesenih vzorcih smo določili tudi modul elastičnosti v tlaku vzporedno z vlakni (slika 10). Preizkusili smo še tri lesene vzorce različnih dolžin in enakega prečnega prereza, na podlagi katerih smo določili podajnost trgalnega stroja in priprave za tlačni preizkus. Podajnost je znašala  $6,04825 \cdot 10^{-5} \text{ mm/N}$ . S pomočjo podajnosti smo lahko meritve pomikov na glavi trgalnega stroja uporabili za določitev modula elastičnosti v tlaku. Omenjena metoda je manj natančna v primerjavi z merjenjem pomikov direktno na vzorcu, vendar uporaba optičnega ekstenzometra trgalnega stroja zaradi majhne dolžine vzorcev ni bila mogoča. Modul elastičnosti je bil ovrednoten na intervalu krivulje sile v odvisnosti od pomika med 4000 N in 5000 N, znašal pa je približno 12 GPa (koeficient variacije je znašal 18 %). Modul elastičnosti je bil podobne velikosti, kot je podan npr. v [91].



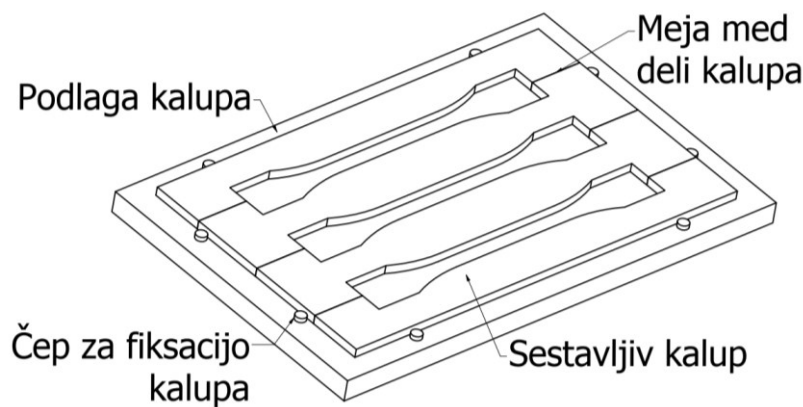
Slika 10: Tlačni preizkus lesenih vzorcev

#### 4.1.2 Stekleni vzorci

Razlike med uporabo adhezivov za lepljenje navadnega, delno kaljenega ali kaljenega stekla niso znane, zato smo se odločili uporabiti navadno steklo. Nominalna debelina steklenih vzorcev je znašala 10 mm, širina 25 mm, dolžina pa 50 mm. Stekleni vzorci niso imeli posebej obdelanih robov. Lepljena površina je bila na tako imenovani zračni strani stekla, da bi se tako izognili morebitnim negativnim vplivom kositrovih spojin, ki obstanejo na steklu zaradi procesa izdelave ravnega stekla. Za določitev zračne oz. kositrove strani smo uporabili vir ultravijolične svetlobe; če osvetljujemo s to svetlobo, kositrova stran oddaja svetlobo izrazito bele barve. Pomembno je sicer uporabiti ultravijolično svetlobo z valovno dolžino 255 nm, saj npr. pri ultravijolični svetlobi z valovno dolžino 305 nm tega pojava ne opazimo. Omenjeni pojav je prikazan npr. v [92].

### 4.1.3 Epoksidni adheziv

Izbrani adheziv je bil epoksidni adheziv Adesilex PG1 podjetja MAPEI. Gre za hladno hitro strjujoče se dvokomponentno tiksotropno lepilo. Mešalno razmerje komponent je 3 : 1 (komponenta A je smola, komponenta B pa trdilec). Osnova za adheziv je bisfenol (bisfenol A in F), za trdilec pa amini in fenoli. Fino mleti kremenčev prah premera približno 0,01 mm predstavlja 20–25 % mase adheziva, služi pa kot sredstvo za zmanjšanje vpliva strjevanja lepila na zmanjšanje volumna. Čas vezanja lepila je 7 dni [93]. Da bi določili natezno trdnost in modul elastičnosti v nategu, smo izvedli natezne preizkuse vzorcev iz adheziva. Natezni preizkusi so bili izvedeni v skladu s standardom [78]. Epoksidni vzorci so bili preizkušeni pri temperaturi  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  in pri relativni zračni vlažnosti  $55 \pm 5 \%$ , kar je identično pogojem, ki jih podaja standard [78] ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , in relativna zračna vlažnost  $50 \pm 10 \%$ ). Preizkus smo izvedli na šestih vzorcih. Za izdelavo epoksidnih vzorcev smo uporabili sestavljivi kalup (slika 11). Natezne preizkuse smo izvedli na trgalnem stroju Zwick/Roell Z010, pomike pa smo merili z optičnim ekstenzometrom z natančnostjo 5  $\mu\text{m}$ . Rezultati natezних preizkusov so podani v tabeli 3. V [94] so izvedli nekoliko obširnejše preizkuse mehanskih lastnosti izbranega adheziva. Izvedli so preizkuse v skladu s standardoma [78] (natezne lastnosti) in [95] (strižne lastnosti), njihovi rezultati pa so zbrani v tabeli 4. Opazimo lahko, da smo z našimi preizkusi, v primerjavi s [94], določili nekoliko višji modul elastičnosti v nategu. Eden od šestih vzorcev je vendarle rezultiral v modulu elastičnosti, podobnem tistemu, ki je bil določen v [94].



Slika 11: Sestavljivi kalup za izdelavo epoksidnih vzorcev

Pri naših preizkusih (slika 12) sta bili povprečna deformacija pri porušitvi in natezna trdnost nekoliko manjši kot v [94], a so razlike v vrednostih iz [94] glede na naše rezultate še vedno v okviru standardnih deviacij naših rezultatov. Število preizkušancev v [94] ni podano, tako da je možen razlog za odstopanje rezultatov statistične narave. Drugi možen razlog je tudi morebitno razlikovanje med klimatskimi pogoji med procesom strjevanja oz. vezanja lepila, saj so v standardu [78] navedeni razmeroma široki intervali za pogoje med vezanjem adheziva in preizkusom.



Slika 12: Natezni preizkusi epoksidnih vzorcev

Tabela 3: Rezultati nateznih preizkusov epoksidnih vzorcev

	Modul elastičnosti [MPa]	Natezna trdnost [MPa]	Deformacija pri poružitvi [%]
	7109,37	24,89	0,37
Standardna deviacija [MPa]	1014,75	3,50	0,13
Koeficient variacije [%]	14,27	14,06	36,06

Tabela 4: Rezultati mehanskih lastnosti izbranega adheziva iz [94]

	Mapei Adesilex PG1
Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]	1456
Modul elastičnosti [MPa]	5716,03
Strižni modul [MPa]	2723,55
Poissonov količnik [∕]	0,26
Natezna trdnost [MPa]	25,13
Strižna trdnost [MPa]	13,70
Deformacija pri poružitvi [%]	0,52

Na podlagi naših rezultatov in rezultatov iz [94] ter podatkov proizvajalca [93] lahko trdimo, da vsaj pri temperaturi 20 °C izbrano lepilo izkazuje večjo trdnost kot izbrani leseni vzorci.

## 4.2 Okoljski pogoji

Okoljski pogoji so bile različne temperature med strižnimi preizkusi in različna vlažnost lesenih vzorcev.

### 4.2.1 Temperaturni pogoji

Da bi simulirali različne okoljske pogoje, smo strižne preizkuse izvedli pri temperaturah -5 °C, +20 ± 2 °C in +50 °C. Strižne preizkuse smo izvedli v temperaturni komori. Temperaturo -5 °C smo dosegli v približno sedmih minutah, temperaturo 50 °C pa v približno štirih minutah. Temperatura +20 ± 2 °C predstavlja laboratorijske pogoje.



#### 4.2.2 Vlažnost lesa in pogoji med strjevanjem adheziva

Vlažnost lesa je odvisna od relativne zračne vlažnosti in temperature zraka v prostoru, v katerem se leseni element nahaja. Obstojne lesene konstrukcije imajo tako različno vsebnost vlažnosti (običajno od 5 % do 20 %). Da bi lahko proučili vpliv vlažnosti lesa na strižno trdnost lepljenega stika, smo lesene vzorce kondicionirali s ciljem, doseči tri različne stopnje vlažnosti. Načrtovane stopnje vlažnosti ( $u$ ) so bile 5 %, 10 % in 20 %. Izbrane stopnje vlažnosti ustrezajo uporabnostnim razredom 1, 2 in 3 standarda [56] in pokrivajo večino lesenih konstrukcij v običajnih okoljih.

Stopnjo vlažnosti 5 % smo dosegli s sušenjem lesenih vzorcev v sušilni komori. Sušenje je bilo izvedeno v skladu s standardom [96]. Temperatura sušenja je bila 103 °C. Potem ko se masa vzorcev pri dveh meritvah v razmiku dveh ur ni razlikovala za več kot 0,1 %, smo za vzorce upoštevali, da so suhi. Takoj po sušenju smo jih zlepili s steklom in jih 24 ur pustili v laboratorijskih pogojih s temperaturo  $+20 \pm 2$  °C in relativno zračno vlažnostjo  $55 \pm 5$  %. Po 24 urah, ko so bili preizkušanci zadostno togi oz. je adheziv zadostno vezal, smo preizkušance prestavili v eksikator s silikagelom. Tam smo jih pustili sedem dni, da je adheziv dosegel končno trdnost. Ob tem smo s tremi kontrolnimi lesenimi vzorci kontrolirali vlažnost lesa. Štiriindvajset ur po lepljenju je bila vlažnost kontrolnih vzorcev od 6,95 % do 8,16 % (povprečje je znašalo 7,64 %, standardna deviacija pa 0,62 %), po sedmih dneh v eksikatorju pa je bila vlažnost kontrolnih vzorcev od 4,58 % do 4,96 % (povprečje je znašalo 4,78 %, standardna deviacija pa 0,19 %).

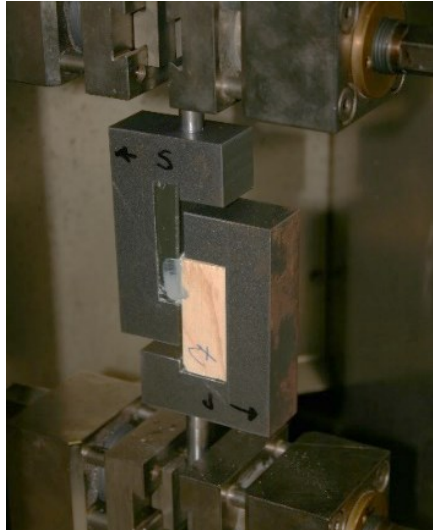
Stopnjo vlažnosti 10 % smo dosegli s skladiščenjem lesenih vzorcev v laboratorijskih pogojih. Za določitev vlažnosti smo ponovno uporabili kontrolne vzorce. Vlažnost kontrolnih vzorcev je bila od 9,24 % do 10,98 % (povprečje je znašalo 10,06 %, standardna deviacija pa 0,87 %).

Stopnjo vlažnosti 20 % smo dosegli s skladiščenjem lesenih vzorcev v vlažni komori s temperaturo  $+20 \pm 2$  °C in relativno zračno vlažnostjo  $98 \pm 2$  %. Vzorce smo vzeli iz vlažne komore in jih takoj zlepili s steklom. Preizkušance smo 24 ur pustili v laboratorijskih pogojih, nato pa smo jih prestavili nazaj v vlažno komoro. Po sedmih dneh smo opravili strižne preizkuse. Ob tem smo s tremi kontrolnimi lesenimi vzorci kontrolirali vlažnost lesa. Tik pred lepljenjem je bila vlažnost kontrolnih vzorcev od 20,85 % do 21,06 % (povprečje je znašalo 20,95 %, standardna deviacija pa 0,11 %). Štiriindvajset ur po lepljenju je bila vlažnost kontrolnih vzorcev od 16,96 % do 17,16 % (povprečje je znašalo 17,09 %, standardna deviacija pa 0,11 %), po sedmih dneh v vlažni komori pa je bila vlažnost kontrolnih vzorcev od 20,61 % do 20,78 % (povprečje je znašalo 20,69 %, standardna deviacija pa 0,09 %).

Poudarjamo, da so bili pogoji za doseganje želene vlažnosti lesa seveda tudi pogoji med vezanjem oz. strjevanjem adheziva. Vsebnosti vlažnosti v steklu in adhezivu nismo kontrolirali, vendar je jasno, da je različna relativna vlažnost zraka vplivala tudi na končne lastnosti adheziva. Skratka, strjevanje adheziva je potekalo pri temperaturi  $+20 \pm 2$  °C in treh različnih vrednostih relativne vlažnosti zraka.

### 4.3 Procedura strižnih preizkusov in način merjenja pomikov

Leseni del preizkušanca je bil med preizkusom fiksiran na mestu, stekleni del pa je bil potiskan v smeri zgornje glave trgalnega stroja (slika 13). Hitrost pomika glave trgalnega stroja je bila enaka 1 mm/min, predobremenitev pa je bila enaka 30 N. Pomike smo merili le na glavah trgalnega stroja.



Slika 13: Strižni preizkus

### 4.4 Rezultati

Rezultati meritev omogočajo oceno vpliva vlažnosti lesa na strižno trdnost lepljenega stika steklo-les. Povprečne strižne trdnosti sicer ne odražajo dejanske razporeditve napetosti v lepljenem stiku oz. adhezivnem sloju, a smo jih vseeno uporabili za merilo strižne trdnosti in za primerjavo z ostalimi študijami. Ko v sklopu tega poglavja govorimo o strižni trdnosti, je mišljena povprečna strižna napetost v trenutku porušitve preizkušanca in je enaka količniku maksimalne sile trgalnega stroja ter površine lepljenega stika.

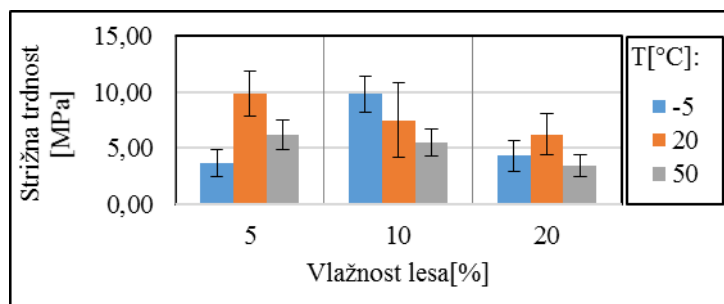
#### 4.4.1 Strižna trdnost

Rezultati strižnih trdnosti za različne okoljske pogoje so podani v tabeli 5. Največjo povprečno strižno trdnost (9,89 MPa) smo dosegli pri temperaturi  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  in vlažnosti lesa 5 %. Identično povprečno strižno trdnost (9,84 MPa) smo dosegli pri temperaturi  $-5^\circ\text{C}$  in vlažnosti lesa 10 %. Najmanjšo povprečno strižno trdnost (3,42 MPa) smo dosegli pri temperaturi  $50^\circ\text{C}$  in vlažnosti lesa 20 %. Identično povprečno strižno trdnost (3,63 MPa) smo dosegli pri temperaturi  $-5^\circ\text{C}$  in vlažnosti lesa 5 %.

Tabela 5: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ( $\tau$ ) za različne okoljske pogoje (s so standardne deviacije, CV pa koeficienti variacij)

				T [°C]		
				-5	20	50
u [%]	5	$\tau$	[MPa]	3,63	9,89	6,21
		s	[MPa]	1,19	1,64	1,38
		CV	[%]	33	17	22
	10	$\tau$	[MPa]	9,84	7,50	5,44
		s	[MPa]	1,99	3,31	1,85
		CV	[%]	20	44	34
	20	$\tau$	[MPa]	4,34	6,19	3,42
		s	[MPa]	1,33	1,22	0,95
		CV	[%]	31	20	28

Najnižji vrednosti povprečne strižne trdnosti sta bili rezultat ekstremnih okoljskih pogojev (najnižja temperatura z najnižjo vlažnostjo lesa in najvišja temperatura z najvišjo vlažnostjo lesa), vendar so bile tudi najvišje vrednosti povprečne strižne trdnosti rezultat okoljskih pogojev, kjer je vsaj en okoljski pogoj bil ekstremen (najnižja vlažnost lesa ali najnižja temperatura). Na sliki 14 je prikazano, kako so različne kombinacije okoljskih pogojev vplivale na povprečno strižno trdnost lepljenih stikov.



Slika 14: Povprečne vrednosti strižne trdnosti glede na okoljske pogoje (intervali napak so standardne deviacije)

Znano je, da tudi na trdnost stekla vplivajo vlaga, temperatura in trajanje obtežbe, vendar je v [97] navedeno, da gre pri tem za nekoliko dolgotrajnejše procese, vsaj v primerjavi s trajanjem naših preizkusov, ki so v povprečju trajali približno eno minuto. Vpliva omenjenih dejavnikov v naši študiji ni smiselno upoštevati, vseeno pa je treba omeniti, da so stiki pri temperaturi  $-5^{\circ}\text{C}$  in 5 odstotni vlažnosti lesa, ko je najpogosteje prišlo do odloma stekla, izkazovali nižje vrednosti strižne trdnosti kot stiki pri ostalih okoljskih pogojih (ko je tudi prišlo do loma stekla).

Rezultati za posamezne preizkušance v tabeli 6 kažejo, da je enainšestdeset od triinšestdesetih preizkušancev doseglo strižno trdnost, večjo od karakteristične strižne trdnosti trdnostnega razreda lesa C 24 (2,4 MPa). Za strižno trdnost smrekovega lesa brez napak vzporedno z vlakni je v [90] podana vrednost 9,8 MPa, kar je podobnega velikostnega razreda kot maksimalna strižna trdnost posameznega preizkušanca (12,19 MPa, preizkušanec N17, tabela 6). Kadar se je porušitev oz. lom zgodil zaradi loma lesa, je šlo pri tem najverjetneje za kombinacijo strižnega loma vzporedno z vlakni in nateznega loma pravokotno na vlakna lesa. Majhna

natezna trdnost pravokotno na vlakna smrekovega lesa bi lahko bila razlog za nizke vrednosti strižne trdnosti preizkušancev z obliko loma 1 (lom lesa).

Tabela 6: Rezultati posameznih preizkušancev (ID je označba preizkušanca,  $F_{max}$  je sila trgalnega stroja pri poružitvi preizkušanca, KP je kombinacija oblik loma, NB je število branik na lepljeni površini lesenega vzorca)

ID	u [%]	T [°C]	$F_{max}$ [N]	$\tau$ [MPa]	KP	NB	ID	u [%]	T [°C]	$F_{max}$ [N]	$\tau$ [MPa]	KP	NB
S1	5	-5	1113,34	2,23	0+1	13	N5	10	20	4971,63	9,94	0+1+3	10
S2	5	-5	2549,86	5,10	1+4	10	N6	10	20	1427,62	2,86	1+4	6
S3	5	-5	1369,44	2,74	0+1+2+3	4	N7	10	20	5638,39	11,28	0+1+3+4	10
S4	5	-5	1953,76	3,91	0+1+3	10	N8	10	50	4625,77	9,25	1	13
S5	5	-5	1860,83	3,72	0+2	9	N9	10	50	2611,63	5,22	0+1+3	20
S6	5	-5	2584,42	5,17	0+2	3	N10	10	50	3099,87	6,20	0+3	10
S7	5	-5	1275,01	2,55	0+2	13	N11	10	50	2294,23	4,59	0+1+3	13
S15	5	20	4493,07	8,99	4	21	N12	10	50	2333,41	4,67	2+3	7
S16	5	20	3309,03	6,62	1+4	7	N13	10	50	2253,96	4,51	2+3	7
S17	5	20	5414,19	10,83	1	9	N14	10	50	1837,56	3,68	2+3	3
S18	5	20	4967,29	9,93	0+1+4	15	V1	20	-5	3273,19	6,55	4	19
S19	5	20	5420,3	10,84	0+1	3	V2	20	-5	2442,05	4,88	1	19
S20	5	20	5317,2	10,63	1	4	V3	20	-5	2209,94	4,42	1+2+3	3
S21	5	20	5707,69	11,42	0+1+3	17	V4	20	-5	2590,4	5,18	1+3	9
S8	5	50	2421,64	4,84	1+4	6	V5	20	-5	1739,89	3,48	0+1+3	10
S9	5	50	2486,51	4,97	0+1	20	V6	20	-5	1509,39	3,02	4	17
S10	5	50	3438,05	6,88	0+1+3	7	V7	20	-5	1413,31	2,83	4	7
S11	5	50	4143,62	8,29	0+1+4	8	V15	20	20	3234,54	6,47	1	17
S12	5	50	2367,4	4,73	4	12	V16	20	20	3710,09	7,42	0+1+3	11
S13	5	50	3324,24	6,65	1+4	7	V17	20	20	2572,96	5,15	1+4	10
S14	5	50	3569,99	7,14	1	23	V18	20	20	2812,14	5,62	0+1+3	10
N15	10	-5	4625,66	9,25	1+4	16	V19	20	20	2162,41	4,32	1	9
N16	10	-5	5982,22	11,96	1	15	V20	20	20	3821,31	7,64	1	16
N17	10	-5	6093,33	12,19	1	15	V21	20	20	3354,1	6,71	0+1+3	17
N18	10	-5	3546,47	7,09	1+4	8	V8	20	50	2293,76	4,59	1+3	12
N19	10	-5	5209,07	10,42	2	7	V9	20	50	1913,51	3,83	0+1+3	21
N20	10	-5	5201,18	10,40	1+2+3	9	V10	20	50	2034,7	4,07	0+3	9
N21	10	-5	3769,03	7,54	0+1+4	22	V11	20	50	924,53	1,85	1+3	6
N1	10	20	5515,74	11,03	1	20	V12	20	50	1864,86	3,73	0+3	16
N2	10	20	2782,46	5,56	0+1+3	7	V13	20	50	1250,8	2,50	2	9
N3	10	20	3532,42	7,06	1+4	20	V14	20	50	1686,53	3,37	3	10
N4	10	20	2395,09	4,79	1+4	17							

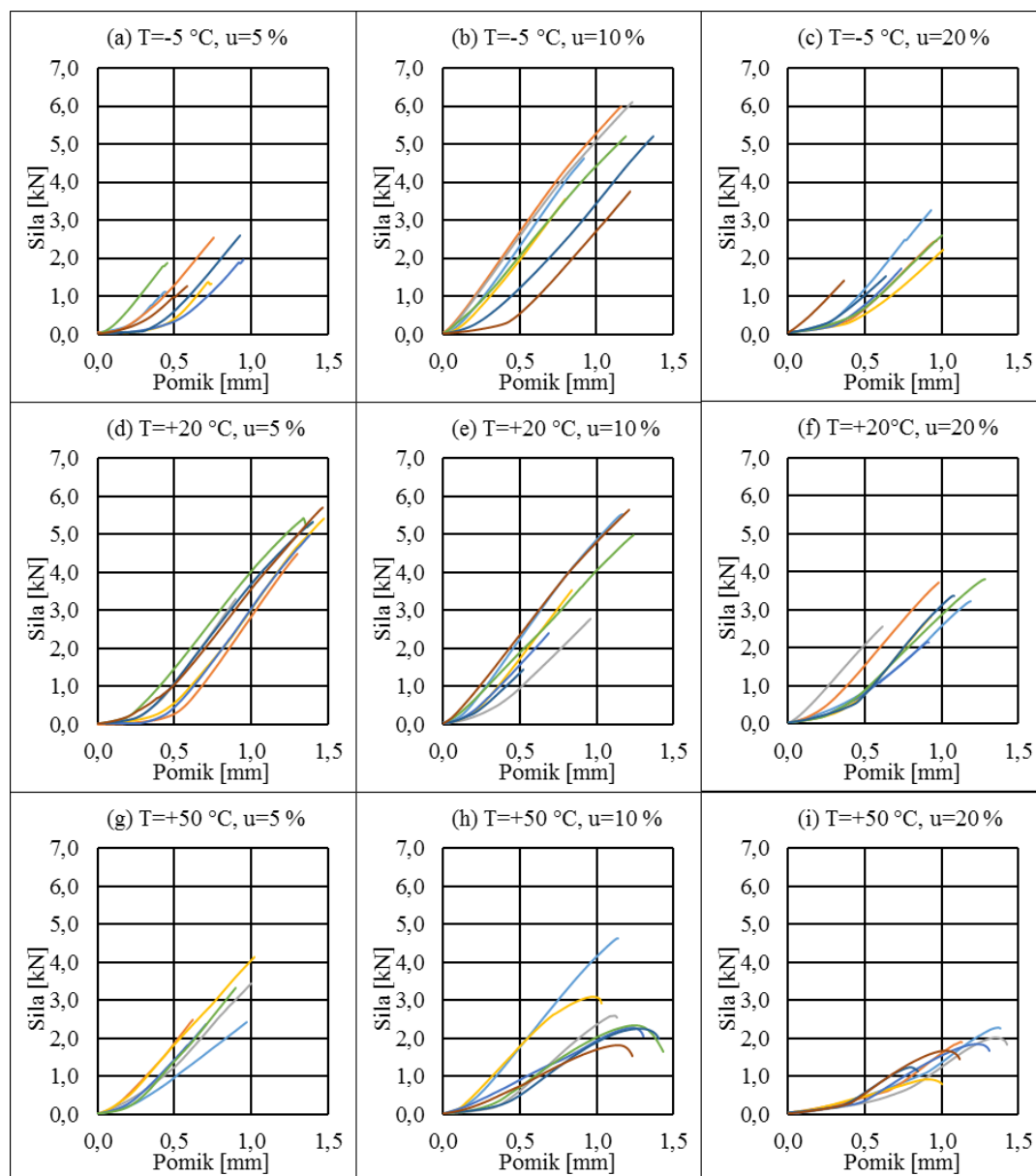
Vpliv nezaželenih oblik loma (tip loma 2 in 3) je težko določiti, saj je šlo pri večini lomov za kombinacijo različnih oblik loma, zaporedja pa, vsaj s prostim očesom, ne moremo oceniti. Če obravnavamo preizkušane N19, pri katerem je prišlo do čiste oblike loma 2, se zdi, da nezaželena oblika loma ni negativno vplivala na strižno trdnost. Dosežena strižna trdnost preizkušanca N19 je bila namreč enaka 10,42 MPa, povprečna strižna trdnost pripadajočih okoljskih pogojev pa 9,84 MPa. Za preizkušance V13, V14 in N12-N14 velja ravno obratno. Jasno je namreč, da je bila strižna trdnost omejena z oblikama loma 2 in 3, saj je bila oblika loma 3 tudi najpogostejša oblika loma za pripadajoče okoljske pogoje.

Kot je prikazano v tabeli 5, so koeficienti variacij strižne trdnosti znašali od 17 % do 44 %. Glede na to, da je bila najpogostejša oblika loma lom lesa (oblika loma 1), je pomembno

omeniti, da je v [98] podana podobna vrednost koeficienta variacij mehanskih lastnosti za različne vrste lesa (med 14 % in 34 %). Če upoštevamo, da je najvišja povprečna vrednost strižne trdnosti (9,89 MPa) izkazovala najmanjši koeficient variacij (17 %), lahko trdimo, da pripadajoči okoljski pogoji predstavljajo idealne pogoje (v primerjavi z obravnavanimi robnimi pogoji).

#### **4.4.2 Krivulje sile v odvisnosti od pomika**

Natančne analize deformacij leseno-steklenih preizkušancev nismo mogli izvesti, saj smo pomike merili na glavi trgalnega stroja, kar pomeni, da so izmerjeni pomiki vsota deformacij preizkušanca, deformacij orodja za strižni preizkus in deformacij trgalnega stroja. Na podlagi predpostavke, da je sprememba krivulj (sile v odvisnosti od pomika) iz linearnega obnašanja v nelinearno obnašanje predvsem posledica reakcije epoksidnega adheziva na okoljske pogoje, smo vseeno lahko sklepali o odvisnosti deformacij vzorca od obtežbe. Krivulje sile v odvisnosti od upogiba so razvidne s slike 15. Zaradi lažje primerjave imajo vsi diagrami enako merilo. Kljub temu da smo vse preizkušance predobremenili, lahko obnašanje pri majhnih obremenitvah (večanje naklona krivulj) opišemo kot proces fiksacije preizkušancev v strižnem orodju. Pojav se je razlikoval od vzorca do vzorca, kar kaže na določena odstopanja od načrtovane geometrije preizkušancev. Pri nekaterih krivuljah so se pojavile tudi nezveznosti, kar pripisujemo kombinaciji različnih oblik loma.



Slika 15: Krivulje sile v odvisnosti od pomika (merjenega na glavi trgalnega stroja) za leseno-steklene preizkušance pri različnih okoljskih pogojih (T – temperatura, u – vlažnost lesa)

Po začetni fiksaciji preizkušancev so krivulje izkazovale skoraj popolnoma linearno obnašanje. Izjema so bili le okoljski pogoji s temperaturo 50 °C in vlažnostjo lesa 10 % in 20 %, kjer so krivulje pri največjih obremenitvah že kazale nelinearno obnašanje. Za te krivulje velja, da se je preizkus nadaljeval še po tem, ko je bila največja sila že dosežena. Omenjeno lahko pripišemo preseganju temperature točke posteklenitve epoksidnega adheziva. V [99] so z diferencialno kalorimetrijo namreč določili temperaturno točko posteklenitve našega izbranega adheziva, in sicer 43,6 °C. Vzorce so skladiščili pri temperaturi 20 °C in v običajnih notranjih pogojih (sklepamo lahko, da je bila relativna zračna vlažnost bila od 50 % do 60 %). Glede na podatke proizvajalca MAPEI [93] je temperaturna točka posteklenitve višja od 40 °C. Zanimivo je, da teh nelinearnosti nismo opazili pri okoljskih pogojih 50 °C in vlažnosti lesa 5 %. Omenjeno kaže na to, da je na temperaturno točko posteklenitve vplivala relativna zračna vlažnost med procesom vezanja adheziva oz. da nizka

relativna zračna vlažnost okolja, v katerem poteka vezanje adheziva, povzroča višjo temperaturo točke posteklenitve. To se ujema z ugotovitvami v [100], kjer so določili temperature točke posteklenitve za večje število različnih epoksidnih adhezivov pri različnih vrednostih relativne zračne vlažnosti med procesom vezanja adheziva in dokazali ujemanje s teoretično določeno krivuljo vpliva topila na temperaturno točko posteklenitve polimerov, razvito v [101]. V [102] je navedeno, da absorpcija vode v epoksidnih adhezivih rezultira v do 45 % nižjih modulih elastičnosti in do 32 % manjši natezni trdnosti. V [103] je podana trditev, da absorbirana voda v epoksidnih adhezivih deluje kot plastifikator, ki zniža tudi temperaturo točke posteklenitve. V [104] trdijo, da dolgotrajna izpostavljenost vlažnim okoljskim pogojem sproža hidrolitske reakcije, ki rezultirajo v degradaciji adheziva. Naši preizkušanci so bili v vlažni komori sedem dni, tako da sklepamo, da do degradacije adheziva še ni moglo priti. V [105] je prikazano tudi, da epoksidni adhezivi pri višjih temperaturah postanejo bolj duktilni, zniža se tudi modul elastičnosti in zmanjša trdnost, pri nižjih temperaturah pa postanejo bolj krhki, modul elastičnosti se zviša in trdnost poveča. V [106] je opozorjeno še na efekt različnih kontrakcij adheziva in zlepjenih materialov pri različnih temperaturah, kar se ujema z različnimi vrednostmi strižne trdnosti preizkušancev pri različnih okoljskih pogojih oz. pri različnih kombinacijah okoljskih pogojev.

#### 4.4.3 Oblike loma



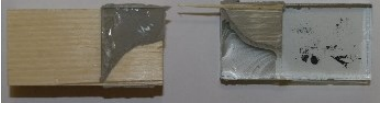


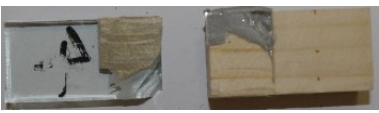



Opazili smo pet osnovnih oblik loma, ki so prikazane v tabeli 7. Dejansko je pri porušitvi v večini primerov prišlo do kombinacije osnovnih oblik loma, vendar nam ni uspelo določiti vrstnega reda pojava posamezne oblike loma.

Tabela 7: Oblike loma leseno-steklenih preizkušancev

Oblika loma	Opis	Fotografija oblike loma
0	Odlom stekla (porušna ploskev približno vzporedna z ravnino lepljenega stika)	
1	Lom lesa	
2	Adhezivni lom na steklu	
3	Lom adheziva	
4	Prelom stekla (porušna ploskev približno pravokotna z ravnino lepljenega stika)	

Kombinacije oblik loma so prikazane v tabeli 8, kombinacije za posamezni preizkušanec pa so navedene v tabeli 6.

Tabela 8: Kombinacije oblik loma

Oblike loma v kombinaciji	Fotografija kombinacije oblik loma	Oblike loma v kombinaciji	Fotografija kombinacije oblik loma
0 + 1 + 2 + 3		1 + 4	
0 + 1		1 + 3	
0 + 1 + 3		1 + 2 + 3	
0 + 1 + 4		0 + 3	
0 + 2			

V tabeli 9 so za posamezne okoljske pogoje podane najpogostejše oblike loma.

Tabela 9: Najpogostejša oblika loma za posamezne okoljske pogoje

		T [°C]		
		-5	20	50
u [%]	5	0	1	1
	10	1	1	3
	20	1	1	3

Oblika loma 1 oz. lom lesa je najpogostejša oblika loma vseh preizkušancev. Izjema so le okoljski pogoji s temperaturo 50 °C in vlažnostjo lesa 10 % in 20 %, pri katerih je bila najpogostejša oblika loma 3 oz. lom adheziva, in okoljski pogoji s temperaturo -5°C in vlažnostjo lesa 5 %, pri katerih je bila najpogostejša oblika loma 0 oz. odlom stekla na porušni ploskvi, ki je približno vzporedna z ravnino lepljenega stika. Čeprav je pri obliki loma 4 oz. prelomu stekla na porušni ploskvi, ki je približno pravokotna z ravnino lepljenega stika, steklo počilo izven območja lepljenega stika, to ni vplivalo na rezultate strižne trdnosti, saj so bili ti rezultati podobni rezultatom preizkušancev, pri katerih se oblika loma 4 ni pojavila.

Dejstvo, da je bila oblika loma 1 oz. lom lesa najpogostejša oblika loma, pomeni, da je strižna trdnost lepljenih stikov v veliki meri odvisna predvsem od trdnosti lesa. Vpliv vlažnosti lesa na mehanske lastnosti je dobro poznan – vlažnost lesa negativno vpliva na njegove mehanske lastnosti. Nekoliko manj raziskan je vpliv temperature in temperature v kombinaciji z vlažnostjo lesa. V [107] tako trdijo, da se žilavost lesa manjša, če pada temperatura in je vlažnost lesa visoka, ter da se žilavost lesa večja, če temperatura pada in je vlažnost lesa nizka.



V [107] je podano tudi približno merilo, da se za prirastek temperature za 1 °C trdnost in togost lesa zmanjšata za 1 %. V [108] trdijo, da se ta padec še poveča pri višjih vrednostih vlažnosti lesa in da se, ravno obratno, pri nizkih temperaturah in nizkih vrednostih vlažnosti lesa trdnost in togost lesa povečata. To se ujema tudi z opažanji pri naših preizkusih, saj pri okoljskih pogojih s temperaturo –5 °C in vlažnostjo lesa 5 % najpogostejša oblika loma ni bila več oblika 1 (lom lesa), ampak oblika 0 (lom stekla na porušni ravnini, ki je približno vzporedna z ravnino lepljenega stika).

V primerjavi s študijo lepljenih stikov steklo-les [82] smo opazili več različnih oblik loma oz. kombinacij oblik loma. Razlog je najverjetneje zelo tog izbrani epoksidni adheziv, ki onemogoča sledenje deformacij preizkušanca deformacijam strižnega orodja oz. posledično onemogoča prerazporeditev napetosti.

V splošnem velja, da je dober lepljeni stik tisti, pri katerem pride do porušitve izven področja lepljenega stika. Glede na to trditev sta obliki loma 2 in 3 najneugodnejši oz. najmanj zaželeni. Pri obliki loma 3 gre pravzaprav za kohezivni lom adheziva, kar pomeni, da bi to obliko lahko podrobneje raziskali s strižnimi preizkusi adheziva samega. Oblika loma 2 pa predstavlja težavo pri adheziji na steklu. Omeniti velja, da z adhezijo na lesu težav ni bilo, saj adhezivnega loma na lesu sploh nismo opazili. Število primerov oblik loma 2 in 3 za posamezne okoljske pogoje je podano v tabeli 10. Iz tabele 6 je razvidno, da je do čiste oblike loma 2 prišlo le dvakrat, do čiste oblike loma 3 pa enkrat, do kombinacije oblik loma 2 in 3 pa trikrat.

Tabela 10: Število primerov oblik loma 2 in 3 za posamezne okoljske pogoje

		T [°C]					
		–5		20		50	
		FT 2	FT 3	FT 2	FT 3	FT 2	FT 3
u [%]	5	4	2	0	1	0	1
	10	2	1	0	3	3	6
	20	1	3	0	3	1	6

#### 4.4.4 Vpliv širine branik

Podrobneje smo preverili tudi morebiten vpliv širine branik na lepljene stike, saj je bila oblika 1 (lom lesa) najpogostejša oblika loma. V [109] trdijo, da je širina branik indikator gostote lesa oz. da manjša širina branik pomeni večjo gostoto lesa. Gostota lesa pa je pomemben dejavnik, ko govorimo o penetraciji različnih snovi v les (npr. penetraciji sredstev za zaščito lesa). V skladu s teorijo mehanske adhezije je tudi znano, da lepljenje poroznejših materialov (s posledično bolj hrapavo površino) rezultira v večji trdnosti lepljenih stikov. Z namenom, da proučimo vpliv gostote oz. poroznosti lesa na lepljene stike, smo za vse vzorce lesa določili število branik na ploskvi, namenjeni za zlepljenje s steklom (glej tabelo 6). Do adhezivnega loma na lesu ni nikoli prišlo, vendar je mogoče, da je penetracija adheziva v les vplivala na porušno ploskev v lesu. Globlja penetracija adheziva namreč rezultira v večji porušni ploskvi v lesu. Strižne trdnosti posameznih preizkušancev smo primerjali s številom branik na lepljeni ploskvi posameznih preizkušancev (lesenih vzorcev). Za to zvezo smo opravili tudi linearno regresijsko analizo, determinacijski koeficienti ( $R^2$ ) pa so zbrani v tabeli 11.

Tabela 11: Determinacijski koeficienti zveze med številom branik na lepljeni ploskvi in strižno trdnostjo za posamezne okoljske pogoje

		T [°C]		
		-5	20	50
u [%]	5	0,21	0,00	0,01
	10	0,01	0,09	0,15
	20	0,14	0,43	0,28

Omeniti je treba, da smo za regresijsko analizo upoštevali rezultate vseh preizkušancev, ne glede na dejansko obliko loma oz. kombinacijo oblik loma. Največji determinacijski koeficient ( $R^2=0,43$ ) smo izračunali za okoljske pogoje s temperaturo  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  in vlažnostjo lesa 20 %, za ostale okoljske pogoje smo izračunali še nižje vrednosti. Pomembne korelacije torej nismo našli. Tudi ob upoštevanju samo preizkušancev, pri katerih je nastopila oblika loma 1 (lom lesa), nismo izračunali večjih determinacijskih koeficientov.

Opazili pa smo, da se na porušnih ploskvah lesenih vzorcev pojavljajo izbokline, ki so bile pravzaprav jesenski les (slika 16). To kaže na globljo penetracijo epoksidnega adheziva v spomladanskem lesu. Podlaga za to opažanje je dejstvo, da je spomladanski les poroznejši kot jesenski in zato omogoča globljo penetracijo adheziva. V [110] trdijo, da je več kot 90 % prostornine lesa navadne smreke sestavljeno iz traheid. Opisano pomeni, da je gostota smrekovega lesa odvisna od dimenzij traheid (premera in debeline stene). V [111] je naveden tudi podatek, da je debelina sten traheid jesenskega lesa večja kot debelina sten traheid spomladanskega lesa in da je premer traheid spomladanskega lesa večji kot premer traheid jesenskega lesa. Opažena valovita porušna ploskev, ki je nekoliko nagnjena glede na branike, pa je značilna tudi za lom lesa zaradi nateznih napetosti pravokotno na vlakna lesa oz. ko se smer natezne napetosti ujema z radialno anatomsko smerjo lesa [112]. Valovita porušna ploskev bi tako lahko bila tudi posledica nateznih napetosti pravokotno na vlakna lesa, saj se pri preklopnih spojih pod strižno obremenitvijo, pravokotno na lepljeni stik, razvijejo tudi natezne napetosti zaradi vzpostavitve ravnotežja sil (razlaga pojava je podana npr. v [113]).

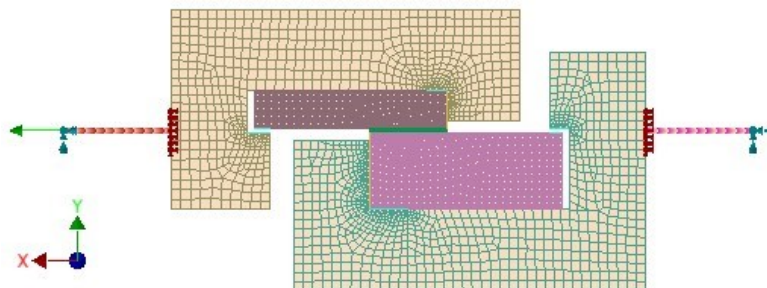


Slika 16: Porušna ploskev na lesenem vzorcu (opazni so »vrhovi« jesenskega lesa)

#### 4.4.5 Simulacija preizkusa z metodo končnih elementov

S programsko opremo Autodesk® Inventor® Nastran 2020 [114] smo po metodi končnih elementov izvedli dva izračuna. Oba smo izvedli z namenom, da preverimo, kakšen je vpliv

odstopanja geometrije strižnega orodja in leseno-steklenih preizkušancev. Konfiguracija strižnega preizkusa ima namreč lahko velik vpliv na izmerjeno strižno trdnost lepljenega stika, kot je prikazano v [88]. Do določene rotacije preizkušanca bi sicer prišlo, tudi če bi se geometriji strižnega orodja in preizkušanca popolnoma ujemale, saj se strižno orodje zaradi ravnotežja sil deformira tudi v smeri pravokotno na učinkovalnico sile trgalnega stroja. Z namenom, da v analizo obnašanja stika vključimo tudi omenjeni pojav, smo s končnimi elementi poleg preizkušanca modelirali tudi strižno orodje (slika 17). Z modeliranjem strižnega orodja smo tudi dosegli, da je učinkovalnica sile v začetnem nedeformiranem stanju geometrije potekala vzporedno z ravnino lepljenega stika in razpolavljala adhezivni sloj. Oba izračuna sta bila geometrijsko nelinearna, kar pomeni, da so bile ravnotežne enačbe nastavljene za deformirano stanje geometrije. V izračunih so bili upoštevani tudi spreminjajoči se kontakti med strižnim orodjem in preizkušancem, tako da lahko trdimo, da sta bila nelinearna tudi v smislu kontaktov. Za kontakte smo definirali, da se preko njih lahko prenašajo le tlačne in trenjske sile. V prvem izračunu je bila upoštevana popolnoma ujemajoča geometrija preizkušanca in strižnega orodja, opravljen pa je bil za ponazoritev preizkusa, pri katerem se rotacija preizkušanca zgodi samo zaradi deformiranja strižnega orodja. V drugem izračunu je bilo upoštevano dejansko stanje geometrije preizkušanca in strižnega orodja oz. razmik med njima. Primerjava med rezultati opravljenih izračunov nam razkriva vpliv rotacije preizkušanca v strižnem orodju na izmerjene vrednosti strižne trdnosti. Za koeficient trenja med lesom in jeklom smo uporabili vrednost 0,25 (v skladu s standardom [56]), za koeficient trenja med steklom in jeklom pa koeficient trenja 0,5 (v skladu s [115]).



Slika 17: Model s končnimi elementi

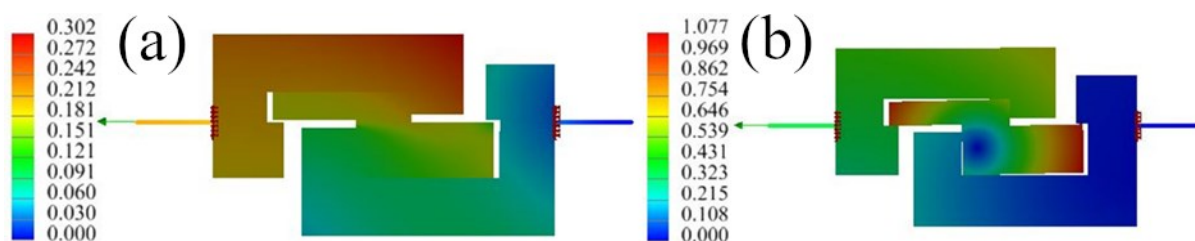
Leseni in stekleni vzorec ter adhezivni sloj smo modelirali s štiristranskimi paraboličnimi ploskovnimi končnimi elementi. Za velikost mreže smo izbrali vrednost 0,5 mm, le blizu lepljenega stika smo za velikost mreže nastavili vrednost 0,25 mm. Velikost končnih elementov v adhezivnem sloju je bila 0,25 mm, kar je rezultiralo v štirih končnih elementih skozi debelino adheziva. Strižno orodje smo modelirali s tristranskimi in štiristranskimi paraboličnimi ploskovnimi končnimi elementi z velikostjo 2,5 mm, na področjih kontaktov pa smo velikost nastavili na 0,5 mm. Palice strižnega orodja smo modelirali z linijskimi upogibnimi končnimi elementi. Za leseni vzorec smo definirali ortotropni linearno elastični materialni zakon, materialne lastnosti (tabela 12) pa smo povzeli po [91]. Gre za povprečne vrednosti za več vrst smrekovega lesa, vendar se podatki dobro ujemajo z gostoto in modulom elastičnosti, ki smo ju določili z našimi lesenimi vzorci. Za adheziv smo definirali izotropni linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost iz tabele 3, za Poissonov količnik pa vrednost iz tabele 4. Za stekleni vzorec smo definirali izotropni

linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 70 GPa, za Poissonov količnik pa 0,23 (v skladu s predstandardom [21]). Tudi za strižno orodje smo definirali izotropni linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 200 GPa, za Poissonov količnik pa 0,3. Privzete materialne karakteristike ustrezajo okoljskim pogojem s temperaturo 20 °C in vlažnostjo lesa 10 %. Za silo smo nastavili vrednost 5000 N, tako da je povprečna strižna napetost v lepljenem stiku znašala 10 MPa in se je približno ujemala z maksimalno povprečno strižno trdnostjo doseženo s strižnimi preizkusi. V smislu načina aplikacije sile sta bila oba izračuna tipa strig-tlak. V izračunih ni bila upoštevana degradacija lepljenega stika, kot so jo upoštevali npr. v [116]. Za rezultate izračunov zato velja, da držijo le do določene velikosti sile in so le približna ocena razporeditve napetosti v lepljenem stiku. V smislu materialne nelinearnosti je model za les najmanj natančen, saj je tlačna porušitev lesa (predvsem pravokotno na vlakna) duktilen pojav. Po drugi strani pa je dejansko obnašanje stekla, jekla in epoksidnega adheziva (pri temperaturi 20°C) in obremenitvah pri naših preizkusih linearno elastično.

Tabela 12: Modul elastičnosti v longitudinalni smeri ( $E_L$ ), modul elastičnosti v tangencialni smeri ( $E_T$ ), strižni modul za tangencialno in longitudinalno smer ( $G_{LT}$ ) ter Poissonov količnik za tangencialno in longitudinalno smer ( $\nu_{LT}$ ) za modeliranje lesenih vzorcev

$E_L$ [MPa]	$E_T$ [MPa]	$G_{LT}$ [MPa]	$\nu_{LT}$
10991	435	693	0,48

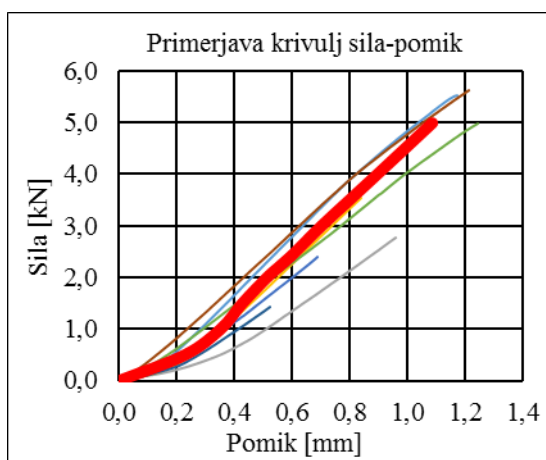
Neskalirani rezultati vektorja pomikov za oba izračuna so podani na sliki 18. Pomiki izračuna brez upoštevanja tolerance (slika 18 a) so opazno manjši od pomikov izračuna z upoštevanjem tolerance (slika 18 b). Večina pomikov na sliki 18 b je posledica rotacije preizkušanca, opazimo tudi, da je točka, okoli katere je preizkušanec rotiral, v bližini kontakta med strižnim orodjem in lesnim vzorcem ter v bližini lepljenega stika. Slika 18 a razkriva, da je bil največji pomik pri izračunu brez upoštevanja tolerance izračunan za strižno orodje, za izračun z upoštevanjem tolerance pa je bil največji pomik izračunan za skrajno točko steklenega in lesenega vzorca (slika 18 b). Pri obeh izračunih je maksimalni pomik kombinacija pomikov vzporedno in pravokotno na silo trgalnega stroja.



Slika 18: Prikaz rezultatov vektorja pomikov (v mm) za izračun brez upoštevanja tolerance (a) in za izračun z upoštevanjem tolerance (b)

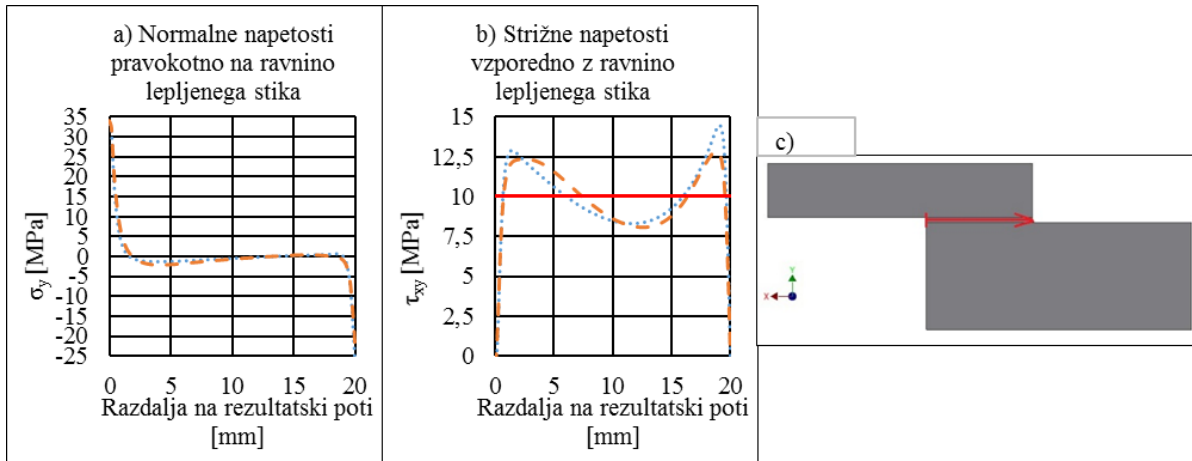
Poudarjamo, da so bile eksperimentalne krivulje sile v odvisnosti od pomika določene z upoštevanjem pomika, izmerjenega na glavi trgalnega stroja. Pomiki, izmerjeni na glavi trgalnega stroja, tako obsegajo tudi zdrs palic strižnega orodja in podajnost trgalnega stroja. Da bi lahko primerjali eksperimentalne in izračunane krivulje sila-pomik, smo opravili še natezne preizkuse s palico strižnega orodja. Palico smo obremenili s silo 5000 N. Od izmerjene podajnosti smo odšteli izračunano podajnost jeklene palice (v smislu zaporedno vezanih

vzmeti). Osna podajnost jeklenih palic s premerom 10 mm in dolžino 30 mm med prijemališči trgalnega stroja je sicer minimalna, večina izmerjenih pomikov je tako rezultat zdrsa v prijemališču trgalnega stroja in deformiranja trgalnega stroja. Dobljena togost (7088,85 N/mm) je bila uporabljena za modificiranje rezultatov izračuna z metodo končnih elementov (z upoštevanjem tolerance). Krivuljo sile v odvisnosti od modificiranih pomikov, izračunanih z metodo končnih elementov ob upoštevanju tolerance, smo vnesli na diagram eksperimentalnih krivulj sila-pomik za okoljske pogoje s temperaturo 20 °C in vlažnostjo lesa 10 % (slika 19). Primerjava krivulj (naklonov) kaže na dobro ujemanje modela s končnimi elementi in eksperimenti. Zelo dobro se ujemajo tudi rezultati za začetno povečevanje naklona krivulje zaradi fiksiranja preizkušanca v strižnem orodju.



Slika 19: Primerjava krivulj sila-pomik, izračunanih z izračunom s končnimi elementi, upoštevajoč toleranco (debela rdeča krivulja), in eksperimentalnimi rezultati (tanke krivulje), za okoljske pogoje s temperaturo 20 °C in vlažnostjo lesa 10 %

Primerjali smo tudi razporeditev napetosti na ravnini vzporedni z lepljenim stikom, ki razpolavlja adhezivni sloj (slika 20 c). Razporeditev strižnih napetosti je razvidna s slike 20 b. Opazimo, da ima razporeditev napetosti pri obeh izračunih na približno enakih mestih ležeča vrha napetosti, so pa napetosti pri izračunu brez upoštevanja tolerance nekoliko večje kot pri izračunu z upoštevanjem tolerance. To je tudi pričakovano, saj je sila trgalnega stroja v primeru brez upoštevanja tolerance, ko preizkušanci ne morejo opazneje rotirati, približno vzporedna z ravnino lepljenega stika. Tudi deviacija razporeditve strižnih napetosti od povprečne strižne napetosti (10 MPa) izračuna z upoštevanjem tolerance je manjša v primerjavi z izračunom brez upoštevanja tolerance.



Slika 20: Rezultati izračunov z metodo končnih elementov za napetosti v adhezivnem sloju: normalne napetosti ( $\sigma_y$ ) pravokotno na ravnino lepljenega stika (a), strižne napetosti ( $\tau_y$ ) vzporedno z ravnino lepljenega stika (b). Črtkana črta predstavlja rezultate izračuna z upoštevanjem tolerance, točkasta črta označuje rezultate izračuna brez upoštevanja tolerance, rdeča črta pa povprečno strižno napetost v lepljenem stiku (10 MPa). Rezultatska pot (c) je vzporedna z ravnino lepljenega stika in poteka skozi sredino debeline adhezivnega sloja v smeri rdeče puščice.

Razporeditvi normalnih napetosti pravokotno na ravnino lepljenega stika sta podani na sliki 20 a, vendar razlike težko opazimo. Ekstremne vrednosti napetosti s pripadajočimi položaji na rezultatski poti (slika 20 c) smo tako zbrali še v tabeli 13, iz katere vidimo, da je izračun z upoštevanjem tolerance rezultiral v večjih nateznih napetostih pravokotno na ravnino lepljenega stika. Glede na velike natezne napetosti v bližini roba lesenega vzorca in majhne natezne trdnosti lesa pravokotno na vlakna, lahko trdimo, da je izračun z metodo končnih elementov potrdil, da do loma lesa pride na robu lesenega vzorca. Primerjava obeh izračunov razkriva, da strižni preizkusi s strižnim orodjem s toleranco rezultirajo v večjih nateznih in manjših strižnih napetostih pravokotno na ravnino lepljenega stika in pravokotno na vlakna lesa, kot če bi se geometrija strižnega orodja popolnoma ujemala z geometrijo preizkušancev.

Tabela 13: Primerjava ekstremnih napetosti obeh izračunov z metodo končnih elementov

	Komponenta napetostnega tenzorja	Maksimalna napetost [MPa]	Razdalja na rezultatski poti [mm]	Minimalna napetost [MPa]	Razdalja na rezultatski poti [mm]
Izračun z upoštevanjem tolerance	$\sigma_y$	34,18	0,00	-22,05	20,00
	$\tau_{xy}$	12,86	18,88		
Izračun brez upoštevanja tolerance	$\sigma_y$	33,20	0,00	-26,60	20,00
	$\tau_{xy}$	14,41	19,13		

## 4.5 Končni komentar strižnih preizkusov lepljenih stikov steklo-les

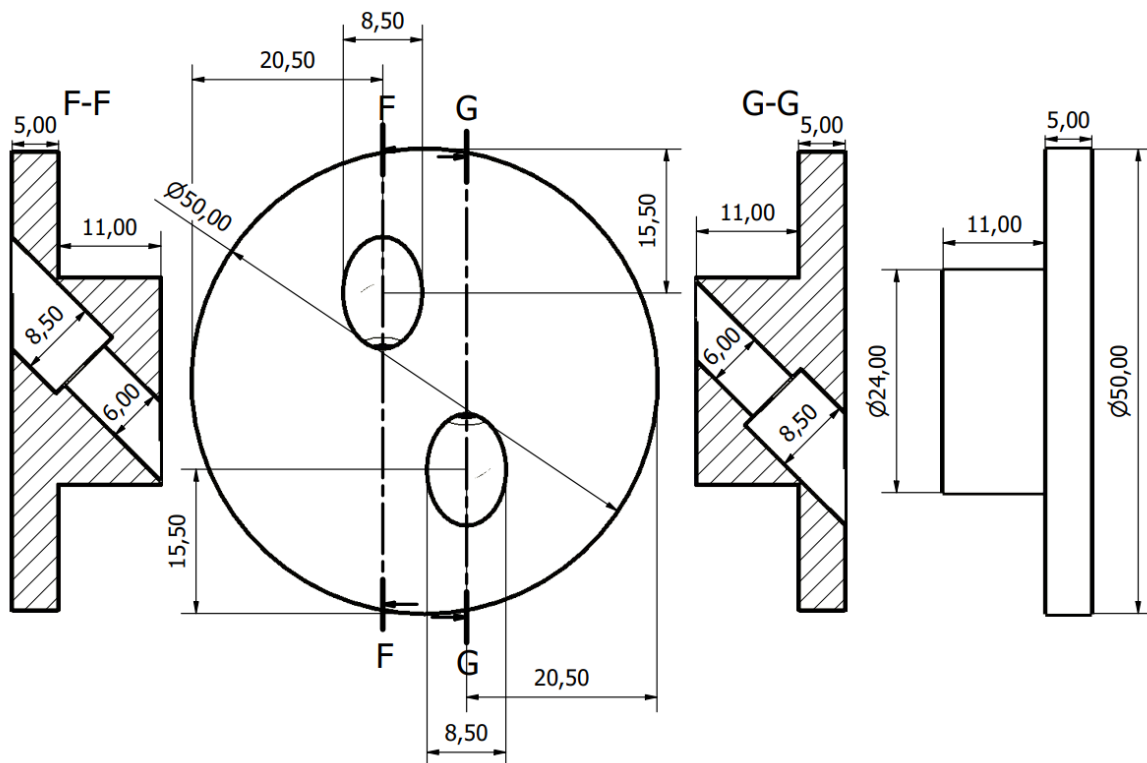
Rezultati strižnih preizkusov so pokazali, da je obnašanje lepljenih stikov steklo-les odvisno od kombinacije temperature in vlažnosti lesa. Ta odvisnost pa ni linearna, v smislu, da najvišja temperatura in največja vlažnost lesa rezultirata v najnižjih strižnih trdnostih, ali obratno, da najnižja temperatura in najmanjša vlažnost lesa rezultirata v najvišjih strižnih trdnostih lepljenega stika. Če upoštevamo, da tipični notranji klimatski pogoji ustrezajo okoljskim

pogojem s temperaturo  $20 \pm 2$  °C in vlažnostjo lesa 10 %, lahko trdimo, da lepljenega stika ni treba posebej dimenzionirati, saj njegovo nosilnost dokažemo že s kontrolo strižne nosilnosti lesa. Več pozornosti je treba nameniti okoljskim pogojem s temperaturo  $-5$  °C in  $50$  °C, saj sta se pri teh pogojih pogosteje pojavljala popustitev adhezije na steklu in kohezivni lom adheziva. Uporabo izbranega adheziva pri temperaturah, višjih od  $40$  °C, odsvetuje že proizvajalec. Pri preizkusih smo opazili, da lahko na temperaturno točko posteklenitve vpliva vlažnost lesa oz. relativna zračna vlažnost okolja. Osnovni namen strižnih preizkusov je bila kontrola primernosti izbranega adheziva za lepljenje steklenih elementov na lesene elemente. Menimo, da rezultati primernost potrjujejo, sploh če upoštevamo, da so imeli preizkušanci zelo majhne lepljene ploskve in bi pri preizkusih z večjimi lepljenimi ploskvami predvidoma dosegli še višje vrednosti strižne trdnosti lepljenih stikov.



## 5 TOČKOVNI STIK STEKLO-LES

V sklopu doktorske disertacije smo razvili nov točkovni stik za pritrdjevanje steklenih elementov na lesene elemente s pomočjo lesnih vijakov. Stik sestoji iz aluminijastega vstavka, ki je z epoksidnim adhezivom prilepljen v izvrtano luknjo v steklu in na zunanjo površino stekla. V aluminijastem vstavku so izvrtane luknje, ki omogočajo privitje lesnih vijakov pod kotom  $45^\circ$  glede na stično ravnino steklenega in lesenega elementa. Aluminijasti vstavek je izdelan iz palic aluminija AA2030-T4. Razred aluminija je bil izbran zaradi dobrih obdelovalnih lastnosti in relativno velike trdnosti. Natančna geometrija je razvidna s slike 21.

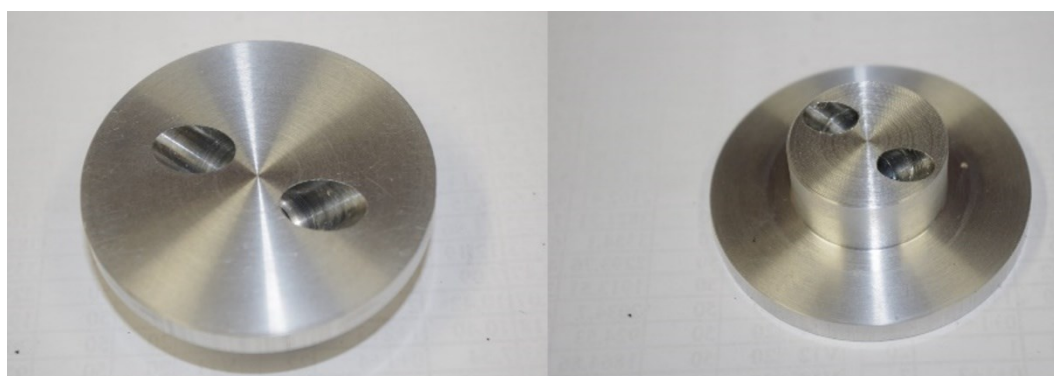


Slika 21: Dimenzije aluminijastega vstavka (v mm)

Izbrali smo lesne vijake proizvajalca SPAX<sup>®</sup> s cilindrično glavo. Premer izbranih vijakov je 6 mm, dolžina 160 mm, dolžina navoja 145 mm, premer glave 8,4 mm in premer jedra 3,9 mm. Vijaki so prevlečeni s posebno protikorozijsko zaščito WIROX<sup>®</sup> A3J, ki po podatkih proizvajalca preprečuje nevarnost kontaktne korozije med vijaki in aluminijastim vstavkom. Za umestitev lesnih vijakov v aluminijasti vstavek smo upoštevali pravila za minimalne razmike med lesnimi vijaki iz Evropskega tehničnega soglasja za navedene lesne vijake [117], ki za minimalni razmik med križajočimi se lesnimi vijaki predpisuje 1,5-kratnik premera vijaka. Izvrtina v aluminijastem vstavku ima dva različna premera. Večji premer ustreza premeru cilindrične glave lesnih vijakov, manjši premer pa premeru lesnih vijakov oz. premeru njihovega navoja. Cilindrična glava je bila izbrana zaradi čim boljšega ujemanja z izvrtino v aluminijastem vstavku oz. za čimbolj togo zvezo. Slednje omogoča, da stik obravnavamo kot zvezo lesenega elementa in debelejšega kovinskega elementa, kot je definirana v standardu [56]. Ožji del aluminijastega vstavka ima premer 24 mm (slika 22), ki



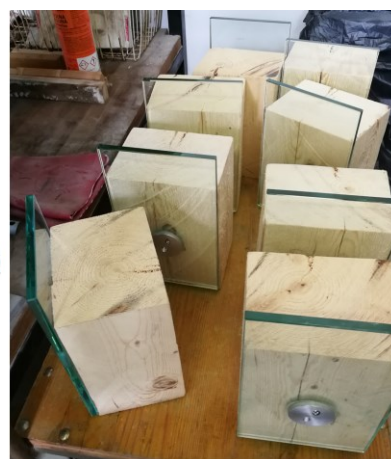
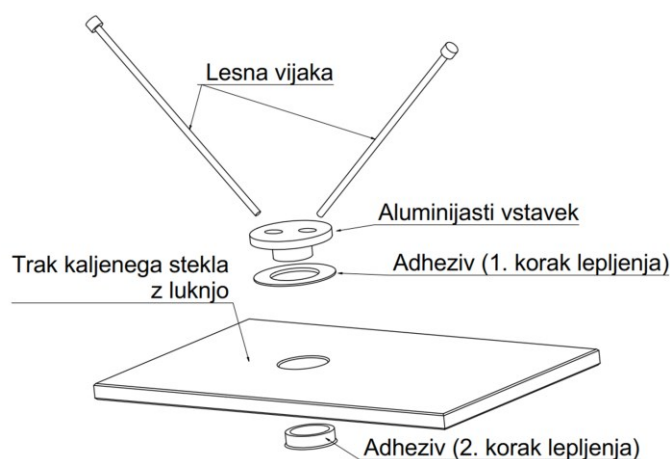
je namenjen za vstavev v luknjo v steklu s premerom 30 mm. Izbrani dimenziji predstavljata kompromis med zahtevami za razporeditev lesnih vijakov, zahtevo po čim manjši koncentraciji napetosti oz. čim večji kontaktni površini, zahtevo po čim manjšem vplivu na videz stropnika oz. čim manjših dimenzijah stika in zahtevo po čim večjem neto prerezu steklenega elementa. Špranja velikosti 3 mm med vstavkom in površino luknje v steklu zagotavlja določeno toleranco, predvsem za lamelirane steklene elemente, v katerih se luknje v zlepljenih steklenih elementih pogosto ne ujemajo popolnoma. Predstavljeni aluminijasti vstavek je namenjen uporabi za steklene elemente do debeline približno 10 mm. Za večje debeline stekla bi bilo treba aluminijasti vstavek nekoliko spremeniti oz. ga prilagoditi lesnim vijakom z manjšim premerom ali pa povečati naklon lesnih vijakov glede na stično ravnino steklenega in lesenega elementa.



Slika 22: Aluminijasti vstavek; levo: pogled z zgornje strani, desno: pogled s spodnje strani

## 5.1 Preiskave točkovnega stika les-steklo

Da bi določili oz. kontrolirali nosilnost in togost novega točkovnega stika steklo-les, smo izvedli preizkuse na sedmih preizkušancih (slika 23 desno). Posamezni preizkušanec je bil sestavljen iz lesenega kvadra, aluminijastega vstavka, lesnih vijakov, epoksidnega adheziva in steklenega traku (slika 23 levo). Stekleni trak smo obremenili z natezno silo, kar je rezultiralo v strižni obremenitvi stika. Pri preiskavah je šlo tudi za kontrolo, ali novi stik omogoča takšno razporeditev kontaktnih napetosti, da se stekleni element ne bo porušil oz. bo prej prišlo do drugačne porušitve.



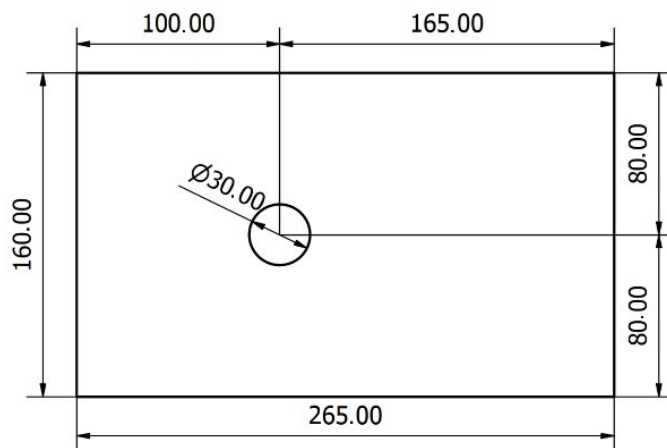
Slika 23: Konfiguracija točkovnega stika steklo-les (levo) in leseno-stekleni preizkušanci (desno)

### 5.1.1 Leseni kvadri

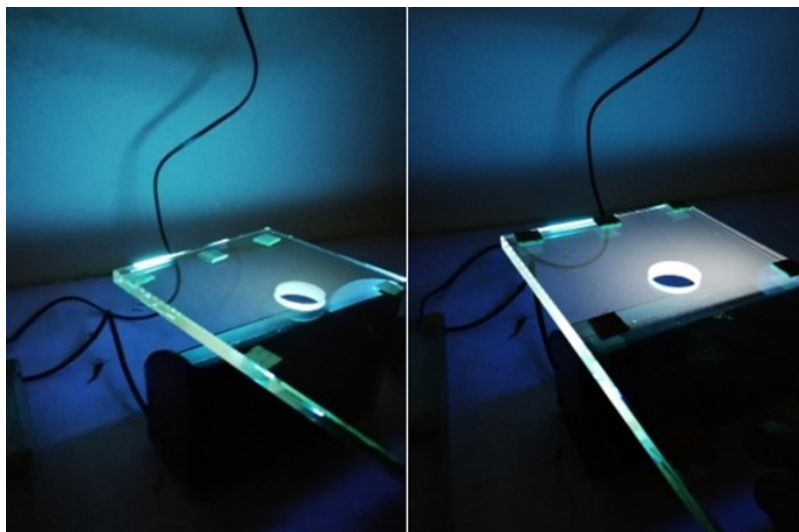
Leseni kvadri so imeli debelino 120 mm, širino 160 mm in dolžino 220 mm, bili pa so iz lesa navadne smreke. Za izdelavo kvadrov smo uporabili les, ki je bil približno 20 let izpostavljen zunanjim temperaturam in zunanji relativni zračni vlažnosti, a je bil zaščiten pred direktnim omočenjem (npr. proti dežju). Ti pogoji so ustrezali razredu uporabnosti 2, kot je definiran v standardu [118]. Kvadri so bili izdelani tako, da je bila stična ploskev vzporedna s tangencialno anatomsko smerjo lesa. Dolžina kvadra je bila vzporedna z vlakni, tako da je obremenitev prav tako delovala vzporedno z vlakni. Površina lesenega kvadra ni bila posebej obdelana (npr. brušena). Povprečna gostota lesenih kvadrov pri 12-odstotni vlažnosti je bila  $528 \text{ kg/m}^3$ , za karakteristično gostoto pa smo definirali vrednost  $504 \text{ kg/m}^3$ . Na majhnih vzorcih s prerezom  $20 \times 25 \text{ mm}$  s tremi različnimi dolžinami (40 mm, 60 mm in 80 mm) smo določili modul elastičnosti v tlaku vzporedno z vlakni. Modul elastičnosti smo določili na intervalu krivulj sile v odvisnosti od pomika med 4000 N in 5000 N, pomike smo merili na glavi trgalnega stroja. Postopek je enak kot v poglavju 4.1.1, kjer je tudi opisan. Modul elastičnosti v tlaku je bil tako enak 7,0 GPa, kar je nizka vrednost za smrekov les. V [107] je pojasnjeno, da večja vlažnost lesa negativno vpliva na modul elastičnosti. Podobne vrednosti modula elastičnosti so našli tudi v [119], in sicer z analizo resonančnih frekvenc lesa.

### 5.1.2 Stekljeni trakovi

Za steklene trakove smo uporabili kaljeno steklo, kar je pri točkovnih stikih v steklu zaradi koncentracij napetosti tudi običajno. Debelina steklenega traku je bila 10 mm, širina 160 mm in dolžina 265 mm (slika 24). Površine na robovih stekla so bile polirane, robovi pa so imeli posnetje v velikosti 1 mm. Da bi se izognili morebitnemu negativnemu vplivu ostankov kositra (zaradi procesa izdelave stekla), smo z ultravijolično svetlobo določili zračno in kositrovo stran steklenega traku. Postopek je predstavljen v poglavju 4.1.2. Na sliki 25 je prikazana razlika, kadar z ultravijolično svetlobo osvetlimo zračno ali kositrovo stran stekla (slednja ob tem oddaja belo svetlobo).



Slika 24: Dimenzije steklenega traku debeline 10 mm (vse dimenzije v mm)



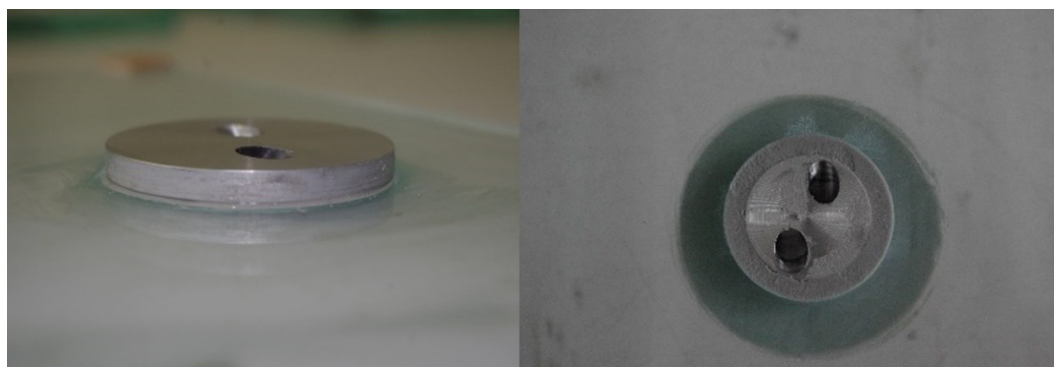
Slika 25: Primerjava osvetljevanja zračne (levo) in kositrove strani (desno) steklenega traku z ultravijolično svetlobo

### 5.1.3 Epoksidni adheziv

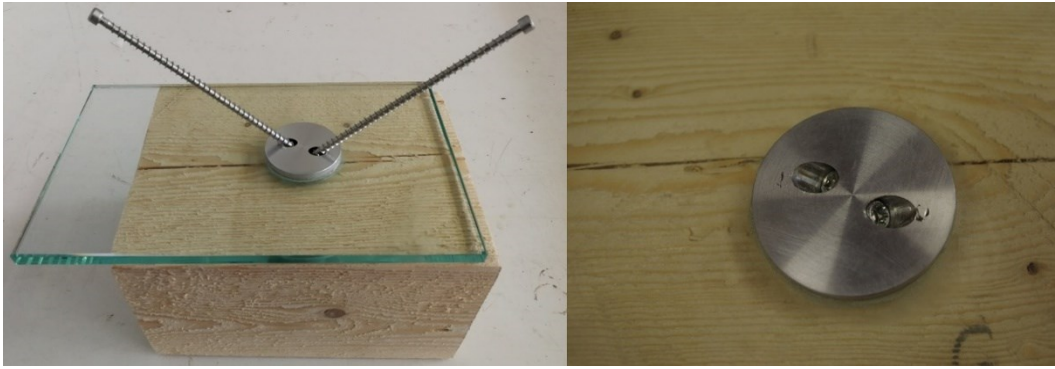
Tudi za točkovni stik smo se odločili uporabiti epoksidni adheziv Adesilex PG1, ki je podrobneje predstavljen v poglavju 4.1.3. Tukaj dodajamo podatek, da je glede na literaturo primeren tudi za lepljenje aluminijastih elementov [120].

### 5.1.4 Priprava preizkušancev

Pred lepljenjem smo aluminijaste vstavke in stekleni trak očistili z acetonom. Najprej smo adheziv nanесли na spodnjo stran aluminijastega vstavka (slika 26 levo in slika 23 levo, 1. korak), tega pa smo potem potisnili v luknjo v steklu. Ko je bil adheziv dovolj trd, smo z adhezivom zapolnili še špranjo med aluminijastim vstavkom in površino luknje v steklenem traku (slika 26 desno, slika 23 levo, 2. korak). Po sedmih dneh, ko je adheziv zadostno vezal, smo steklene trakove z lesnimi vijaki privili na lesene kvadre (slika 27).



Slika 26: Aluminijasti vstavek, prilepljen na luknjo oz. v luknjo v steklenem traku (levo: pogled od zgoraj, desno: pogled od spodaj)

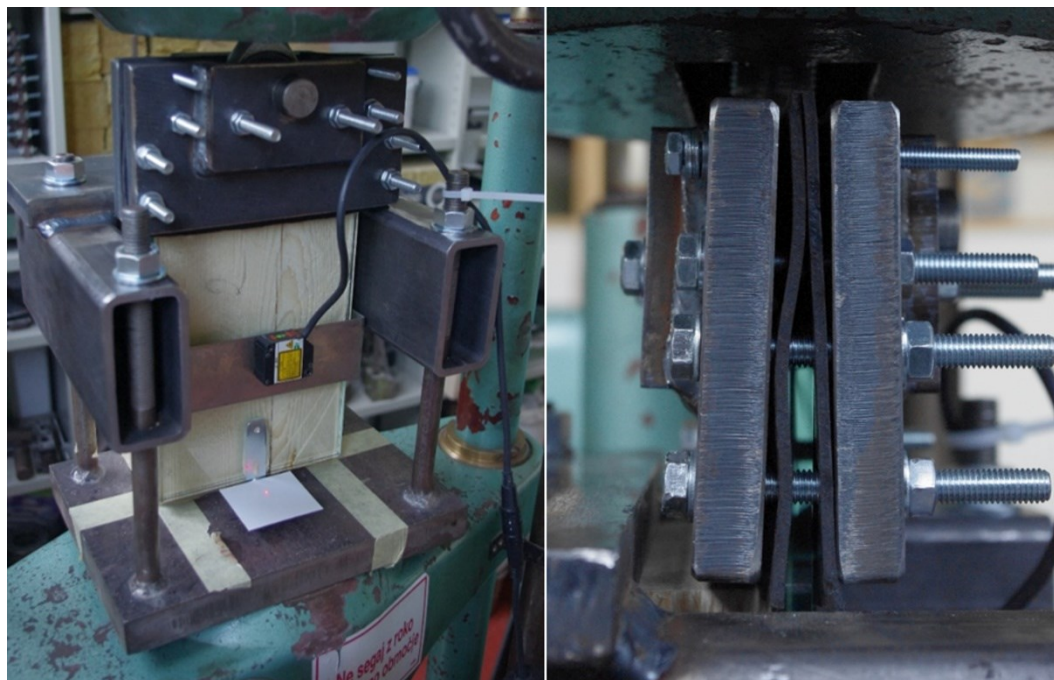


Slika 27: Preizkušaneč pred (levo) in po (desno) privitju lesnih vijakov

### 5.1.5 Priprava za strižne preizkuse točkovnega stika in procedura preizkusov

Priprava za strižne preizkuse je obsegala različne jeklene dele, s katerimi je bilo sploh mogoče izvesti strižne preizkuse točkovnega stika steklo-les na dostopnem trgalnem stroju (slika 28). Za vnos natezne sile trgalnega stroja v stekleni trak smo uporabili jeklene plošče ter med nje in stekleni trak vstavljene 1 mm debele plasti iz stiren-butadienske gume (SBR guma). To gumo smo izbrali, ker ob stiku s steklom izkazuje velik koeficient trenja, glede na [51] približno 0,45. Jeklene plošče smo s pomočjo prednapetja več vijakov premera 8 mm in razreda 8.8 stisnili skupaj. Tako smo lahko silo trgalnega stroja s trenjem prenesli na stekleni trak. Jeklene plošče so bile členkasto povezane z induktivnim merilnikom sile, ta pa je bil spet členkasto povezan z glavo trgalnega stroja. Merilnik sile je bil nameščen v glavi trgalnega stroja, tako da na sliki 28 ni viden. Leseni kvader smo fiksirali z jekleno ploščo in votlimi jeklenimi profili, ki smo jih privili na navojne palice. Položaj preizkušancev glede na trgalni stroj je bil takšen, da je sila trgalnega stroja delovala v stični ravnini steklenega traku in lesenega kvadra. Pred preizkusi smo predpostavili, da bo modul pomika približno 10000 N/mm, želeli pa smo doseči naraščanje pomika s hitrostjo 0,02 mm/s. Uporabljeni trgalni stroj omogoča samo definiranje hitrosti naraščanja sile, tako da smo za slednjo definirali vrednost 200 N/s. S pomočjo laserskega merilnika pomikov, smo merili dejanske pomike med steklenim trakom in lesenim kvadrom.





Slika 28: Priprava za strižne preizkuse točkovnega stika steklo-les (levo) in stiskanje steklenega traku za vnos sile trgalnega stroja s trenjem

### 5.1.6 Nosilnost, krivulje sile v odvisnosti od pomika in modul pomika

Strižne preizkuse smo opravili na sedmih preizkušancih. Preizkušanca TG1 in TG2 sta bila preizkušena dvakrat. Pri prvem preizkusu smo jih obremenjevali približno do sile 12 kN, nato smo jih popolnoma razbremenili. Pri drugem preizkusu smo jih obremenjevali do porušitve. S tem smo dobili vpogled v obnašanje stika pri večkratnih velikih obremenitvah. Rezultate preizkušanca TG-1 pri prvem preizkusu smo izgubili zaradi napake pri shranjevanju podatkov.

Rezultati nosilnosti točkovnih stikov preizkušancev in pripadajočih pomikov so zbrani v tabeli 14. Pri obravnavi nosilnosti stikov smo rezultate za preizkušanec TG2-1 izpustili, saj pri tem preizkusu ni prišlo do porušitve. Povprečna strižna nosilnost stikov oz. maksimalna dosežena sila ( $F_{\max}$ ) je bila 13,31 kN. Rezultati za nosilnost so izkazovali majhne variacije (koeficient variacije je bil 0,07). Povprečni pomik ( $u_{F_{\max}}$ ), pripadajoč maksimalni sili, je znašal 1,69 mm. Tudi rezultati za pomike so izkazovali majhne variacije (koeficient variacije je bil 0,18). Kljub majhnemu številu preizkušancev so se rezultati med posameznimi preizkušanci dobro ujemali.

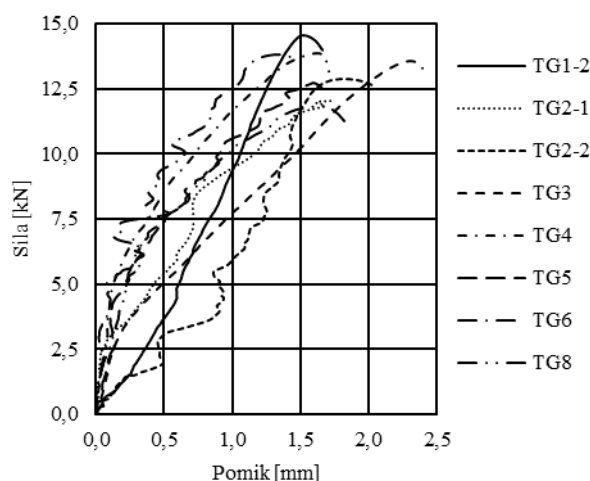
Tabela 14: Rezultati nosilnosti preizkušenih stikov s pripadajočimi pomiki

Preizkušanec	TG1-2	TG2-2	TG3	TG4	TG5	TG6	TG8	Povprečje	Standardni odmik	Koeficient variacije [%]
$F_{\max}$ [kN]	14,53	12,86	13,58	13,85	12,74	13,80	11,83	13,31	0,90	0,07
$u_{F_{\max}}$ [mm]	1,53	1,82	2,30	1,63	1,59	1,33	1,65	1,69	0,31	0,18

Krivulje sil v odvisnosti od pomikov strižnih preizkusov so podane na sliki 29. TG1-2 in TG2-2 označujeta druga oz. ponovna preizkusa preizkušancev TG1 in TG2. Na nekaterih krivuljah (npr. za preizkušanec TG6) opazimo padce pomikov kljub naraščanju sile. To je najverjetneje posledica zdrsov steklenega traku v pripravi za stiskanje oz. za vnos sile trgalnega stroja s

trenjem (slika 28 desno). Izmerjeni pomiki so bili namreč enaki absolutni vrednosti spremembe razdalje med steklenim trakom in lesenim kvadrom, zaradi načina merjenja pa se je razdalja med steklenim trakom in lesenim kvadrom pri premikanju steklenega traku v smeri sile trgalnega stroja zmanjševala (slika 28 levo). Zdrs steklenega traku v pripravi za vnos sile trenja torej povzroči povečanje razdalje med merilnima točkama na steklenem traku in lesenem kvadru, kar pa pomeni zmanjšanje absolutne vrednosti spremembe razdalje med steklenim trakom in lesenim kvadrom. Drugi možen razlog je rotacija steklenega traku okoli horizontalne osi, ki je vzporedna ravnini stične površine med steklenim trakom in lesenim kvadrom.

Krivulje preizkusov TG3-TG8 in krivuljo prvega preizkusa preizkušanca TG2 (TG2-1) lahko opišemo kot bilinearno, saj je prvi del krivulj izkazoval večji naklon oz. večjo togost kot drugi del krivulj. Potem ko smo dosegli maksimalne sile oz. je prišlo do porušitve stika, smo preizkuse prekinili. Krivulje drugih oz. ponovljenih preizkusov (TG1-2 in TG2-2) izkazujejo približno linearno obnašanje (če izvzamemo prej omenjene zdrse steklenega traku v pripravi za vnos sile trgalnega stroja v stekleni trak s trenjem). Zanimivo je obnašanje krivulj preizkušanca TG2 (TG2-1 in TG2-2). Opazimo lahko, da sta se krivulji prekrizali blizu končne točke krivulje TG2-1, kar pomeni da prvotni preizkus ni negativno vplival na nosilnost stika, ampak samo na začetno togost oz. začetni modul pomika. Razlog za porušitve vseh stikov je bilo pretrganje lesnega vijaka, tako da so tudi končne oblike vseh krivulj oz. oblike krivulj pri maksimalnih silah podobne in so posledica nekolikšnega tečenja lesnih vijakov pred pretrganjem.



Slika 29: Krivulje sil v odvisnosti od pomikov strižnih preizkusov

Za določitev modula pomikov smo uporabili standard [121], v katerem je naveden naslednji izraz za ovrednotenje modula pomikov ( $K_{ser}$ ):

$$K_{ser} = \frac{0,4 \cdot F_{max.mean} - 0,1 \cdot F_{max.mean}}{v_{0,4} - v_{0,1}}, \quad (3)$$

kjer je  $F_{max.mean}$  povprečna maksimalna sila vseh preizkušancev (13,31 kN),  $v_{0,4}$  in  $v_{0,1}$  pa sta pomika, pripadajoča vrednostim sil  $0,4 \cdot F_{max.mean}$  in  $0,1 \cdot F_{max.mean}$ . Pomiki  $v_{0,4}$  in  $v_{0,1}$  in ovrednoteni moduli pomikov ( $K_{ser}$ ) za posamezne preizkušance so podani v tabeli 15.

Povprečni modul pomikov je bil enak 20,48 kN/mm, koeficient variacij modulov pomika pa je bil v primerjavi z rezultati nosilnosti zelo velik (0,54). Slednje je posledica dejstva, da je bila nosilnost vedno omejena z nosilnostjo vijakov, ki so iz jekla. Jeklo je v primerjavi z lesom homogen material, ki v splošnem izkazuje majhne variacije različnih mehanskih lastnosti pri npr. enakem trdnostnem razredu.

Tabela 15: Ovrednotenje modula pomikov

	TG2-1	TG3	TG4	TG5	TG6	TG8			
$v_{0,1}$ [mm]	0,02	0,08	0,03	0,06	0,03	0,02			
$v_{0,4}$ [mm]	0,48	0,55	0,15	0,25	0,15	0,24	Povprečje	Standardni odmik	Koeficient variacije[.]
$K_{ser}$ $\left[\frac{\text{kN}}{\text{mm}}\right]$	8,66	8,35	33,13	21,52	33,03	18,18	20,48	11,05	0,54

### 5.1.7 Oblike porušitev

Vsi preizkušanci so se porušili na enak način, in sicer zaradi pretrganja lesnega vijaka, v bližini stične ploskve med steklenim trakom in lesenim kvadrom, ki je bil obremenjen s strižno in natezno silo. Na sliki 30 levo je prikazan presek preizkušanca po preizkusu. Opazimo lahko pretrgani vijak, ki je bil obremenjen s strižno in natezno silo, in deformirani vijak, ki je bil obremenjen samo s strižno silo. Na sliki 30 desno je viden tudi pretrgani del vijaka oz. odtrgana glava strižno in natezno obremenjenega lesnega vijaka. Nosilnost stika bi lahko povečali, če bi uporabili lesne vijake, ki imajo blizu glave polno steblo oz. steblo brez navoja. Omenjeni učinek je bil prikazan v [48], kjer so se sicer ukvarjali s povezovanjem jeklenih elementov z lesenimi elementi s pomočjo lesnih vijakov in kjer so ugotovili, da uporaba lesnih vijakov s polnim stebлом blizu glav vijakov rezultira v do 8 % večji nosilnosti vijajčnih zvez in v prestavitvi mesta pretrga vijaka globlje v leseni element.

Lesni vijak, ki je bil obremenjen le s strižno silo, je bil po preizkusu le nekoliko ukrivljen in smo ga lahko po preizkusu enostavno odvili iz lesenega kvadra. Na steklenem traku, adhezivu in aluminijastem vstavku po preizkusu s prostim očesom nismo opazili nobenih pomembnih poškodb, tako da bi steklene trakove praktično lahko uporabili še za nadaljnje preizkuse. Opazili smo le nekaj sledi delovanja navoja lesnih vijakov na površini lukenj v aluminijastem vstavku, čemur bi se ponovno lahko izognili z uporabo lesnih vijakov s polnim stebлом blizu glave vijakov.



Slika 30: Presek preizkušanca po preizkusu (levo) in pretrgani del strižno in natezno obremenjenega lesnega vijaka (desno)

Dejstvo, da so se vsi preizkušanci oz. stiki vseh preizkušancev porušili s pretrgom strižno in natezno obremenjenega vijaka, medtem ko je bil strižno obremenjeni vijak le nekoliko deformiran, lahko razumemo kot posebno lastnost novega stika, ki bi lahko bila pomembna za kompozitne konstrukcije, pri katerih steklo deluje kot ojačitev. Pri teh konstrukcijah namreč želimo, da po poružitvi ostanejo na svojem mestu oz. da ne odpadejo in tako morebiti povzročijo poškodbe uporabnikov stavb. Če torej pride do poružitve strižno in natezno obremenjenega vijaka, bo strižno obremenjeni vijak vseeno zadržal stekleni element (če je uporabljeno lamelirano steklo), sila pa se v stekleni element ne bo več prenašala, saj ima novi stik s samo strižno obremenjenim vijakom dosti manjšo togost oz. izkazuje dosti manjši modul pomika.

### 5.1.8 Analitični izračun modula pomikov in nosilnosti novega točkovnega stika

Analitični izračun je bil namenjen samo za določitev modula pomikov in nosilnosti novega točkovnega stika oz. nosilnosti vijake zveze novega točkovnega stika. Konfiguracija lesnih vijakov znotraj točkovnega stika rezultira v specifični obremenitvi vijakov v stiku. Tako je en vijak obremenjen s strižno in natezno obremenitvijo (slika 31 desno), drugi vijak pa samo s strižno obremenitvijo (slika 31 levo). Razlog za to, da je en vijak obremenjen samo s strižno obremenitvijo (slika 31 levo), je manjkajoča osna zveza med stebлом oz. navojem vijaka in notranjo površino luknje v aluminijastem vstavku. Pri strižno in natezno obremenjenem vijaku pa za osno zvezo poskrbi stik glave vijaka z aluminijastim vstavkom. Pri lesenih zvezah s poševno nameščenimi lesnimi vijaki, ki so obremenjene tako, da v lesnih vijakih prihaja do strižne in tlačne obremenitve (zagotovljen je prenos osnih sil iz lesnih vijakov na lesene elemente), je bilo dokazano, da se začnejo leseni elementi med seboj razpirati. To pomeni, da med lesenimi elementi ni tlačnih stikov in posledično tudi ni trenja med lesenimi elementi. Opisano obnašanje je opisano v [47]. V našem primeru (slika 31 levo), ko enega vijaka zaradi manjkajoče osne zveze ni mogoče osno obremeniti, pa se vzpostavi drugačno ravnotežje sil. Če opazujemo samo strižno obremenjeni lesni vijak (slika 31 levo), se med lesenim kvadrom in steklenim trakom zaradi manjkajoče osne zveze (med lesnim vijakom in aluminijastim vstavkom) razvijejo kontaktne (tlačne) sile ( $F_{\text{cont}}$ ) in posledično tudi sile trenja ( $F_{\text{cont}} \cdot \mu_{\text{fr}}$ ). Za

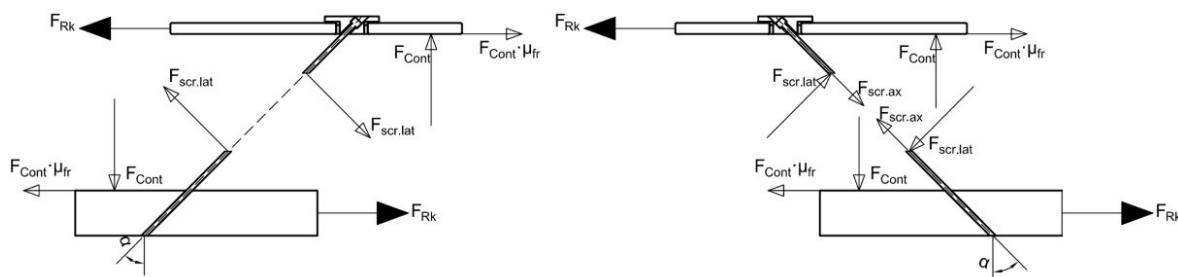


koeficient trenja med steklom in lesom smo prevzeli vrednost 0,15 [122]. Ravnotežna enačba za ravnotežje v vertikalni smeri ( $\sum F_v=0$ ) za diagram sil na sliki 31 levo se glasi:

$$\sum F_v=0: F_{scr.lat} \cdot \sin \alpha - F_{cont} = 0 \quad (4)$$

kjer je  $F_{scr.lat}$  strižna nosilnost lesnega vijaka oz. vijачne zveze. Za ravnotežje v horizontalni smeri ( $\sum F_h=0$ ) pa se ravnotežna enačba glasi:

$$\sum F_h = 0: F_{Rk} = F_{scr.lat} \cdot \cos \alpha + F_{cont} \cdot \mu_{fr} = 0 \quad (5)$$



Slika 31: Diagrama sil prostega telesa: strižno obremenjeni vijak (levo) in strižno-natezno obremenjeni vijak (desno)

Ob vstavitvi izraza za  $F_{cont}$  iz enačbe (4) v enačbo (5) dobimo izraz za nosilnost vijачne zveze s strižno obremenjenim vijakom:

$$F_{Rk} = F_{scr.lat} \cdot \cos \alpha \cdot (1 + \tan \alpha \cdot \mu_{fr}) \quad (6)$$

kjer je  $\alpha$  kot med osjo vijaka in vertikalno ravnino. Z vstavitvijo izraza  $F_{scr.lat} = \Delta_{scr.lat} \cdot K_{scr.lat}$ , kjer je  $\Delta_{scr.lat}$  pomik vijaka pravokotno na svojo os,  $K_{scr.lat}$  pa modul pomika vijaka (pravokotno na svojo os), v enačbo (6) in ob upoštevanju, da je pomik v ravnini stika ( $\Delta$ ) enak  $\Delta = \Delta_{scr.lat} \cdot \cos \alpha$ , dobimo izraz za izračun modula pomikov za vijачno zvezo s strižno obremenjenim vijakom ( $K_{slip.s}$ ):

$$K_{slip.s} = \frac{F_{Rk}}{\Delta_{scr.lat} \cdot \cos \alpha} = K_{scr.lat} \cdot \cos^2 \alpha \cdot (1 + \tan \alpha \cdot \mu_{fr}) \quad (7)$$

Izraz za nosilnost vijачne zveze s strižno in natezno obremenjenim vijakom (slika 31 levo) smo povzeli po [47]. V smislu vzporedno vezanih vzmeti sta nosilnost ( $F_{Rk.con}$ ) in modul pomika ( $K_{slip.con}$ ) vijачne zveze z strižno-natezno obremenjenim vijakom in strižno obremenjenim vijakom enaka vsoti rezultatov obeh vijakov:

$$F_{Rk.con} = F_{scr.ax} \cdot \cos \alpha \cdot (\tan \alpha + \mu_{fr}) + 2 \cdot F_{scr.lat} \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

$$K_{slip.con} = 2 \cdot K_{scr.lat} \cdot \cos^2 \alpha + K_{scr.ax} \cdot \left( \sin^2 \alpha + \frac{\mu_{fr} \cdot \sin^2 \alpha}{2} \right) \quad (9)$$

kjer je  $F_{scr.ax}$  osna nosilnost lesnega vijaka,  $K_{scr.ax}$  pa osni modul pomika vijaka.

Izraze za modul pomika pravokotno na os lesenih vijakov ( $K_{scr.lat}$ ) in izraze za izračun strižne nosilnosti vijakov v vijčnih zvezah jeklo-les ( $F_{scr.lat}$ ) smo prevzeli iz standarda [56]. Upoštevali smo samo oblike porušitve c, d in e, ki so tipične za zveze z debelimi jeklenimi

elementi. Izrazi, ki smo jih zaradi nagnjenosti vijakov in zanemarjanja različnih varnostnih faktorjev za jeklene in lesene konstrukcije nekoliko modificirali, se glasijo:

$$K_{scr.lat} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d_{scr}}{23} \quad (10)$$

$$F_{scr.lat.c} = d_{scr.ef} \cdot f_{h.k} \cdot l_{pen.ef} \quad (11)$$

$$F_{scr.lat.d} = d_{scr.ef} \cdot f_{h.k} \cdot l_{pen.ef} \cdot \left( \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y.k}}{l_{pen.ef}^2 \cdot d_{scr.ef} \cdot f_{h.k}}} - 1 \right) \quad (12)$$

$$F_{scr.lat.e} = 2 \cdot \sqrt{M_{y.k} \cdot d_{scr.ef} \cdot f_{h.k}} \quad (13)$$

kjer je  $\rho_m$  povprečna gostota lesenih elementov,  $d_{scr.ef}$  efektivni premer lesenih vijakov (enak 1,1-kratniku premera jedra lesnega vijaka),  $f_{h.k}$  bočna nosilnost vijaka,  $l_{pen.ef}$  efektivna sidrna dolžina lesnega vijaka v lesenem elementu in  $M_{y.k}$  upogibni moment tečenja lesnega vijaka.

Izraze za bočno nosilnost vijaka  $f_{h.k}$ , upogibni moment tečenja vijaka  $M_{y.k}$ , osno nosilnost vijaka  $F_{scr.ax}$  in osni modul pomika vijaka  $K_{scr.ax}$  smo povzeli iz Evropskega tehničnega soglasja vijaka [117]:

$$f_{h.k} = \frac{(0,082 \cdot \rho_k \cdot d_{scr}^{0,3})}{2,5 \cdot \cos^2(\alpha_{gr}) + \sin^2(\alpha_{gr})} \quad (14)$$

$$M_{y.k} = 0,15 \cdot 600 \text{ MPa} \cdot d_{scr}^{2,6} \quad (15)$$

$$F_{scr.ax} = \frac{n_{ef} 12 \text{ MPa} \cdot d_{scr} \cdot l_{pen.ef}}{1,2 \cdot \cos^2(\alpha_{gr}) + \sin^2(\alpha_{gr})} \cdot \left( \frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} \quad (16)$$

$$K_{scr.ax} = 25 \cdot d_{scr} \cdot l_{pen.ef} \quad (17)$$

kjer je  $\rho_k$  karakteristična gostota lesenih elementov,  $d_{scr}$  premer lesnega vijaka,  $\alpha_{gr}$  kot med osjo lesnega vijaka in smerjo lesenih vlaken,  $n_{ef}$  efektivno število osno obremenjenih vijakov (v našem primeru enako 1,0, saj je bil samo en vijak osno obremenjen). Vmesni in končni rezultati analitičnega izračuna nosilnosti ( $F_{Rk.con}$ ) in modula pomika ( $K_{slip.con}$ ) novega točkovnega stika so prikazani v tabeli 16. Za izračun smo uporabili naslednje vrednosti: premer lesnega vijaka  $d_{scr} = 6$  mm, premer jedra lesnega vijaka  $d_{scr.core} = 3,9$  mm, povprečna gostota lesa ( $\rho_m = 528$  kg/m<sup>3</sup>) in karakteristična gostota lesa  $\rho_k = 504$  kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 16: Rezultati analitičnega izračuna nosilnosti ( $F_{Rk.con}$ ) in modula pomika ( $K_{slip.con}$ ) novega točkovnega stika

$K_{scr.ax}$	21,750 kN/mm
$K_{scr.lat}$	6,312 kN/mm
$K_{slip.s}$	3,629 kN/mm
$K_{slip.con}$	18,818 kN/mm
$f_{h.k}$	13,933 MPa
$M_{y.k}$	9493,706 N·mm
$F_{scr.ax}$	12,806 kN
$l_{pen.ef}$	145 mm
$F_{scr.lat.c}$	8667,094 N
$F_{scr.lat.d}$	3682,275 N
$F_{scr.lat.e}$	1506,609 N
$F_{Rk.con}$	12544 N

### 5.1.9 Numerični izračun modula pomika in nosilnosti novega točkovnega stika ter ocena napetosti v steklenem traku

Za numerični izračun modula pomika in nosilnosti novega točkovnega stika, ter oceno napetosti v steklenem traku po metodi končnih elementov smo uporabili programsko opremo Autodesk® Inventor® Nastran 2020 [114]. Opravili smo linearni izračun, kar pomeni, da so bile ravnotežne enačbe nastavljene za primer začetne nedeformirane geometrije. Razmerje med silo in rezultirajočim pomikom steklenega traku lahko upoštevamo kot modul pomika za mejno stanje uporabnosti. Za mejno stanje uporabnosti je namreč predpostavljeno, da je obnašanje lesenih konstrukcij še linearno. Izračun je bil uporabljen tudi za oceno napetosti v steklenem traku. Kontakte vijak-les, adheziv-steklo in adheziv-aluminij smo definirali kot zlepljene. Kontakta med plaščem cilindra glave lesnih vijakov in notranjima površinama lukenj za vijake v aluminijastem vstavku smo definirali kot drsne ploskve (preprečen pomik med kontaktnima površinama v smeri pravokotno na površini). Za kontakt med spodnjo ploskvijo glave strižno in natezno obremenjenega vijaka, ki je bila v bistvu kolobar, in ploskvijo na meji med luknjo za steblo in glavo vijaka (prav tako kolobar) smo definirali, da se lahko prenašajo samo tlačne sile. Tudi za kontakt med aluminijastim vstavkom in lesnim kvadrom smo definirali, da se lahko prenašajo samo tlačne sile. Na kontaktu med steklenim trakom in lesnim kvadrom so se poleg tlačnih sil lahko prenašale še sile trenja. Za koeficient trenja smo enako kot pri analitičnem izračunu definirali vrednost 0,15 (povzeto po [122]).

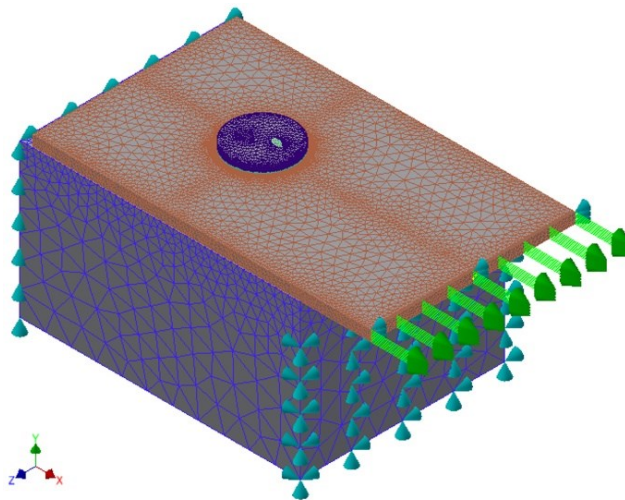
Za vse dele v modelu za numerični izračun smo uporabili parabolične tetrahedralne končne elemente. Za leseni vzorec smo definirali ortotropni linearno elastični materialni zakon, materialne lastnosti pa smo povzeli po [91]. Modul elastičnosti in strižni modul smo sicer pomnožili z razmerjem modula elastičnosti, ki smo ga določili s tlačnimi preizkusi majhnih lesenih vzorcev, in modula elastičnost vzporedno z vlakni iz [91]. To razmerje je znašalo 0,64

$\left(\frac{7034 \text{ MPa}}{10991 \text{ MPa}}\right)$ . Poissonovih količnikov nismo modificirali. Uporabljene modificirane materialne lastnosti za les so podane v tabeli 17.

Tabela 17: Modificirane materialne lastnosti za leseni kvader (osnovne vrednosti povzete po [91])

$E_L$ [MPa]	$E_R$ [MPa]	$E_T$ [MPa]	$G_{LR}$ [MPa]	$G_{LT}$ [MPa]	$G_{RT}$ [MPa]	$\nu_{LR}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{RT}$
7034	458	278	436	444	31	0,42	0,48	0,5

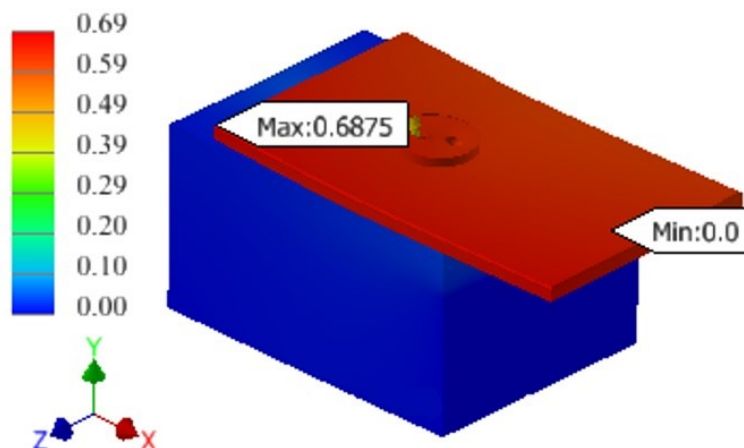
Za stekleni trak smo definirali izotropni linearno elastičen materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 70 GPa, za Poissonov količnik pa 0,23 (v skladu s predstandardom [21]). Tudi za lesne vijake smo definirali izotropni linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 210 GPa, za Poissonov količnik pa 0,3. Prav tako smo za aluminijasti vstavek definirali izotropni linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 70 GPa, za Poissonov količnik pa 0,3. Za mreže končnih elementov smo na stičnih ploskvah med steklenim trakom, adhezivom, aluminijastim vstavkom in lesnimi vijaki definirali velikost 0,4 mm. Velikost mreže steklenega traku smo nastavili na 10 mm, z izjemo področij posnetih robov in simetral steklenega traku (za natančnejši izračun napetosti), kjer smo definirali velikost 2,5 mm. Za prijemališče obtežbe oz. sile smo definirali čelno ploskev steklenega traku (zelene puščice na sliki 32), smer sile je sovpadala z globalno smerjo X. Na površinah lesenega kvadra, ki so bile pri preizkusu tudi fiksirane, smo preprečili pomike v vseh smereh (modri stožci na sliki 32). Dodatno smo preprečili tudi pomike v globalni smeri Z na ploskvi, kjer je delovala obtežba oz. sila. Tako smo preprečili rotacije okoli osi, pravokotne na stično ravnino steklenega traku in lesenega kvadra. Velikost sile smo nastavili na 13310 N, kar se je ujemalo s povprečno nosilnostjo točkovnih stikov, določeno s strižnimi preizkusi.



Slika 32: Model s končnimi elementi (modri stožci označujejo podpore, zelene puščice pa obtežbo oz. sile)

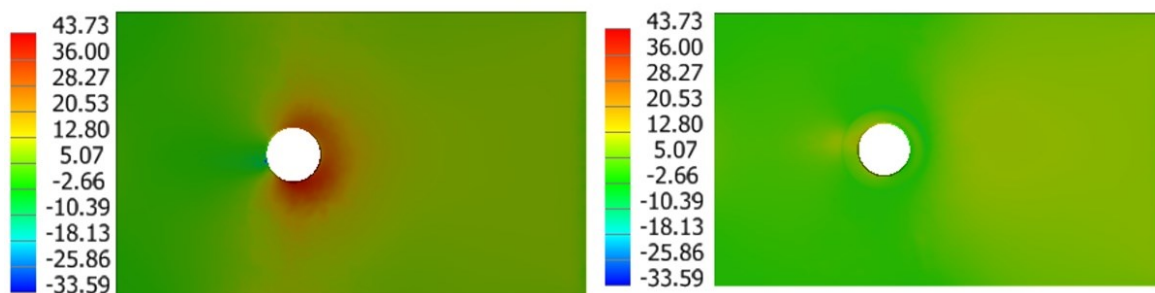
Rezultati vektorja pomikov so razvidni s slike 33. Pomiki na steklenem traku spominjajo na premik tega telesa, kar se ujema z eksperimentalnimi rezultati, po katerih so se preizkušanci najbolj deformirali na področju stika lesnih vijakov z aluminijastim vstavkom. Določeni pomiki so se zgodili tudi v smeri pravokotno na ravnino stika, kar se ujema z obnašanjem, ki smo ga predvideli z analitičnim izračunom. Do določenih rotacij steklenega traku, okoli osi,

pravokotne na ravnino stične površine med steklenim trakom in lesnim kvadrom, je prišlo zaradi nesimetrične konfiguracije lesnih vijakov v stiku. Za izračun modula pomika na podlagi numeričnega izračuna smo upoštevali relativni pomik med steklenim trakom in lesnim kvadrom, ki je znašal 0,63 mm. Izračunani modul pomika je tako znašal 21127 N/mm (izračunan kot razmerje med aplicirano silo in rezultirajočim pomikom).



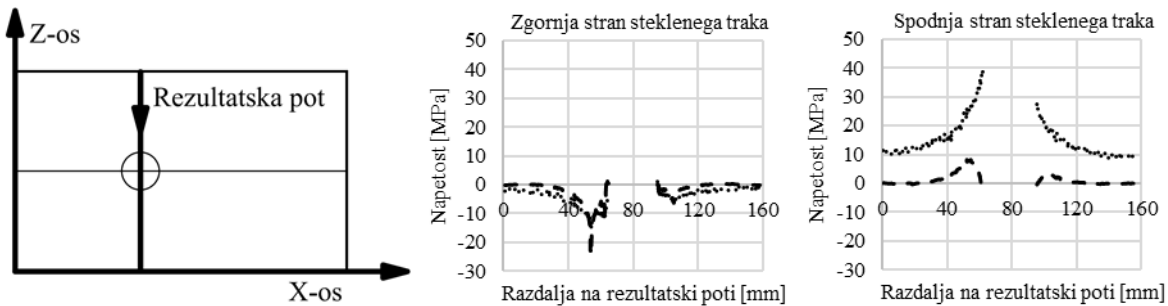
Slika 33: Prikaz rezultatov vektorja pomikov (v mm)

Linearno elastični izračun z metodo končnih elementov je primeren za izračun modula pomikov za mejno stanje uporabnosti, pri katerem pričakujemo elastično obnašanje konstrukcij, vendar ta izračun verjetno precenjuje dejanske napetosti v steklenem traku. Razlog je v določenih plastičnih deformacijah lesnih vijakov in aluminijastega vstavka, ki v realnosti omogočajo nekoliko enakomernjšo porazdelitev kontaktnih napetosti. Vseeno pa lahko rezultate razumemo kot zgornje meje za napetosti. Maksimalne glavne napetosti na površini steklenega traku so prikazane na sliki 34. Vidimo, da so se največje maksimalne glavne napetosti pojavile na spodnji strani steklenega traku oz. na strani steklenega traku, ki je v stiku z lesnim kvadrom. Maksimalna glavna napetost v steklenem traku je sicer znašala 43,73 MPa. Upoštevajoč standard [20] in predstandard [21], ki za karakteristično upogibno trdnost kaljenega stekla podajata vrednost 120 MPa, vidimo, da obravnavani stik pri uporabljenem obtežnem primeru, glede na izkoriščenost steklenega traku, izkazuje znatno varnost  $\left(\frac{120 \text{ MPa}}{43,73 \text{ MPa}}=2,74\right)$ .

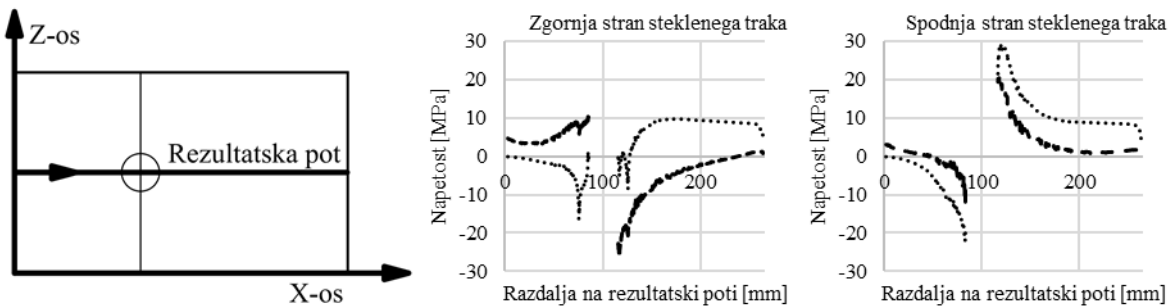


Slika 34: Maksimalne glavne napetosti v steklenem traku, izračunane po metodi končnih elementov (levo: spodnja stran steklenega traku, desno: zgornja stran steklenega traku)

Izpis normalnih napetosti v smeri osi X in Z na sliki 35 (rezultatska pot, vzporedna z osjo Z in potekajoča skozi središče luknje v steklenem traku) in sliki 36 (rezultatska pot, vzporedna z osjo X in potekajoča skozi središče luknje v steklenem traku) prikazuje podrobnejšo razporeditev napetosti v steklenem traku.



Slika 35: Numerični izračun napetosti v steklenem traku: izpis napetosti iz rezultatske poti, vzporedne z osjo Z in potekajoče skozi središče luknje v steklenem traku: črtna linija – normalne napetosti v smeri osi Z, pikčasta linija – normalne napetosti v smeri osi X



Slika 36: Numerični izračun napetosti v steklenem traku: izpis napetosti iz rezultatske poti, vzporedne z osjo X in potekajoče skozi središče luknje v steklenem traku: črtna linija – normalne napetosti v smeri osi Z, pikčasta linija – normalne napetosti v smeri osi X

Rezultati za normalne napetosti v smeri X na slikah 35 in 36 se ujemajo z ugotovitvijo, da so maksimalne glavne napetosti na spodnji strani steklenega traku večje od maksimalnih glavnih napetosti na zgornji strani steklenega traku. Rezultati za normalne napetosti v smeri X na sliki 35 kažejo tudi, da je zgornja stran steklenega traku blizu luknje v steklu pod tlačnimi napetostmi, spodnja stran pa pod nateznimi napetostmi. Našteto je posledica načina vzpostavitve ravnotežja sil v smeri pravokotno na ravnino stika, ki se vzpostavi s kontaktnimi silami med steklenim trakom in lesenim kvadrom ter s silami v lesnih vijakih. Omenjena dvojica sil pa rezultira v upogibu steklenega traku (razvidno tudi s slike 33). Tudi rezultati na sliki 36 kažejo, da se na področju med luknjo v steklenem traku in mestom delovanja obtežbe blizu točkovnega stika normalne napetosti v smeri X začnejo spreminjati: napetosti na spodnji strani steklenega traku se povečajo, na zgornji strani traku pa se zmanjšajo). Na neobremenjenem koncu steklenega traku so normalne napetosti v smeri X pričakovano negativne (področje je pod tlačnimi napetostmi). Rezultati za normalne napetosti v smeri Z na slikah 35 in 36 razkrivajo, da prihaja do zvijanja steklenega traku tudi v smeri prečno na delovanje sile, kar je posledica nesimetrične konfiguracije lesenih vijakov.

### 5.1.10 Primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih rezultatov za nosilnost in modul pomika novega točkovnega stika

Primerjava eksperimentalno in analitično določene nosilnosti točkovnega stika je razvidna iz tabele 18. Odstopanje analitično določene nosilnosti stika od eksperimentalno določene nosilnosti ( $\Delta_{lbc}$ ) je razmeroma majhno (5,76 %). To pomeni, da so razviti analitični izrazi primerni za oceno nosilnosti novega točkovnega stika. Izračuna nosilnosti stika na podlagi metode končnih elementov nismo izvedli, saj modeliranje sidrne in bočne nosilnosti lesnih vijakov v lesenih elementih presega okvir te doktorske disertacije, tudi za analitični izračun pa so bile za omenjene nosilnosti uporabljeni empirični izrazi, ki so bili razviti na osnovi obsežnih eksperimentalnih preiskav.

Tabela 18: Primerjava eksperimentalno in analitično določene nosilnosti točkovnega stika

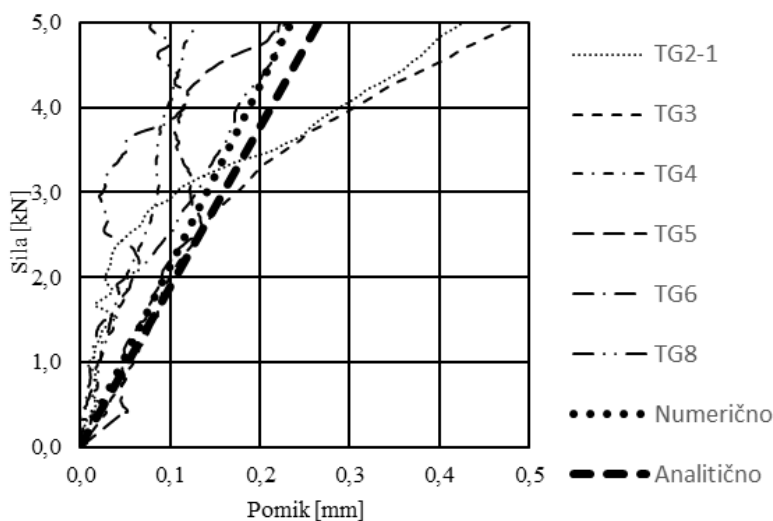
	Eksperimentalni rezultati	Analitični rezultati
$F_{max}$ [kN]	13,31	12,54
$\Delta_{lbc}$ [%]		-5,76

Primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih rezultatov za modul pomika novega točkovnega stika je razvidna iz tabele 19. Odstopanje analitično določenega modula pomika stika od eksperimentalno določenega modula pomika stika ( $\Delta_{sm}$ ) je razmeroma majhno (-8,12 %). To pomeni, da so razviti analitični izrazi primerni za oceno modula pomika novega točkovnega stika. Medtem ko smo z analitičnim izračunom določili nekoliko manjši modul pomika (v primerjavi z eksperimentalno določenim modulom pomika), pa smo numerično izračunali nekoliko večji modul pomika (odstopanje je bilo 3,68 %). Tudi prikazan numerični izračun je torej primeren za oceno modula pomika novega točkovnega stika.

Tabela 19: Primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih rezultatov za modul pomika novega točkovnega stika

	Eksperimentalni rezultati	Analitični rezultati	Numerični rezultati
$K_{ser}$ [kN/mm]	20,48	18,82	21,23
$\Delta_{sm}$ [%]		-8,12	3,68

Na sliki 37 je podana primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih krivulj sil v odvisnosti od pomikov na intervalu za določitev modulov pomika  $[0,1 \cdot F_{max.mean}, 0,4 \cdot F_{max.mean}]$ . Ponovno je razvidno dobro ujemanje rezultatov za modul pomika novega točkovnega stika.



Slika 37: Primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih krivulj sil v odvisnosti od pomikov za sile manjše od  $0,4 \cdot F_{\max.\text{mean}}$  (približno 5 kN)

### 5.1.11 Končni komentar preiskav točkovnega stika steklo-les

Na podlagi strižnih preizkusov novega točkovnega stika trdimo, da je ta stik primeren za zvezo med steklenimi in lesenimi elementi. Dosegli smo namreč relativno velike nosilnosti, ki so bile omeje z nosilnostjo vijakov, steklenih trakov pa nismo porušili pri nobenem od sedmih preizkušancev. Koeficienta variacij nosilnosti točkovnega stika in k nosilnosti (maksimalni sili) pripadajočih pomikov sta bila razmeroma majhna (0,07 in 0,18). Dosti večji je sicer bil koeficient variacij modula pomika (0,54). Ob upoštevanju, da so bili vsi preizkušanci iz lesa istega debla (kot so npr. tudi leseni stropniki) in primerjavi eksperimentalno določenega modula pomika z analitično in numerično izračunanim modulom pomika pa ponovno trdimo, da so izvedeni izračuni primerni za oceno dejanskega modula pomika.

## 5.2 Ocena faktorjev koncentracij napetosti v steklenem traku

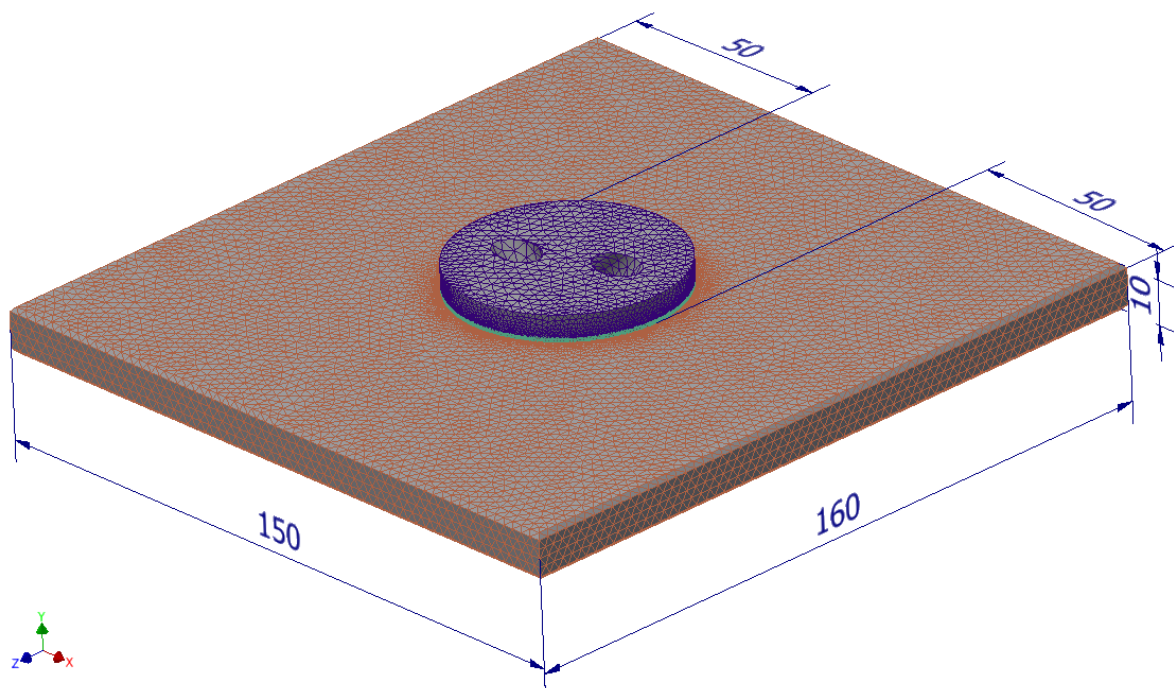
Po našem najboljšem vedenju trenutno stanje tehnike ne obsega analitičnih izrazov, s katerimi bi lahko z zadostno natančnostjo ocenili napetosti v steklenem traku v okolici novega točkovnega stika steklo-les ob delovanju različnih obtežb. To je tudi razlog, da smo se odločili izračunati oz. oceniti faktorje koncentracij napetosti s pomočjo numeričnih izračunov po metodi končnih elementov. V sklopu priprave doktorske disertacije smo se ukvarjali z uporabo stekla kot elementa za ojačitev lesenih stropnikov tako, da bi stekleni trak namestili na spodnjo stran stropnikov. Ob običajni obtežbi stropa v smeri sile težnosti to pomeni, da bo stekleni trak pod nateznimi in upogibnimi napetostmi (če zagotovimo sovprežno delovanje steklenega traku z lesenim stropnikom). Če novi točkovni stik uporabimo za pritrditev steklenega traku na leseni stropnik, se skozi ta točkovni stik v stekleni trak prenašajo tudi strižne sile oz. sile veznih sredstev, ki so odraz sovprežnega delovanja obeh elementov. Obremenitev poljubnega segmenta steklenega traku pritrjenega na leseni stropnik (obremenjen z obtežbo v smeri sile težnosti) s točkovnim stikom, lahko po načelu superpozicije razdelimo na tri obtežne primere:

- obremenitev segmenta steklenega traku z natezno silo (OBT 1),



- obremenitev segmenta steklenega traku z upogibnim momentom (OBT 2),
- obremenitev segmenta steklenega traku z bočnim pritiskom strižne sile oz. sile veznega sredstva v točkovnem stiku oz. aluminijastem vstavku (OBT 3).

Za našete obtežne primere steklenega segmenta smo s programsko opremo Autodesk® Inventor® Nastran 2020 [114] izvedli numerične izračune po metodi končnih elementov. Numerični izračun je bil linearen, kar pomeni, da so bile ravnotežne enačbe nastavljene za primer začetne nedeformirane geometrije. Kontakta adheziv-steklo in adheziv-aluminij smo definirali kot zlepljena. Za vse dele v modelu za numerični izračun (slika 38) smo uporabili parabolične tetrahedralne končne elemente. Širina segmenta je enaka širini steklenega traku, ki smo ga uporabili za ojačitev lesenih stropnikov, dolžina segmenta pa je enaka razmiku med točkovnimi stiki na ojačanem stropniku. Za stekleni trak smo definirali izotropni linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 70 GPa, za Poissonov količnik pa 0,23 (v skladu s predstandardom [21]). Prav tako smo za aluminijasti vstavek definirali izotropni linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 70 GPa, za Poissonov količnik pa 0,3. Osnovno velikost mreže končnih elementov smo nastavili na 2,5 mm (slika 38). Na stičnih ploskvah med steklenim trakom, adhezivom in aluminijastim vstavkom pa smo velikost mreže končnih elementov nastavili na 0,4 mm.



Slika 38: Prikaz velikosti uporabljenih končnih elementov numeričnega izračuna za oceno faktorjev napetosti v steklenem traku in dimenzije modela (dimenzije so v mm)

Pri numeričnem izračunu za obtežni primer OBT 1 smo stekleni segment podprli (slika 39 a):

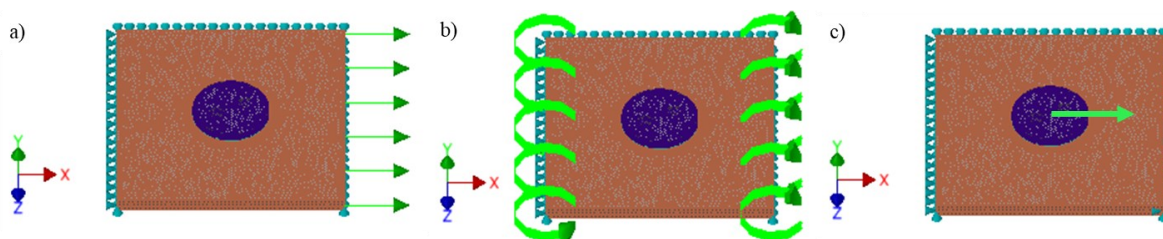
- na levi čelni ploskvi (ravnina YZ), na liniji na polovici debeline steklenega segmenta; preprečili smo pomike v smeri osi X in osi Y;

- na desni čelni ploskvi (ravnina YZ), na liniji na polovici debeline steklenega segmenta; preprečili smo pomike v smeri osi Y;
- na zadnji čelni ploskvi (ravnina XY), na liniji na polovici debeline steklenega segmenta; preprečili smo pomike v smeri osi Z.

Obtežbo pri numeričnem izračunu za obtežni primer OBT 1 (slika 39 a) smo definirali kot silo v smeri osi X, ki je razporejena na liniji na polovici debeline steklenega segmenta na desni čelni ploskvi (ravnina YZ). Velikost sile smo nastavili na 10000 N.

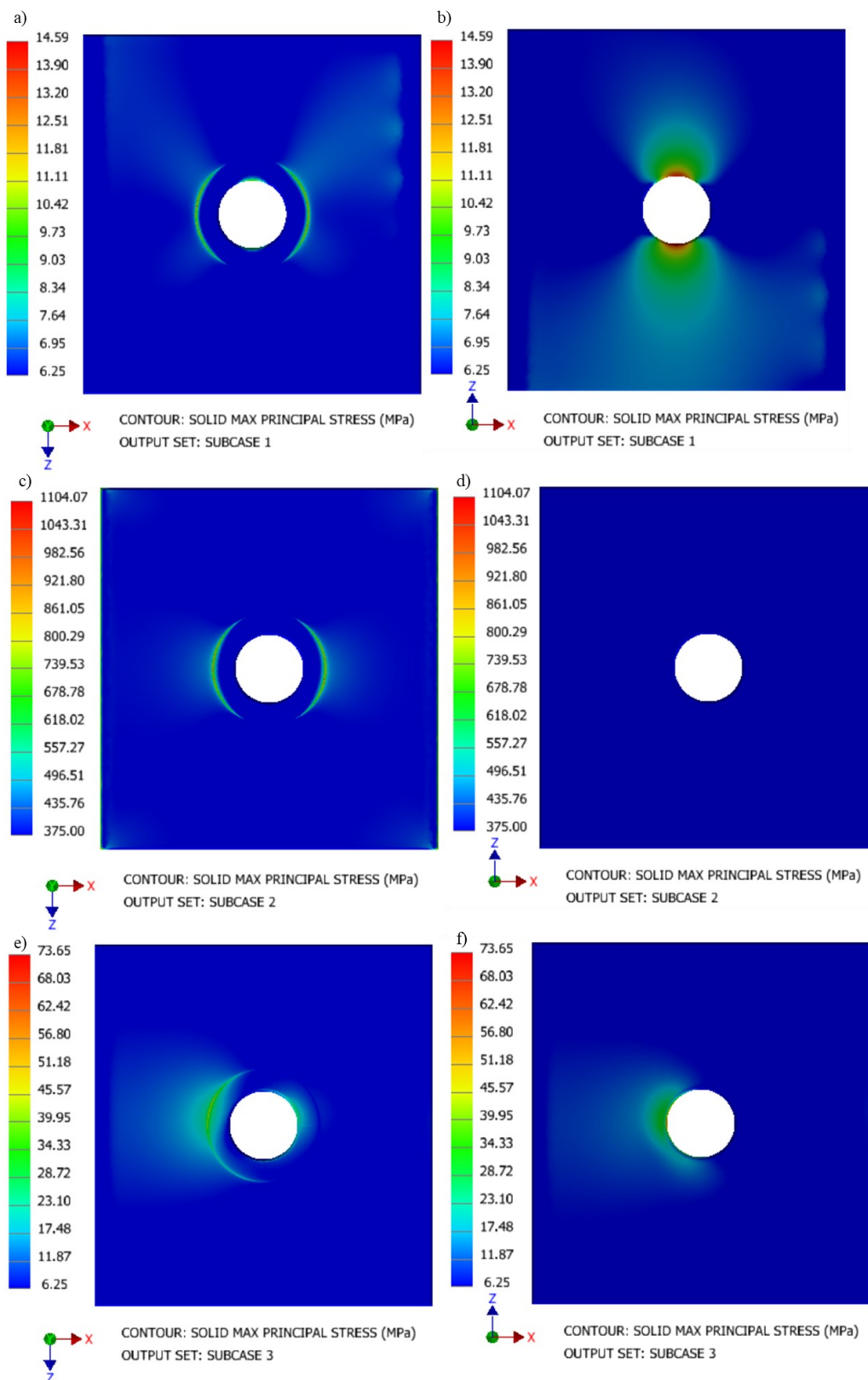
Pri numeričnem izračunu za obtežni primer OBT 2 (slika 39 b) smo uporabili enake pogoje podpor kot pri obtežnem primeru OBT 1. Za obtežbo pri numeričnem izračunu za obtežni primer OBT 2 smo definirali dva upogibna momenta. Prvi je deloval na levi čelni ploskvi steklenega segmenta (ravnina YZ) v smeri osi Z, drugi pa na desni čelni ploskvi steklenega segmenta (ravnina YZ) v nasprotni smeri osi Z. Velikost momentov smo nastavili na 1000000 Nmm. Momente program samodejno razdeli na ekvivalentne sile v vozliščih končnih elementov. Vozlišč prostorskih končnih elementov namreč ni mogoče obremeniti z momenti, saj so prostorske stopnje vozlišč samo pomiki.

Pri numeričnem izračunu za obtežni primer OBT 3 (slika 39 c) smo dodatno k pogojem podpor obtežnega primera OBT 1 na desni čelni ploskvi (ravnina YZ) na liniji na polovici debeline steklenega segmenta preprečili še pomike v smeri osi X. Obtežbo pri numeričnem izračunu za obtežni primer OBT 3 smo definirali kot dve sili v smeri osi X, ki imata prijemališči na središčih krožnih ploskev na spodnji in zgornji strani aluminijastega vstavka. Na zgornji točki smo velikost sile nastavili na 6250 N, na spodnji točki pa na 13750 N. Tako smo dosegli, da rezultantna sila 20000 N glede na ploskev na sredini steklenega segmenta ni delovala ekscentrično.



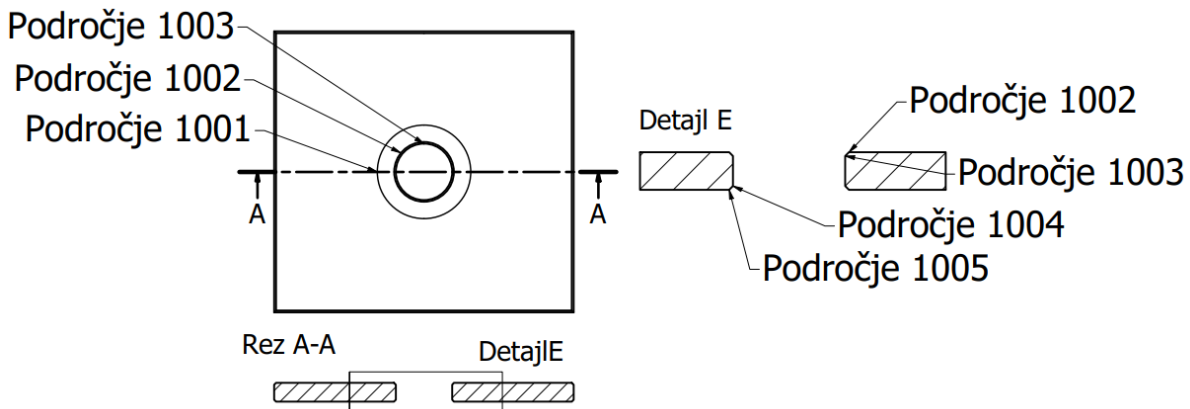
Slika 39: Grafični prikaz obtežnih primerov numeričnega izračuna: a) OBT 1; b) OBT 2; c) OBT 3 (modri stožci označujejo podpore, zelene puščice pa obtežbo oz. sile in momente)

Konstruktivski elementi iz krhkih materialov, kot je steklo, se porušijo ko je presežena natezna trdnost. Za naše numerične izračune smo zato obravnavali rezultate maksimalnih glavnih napetosti v steklenem traku. Grafični prikaz maksimalnih glavnih napetosti v steklenem segmentu za različne obtežne primere je na sliki 40. Spodnja mejna vrednost v legendi je bila napetost, ki bi jo izbrana obremenitev povzročila na bruto prerezu steklenega segmenta (na segmentu brez luknje), zgornja mejna vrednost v legendi pa je bila maksimalna glavna napetost numeričnega izračuna z izbrano obremenitvijo na območju stika.



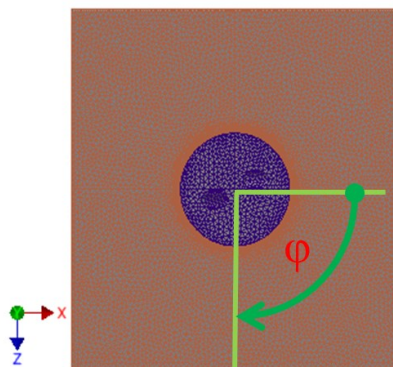
Slika 40: Rezultati izračunov maksimalnih glavnih napetosti v steklenem segmentu: a) OBT 1, zgornja stran steklenega segmenta, b) OBT 1, spodnja stran steklenega segmenta, c) OBT 2, zgornja stran steklenega segmenta, d) OBT 2, spodnja stran steklenega segmenta, e) OBT 3, zgornja stran steklenega segmenta, f) OBT 3, spodnja stran steklenega segmenta

Glede na grafični prikaz rezultatov maksimalnih glavnih napetosti na sliki 40, smo v steklenem segmentu določili pet kritičnih področij oz. območij, na katerih se pojavljajo največje koncentracije maksimalnih glavnih napetosti. Območja so krožnice s središčem na vertikalni liniji, ki poteka skozi središče luknje v steklenem segmentu. Poleg področij v luknji v steklenem traku (področja 1002–1005) smo definirali tudi področje 1001, ki se ujema z robom na površino steklenega segmenta prilepljenega aluminijastega vstavka. Prikaz področij je na sliki 41.

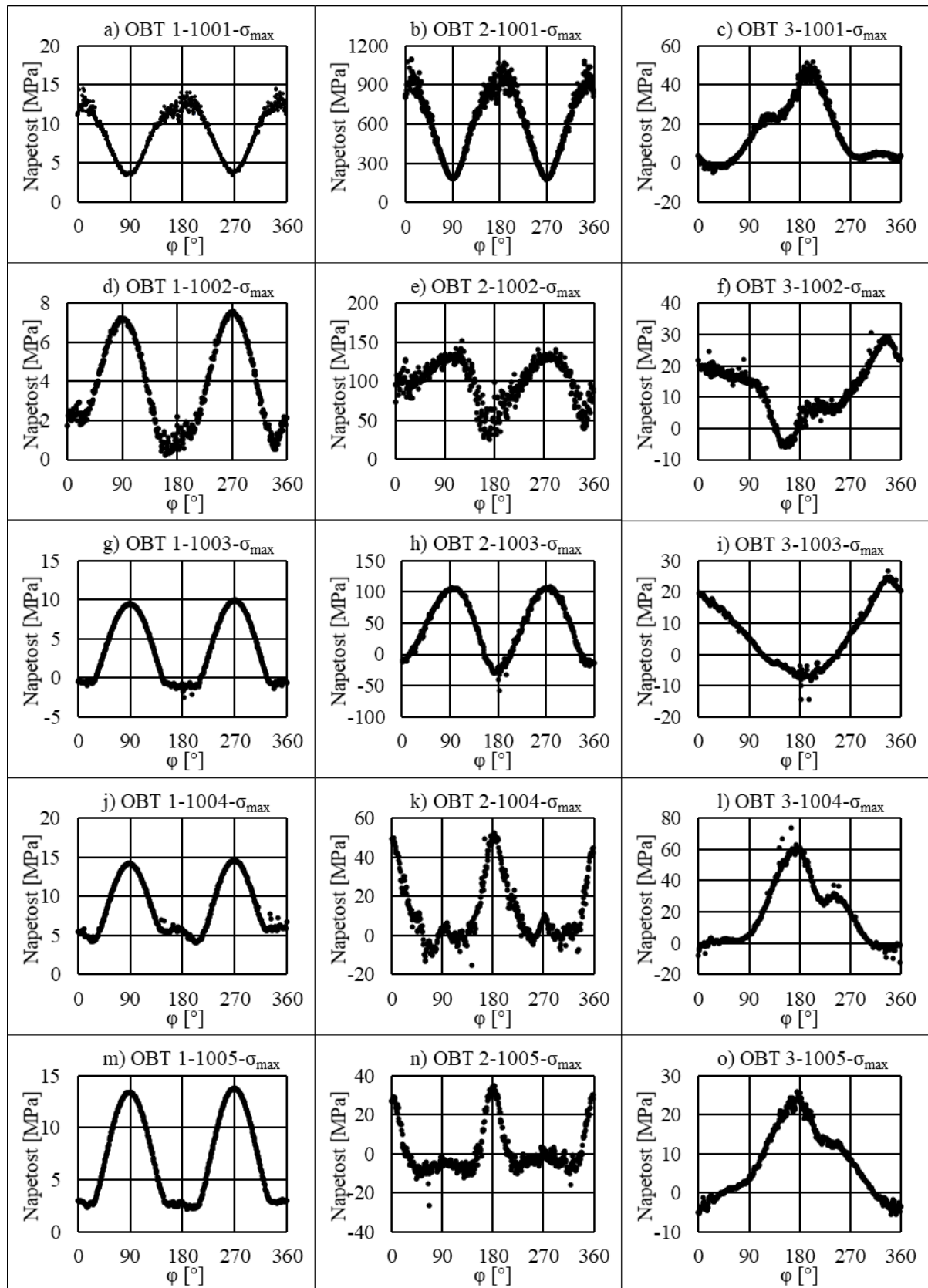


Slika 41: Kritična področja steklenega segmenta

Za definirana območja smo izvedli izpis rezultatov maksimalnih glavnih napetosti. Izhodni vrednosti v odvisnosti od položaja (določenega s kotom  $\varphi$ ) so podane v diagramih na sliki 43. Kot  $\varphi$  ima za različna območja vrh na vertikalni liniji, ki poteka skozi središče luknje v steklenem segmentu. Omejujeta ga fiksni krak, ki je vzporeden z osjo X, in krak v smeri točke izpisa napetosti (glej tudi sliko 42).



Slika 42: Prikaz izhodišča kota  $\varphi$  za določitev položaja točke izpisa napetosti



Slika 43: Izpis maksimalnih glavnih napetosti za različne obtežne primere in na različnih kritičnih področjih

Faktorje napetosti smo izračunali za vsako kritično področje in za vsak obtežni primer (tabela 20).

Za obtežni primer OBT 1 smo faktorje napetosti izračunali tako, da smo največjo napetost na izbranem območju delili z napetostjo, ki bi jo natezna sila 10000 N povzročila na bruto prerezu steklenega segmenta oz. na segmentu brez luknje  $\left(\frac{10000\text{N}}{160\text{mm}\cdot 10\text{mm}}=6,25\text{ MPa}\right)$ .

Za obtežni primer OBT 2 smo faktorje napetosti izračunali tako, da smo največjo napetost na izbranem območju delili z napetostjo, ki bi jo upogibni moment 1000000 Nmm povzročil na bruto prerezu steklenega segmenta oz. na segmentu brez luknje  $\left(\frac{1000000\text{Nmm}}{\frac{160\text{mm}\cdot(10\text{mm})^2}{6}}=375\text{ MPa}\right)$ .

Za obtežni primer OBT 3 smo faktorje napetosti izračunali tako, da smo največjo napetost na izbranem območju delili z napetostjo, ki bi jo rezultantna sila 20000 N povzročila na bruto prerezu steklenega segmenta oz. na segmentu brez luknje  $\left(\frac{20000\text{N}}{160\text{mm}\cdot 10\text{mm}}=12,5\text{ MPa}\right)$ .

Tabela 20: Maksimalne glavne napetosti in faktorji napetosti za posamezno območje in posamezni obtežni primer

Območje	Maksimalne glavne napetosti za posamezen obtežni primer [MPa]			Faktorji napetosti za posamezen obtežni primer [1]		
	OBT 1	OBT 2	OBT 3	OBT 1	OBT 2	OBT 3
1001	14,49	1104,07	51,66	2,32	2,94	4,13
1002	7,59	152,20	30,57	1,21	0,41	2,45
1003	9,99	108,57	26,70	1,60	0,29	2,14
1004	14,59	52,41	73,65	2,33	0,14	5,89
1005	13,78	34,65	25,96	2,20	0,09	2,08

Po načelu superpozicije smo razvili še enačbo za oceno maksimalnih glavnih napetosti v steklenem segmentu na izbranem območju ( $\sigma_{s,\text{max.območje}}$ ) v okolici novega točkovnega stika:

$$\sigma_{s,\text{območje}} = F_{\text{OBT 1, območje}} \cdot \left(\sigma_{s,N} - \frac{\sigma_{s,V}}{2}\right) + F_{\text{OBT 2, območje}} \cdot \sigma_{s,M} + F_{\text{OBT 3, območje}} \cdot \sigma_{s,V} \quad (18)$$

kjer je  $F_{\text{OBT 1, območje}}$  faktor napetosti izbranega območja za obtežni primer 1 (OBT 1),  $F_{\text{OBT 2, območje}}$  faktor napetosti izbranega območja za obtežni primer 2 (OBT 2),  $F_{\text{OBT 3, območje}}$  faktor napetosti izbranega območja za obtežni primer 3 (OBT 3),  $\sigma_{s,N}$  natezna napetost v bruto prerezu steklenega traku,  $\sigma_{s,M}$  pozitivna upogibna napetost v bruto prerezu steklenega traku,  $\sigma_{s,V}$  napetost v bruto prerezu steklenega traku ob obremenitvi z natezno silo v velikosti sile v veznem sredstvu.

Uporabljeni koncept superpozicije obtežnih primerov za določitev napetosti v steklu zaradi uporabe točkovnih stikov so uporabili tudi v [54]. Isti koncept je tudi podlaga za dimenzioniranje steklenih elementov v področjih točkovnih stikov v standardu [20]. V našem primeru smo se sicer odločili za zelo konzervativen pristop, saj seštevamo maksimalne glavne napetosti, ki nimajo nujno enakih smeri, prav tako pa se nujno ne pojavljajo na enakih



položajih. Prikazanih rezultatov nismo preverjali z namenskimi eksperimenti na različnih konfiguracijah točkovnih stikov, lahko pa se sklicujemo na dobro ujemanje eksperimentov in numeričnega izračuna v podpoglavjih 5.1.6, 5.1.9 in 5.1.10. Numerični izračun iz podpoglavja 5.1.9 je namreč bil osnova tudi za numerične izračune faktorjev napetosti. Razviti izraz smo uporabili tudi za analitični izračun nosilnosti lesenih stropnikov, ojačanih s steklenimi trakovi, ob uporabi novega točkovnega stika steklo-les v poglavju 7.

## 6 PREISKAVE KOMPOZITNIH NOSILCEV CLT-LES-STEKLO

### 6.1 Zasnova preizkušanca stropnega elementa

Za preiskave kompozitnih nosilcev CLT-les-steklo smo uporabili stare lesene stropnike iz dvorca na Zgornji Polskavi. V sklopu obsežne rekonstrukcije so bili stari leseni stropi zaradi poškodovanosti odstranjeni in nadomeščeni z armirano-betonskimi stropnimi ploščami, mi pa smo te stare lesene stropnike izkoristili in na njih izvedli upogibne preizkuse. Na lesenih stropnikih so bile praktično po vsej površini vidne sledi delovanja lesnega črva in različne longitudinalne razpoke (glej sliko 44). Take razpoke so značilne za lesene elemente, ki so bili podvrženi spreminjajoči se vlažnosti oz. so nastale zaradi krčenja in/ali nabrekanja lesa. Razpoke niso potekale po celotni širini stropnikov, tako da lahko glede na [123] vpliv na upogibno togost in upogibno trdnost stropnikov izključimo. Uporabljeni leseni stropniki so bili v osnovi različnih dimenzij, z obžaganjem pa smo dosegli, da so imeli približno enotne dimenzije: prečni prerez širine 16 cm in višine 20 cm, dolžina pa 4,7 m (za razpon 4,5 m). Dimenzije so tako ustrezale starim tesarskim pravilom za lesene strope (podanim v [69]). Dimenzije stropnikov so lokalno zaradi poškodb odstopale od nazivnih dimenzij, a je bilo odstopanje majhno, kot je razvidno iz tabele 21: , v kateri so podane povprečne dimenzije stropnikov.

Tabela 21: Povprečne dimenzije prečnih prerezov stropnikov

	Stropnik 1	Stropnik 2	Stropnik 3	Stropnik 4	Stropnik 5	Stropnik 6	Stropnik 7	Stropnik 8
$h_{\text{povp.}}$ [cm]	20,3	20,0	20,4	20,6	20,5	20,5	19,8	20,5
$b_{\text{povp.}}$ [cm]	15,0	15,5	16,3	14,9	16,5	15,5	14,8	14,5



Slika 44: Leseni stropniki z značilnimi sledmi delovanja lesnega črva

Upogibne preizkuse smo opravili na osmih stropnikih z različnimi konfiguracijami ojačitev:

- stropnik št. 1 in stropnik št. 7: na stropnik je privita CLT plošča in prilepljen stekleni



trak (konfiguracija A1); konfiguracija je na sliki 45; potem ko je med upogibnim preizkusom stekleni trak počil (ob tem se je upogibni preizkus samodejno prekinil), je bil preizkus ponovljen še brez stekla (konfiguracija B);

- stropnik št. 2, 3, 5 in 8: na stropnik sta privita CLT plošča in stekleni trak (konfiguracija A2); konfiguracija je na sliki 46; potem ko je med upogibnim preizkusom stekleni trak počil (ob tem se je upogibni preizkus samodejno prekinil), je bil preizkus ponovljen še brez stekla (konfiguracija B);
- stropnik št. 4: preizkušen je bil samo stropnik (konfiguracija C);
- stropnik št. 6: na stropnik je bila privita CLT plošča (konfiguracija B).

Konfiguraciji A1 (stropnik ojačan s CLT ploščo in prilepljenim steklenim trakom) in A2 (stropnik ojačan s CLT ploščo in privitim steklenim trakom) predstavljata noviteti, ki sta glavni predmet te disertacije. Konfiguraciji B (stropnik ojačan samo s CLT ploščo) in C (samo stropnik) pa sta kontrolni konfiguraciji, ki predstavljata trenutno stanje gradbene tehnike.

Debelina CLT plošče je znašala 6 cm, širina pa 90 cm (ustreza medosnemu razmiku starih lesenih stropnikov). Trdnostni razred CLT plošče je bil C24 (tabela 22). Plošča je bila sestavljena iz treh slojev, debelih 2 cm, od katerih sta zunanja sloja oz. njuna vlakna orientirana vzporedno z razponom oz. lesenim stropnikom. Vlakna srednjega sloja so orientirana prečno na smer stropnikov.

Tabela 22: Materialne karakteristike CLT plošče (trdnostni razred C24 v skladu s standardom [124])

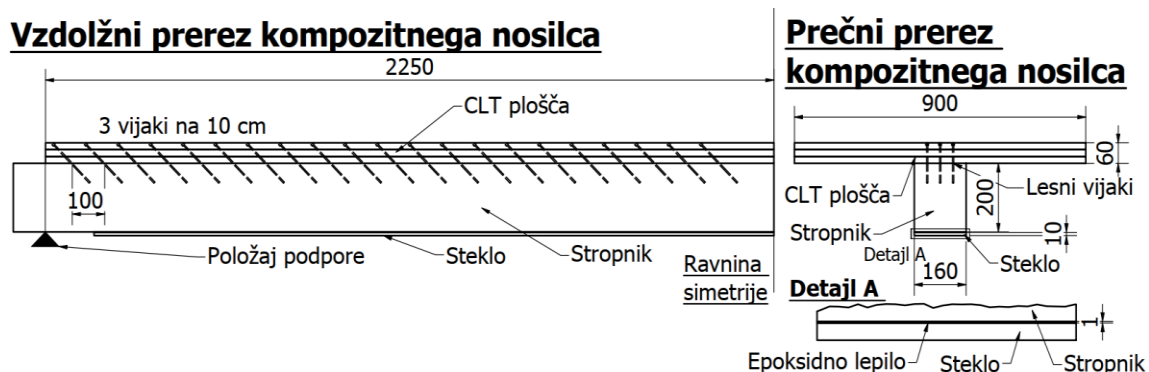
Karakteristična upogibna trdnost	$f_{m,k}$	24,00	[MPa]
Karakteristična natezna trdnost vzporedno z vlakni	$f_{t,0,k}$	14,00	[MPa]
Karakteristična tlačna trdnost vzporedno z vlakni	$f_{c,0,k}$	21,00	[MPa]
Karakteristična strižna trdnost	$f_{v,k}$	2,50	[MPa]
Srednja vrednost modula elastičnosti	$E_{mean}$	11,00	[GPa]
Srednja vrednost strižnega modula	$G_{mean}$	0,69	[GPa]
Srednja gostota	$\rho_m$	420,00	$\frac{kg}{m^3}$
Karakteristična gostota	$\rho_k$	350,00	$\frac{kg}{m^3}$
Karakteristična trdnost za zasučni strig	$f_{vR,k}$	1,10	[MPa]
Srednja vrednost strižnega modula – zasučni strig	$G_{r,mean}$	50,00	[MPa]

Za zvezo CLT plošč in lesenih stropnikov smo uporabili lesne vijake. Nazivni premer vijakov je bil 6,0 mm, premer njihovega jedra 3,9 mm, dolžina vijakov 200,0 mm in dolžina njihovega navoja 185,0 mm. Mehanske karakteristike so prevzete iz proizvajalčeve dokumentacije [117]. Vijake smo privili pod kotom 45°, in sicer tako, da so pri upogibu nosilca delovali pod strigom in nategom. Razporeditev vijakov je razvidna s slik 45 in 46.

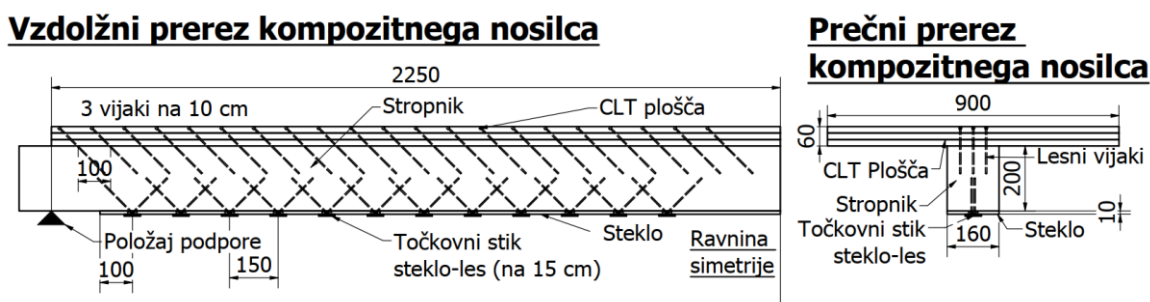
Uporabili smo trakove iz kaljenega stekla dolžine 4,2 m, širine 16 cm in debeline 10 mm. Kaljeno steklo ima karakteristično upogibno trdnost ( $f_{b,k}$ ) 120 MPa, modul elastičnosti kaljenega stekla pa je ( $E_s$ ) 70 GPa. Za lepljeni stik med steklenim trakom in lesenim stropnikom smo izbrali epoksidno lepilo Mapei Adesilex PG1 (konfiguracija A1) s strižnim modulom ( $G_{adh}$ ) 2,8 GPa (podpoglavje 4.1.3). Za konfiguracijo A2 smo uporabili točkovni stik steklo-les, opisan v poglavju 5.

Preizkusi so bili opravljene v zimskem času, ko je relativna vlažnost v laboratoriju zelo nizka (pod 30 % relativne zračne vlažnosti). Posledično so imeli tudi leseni stropniki in CLT plošče nizko vsebnost vlage (okoli 5 %). Sila hidravličnega cilindra je bila s kratkimi jeklenimi nosilci prenesena na točke na tretjinah razpona (1,5 m od podpor). Jekleni nosilci so imeli maso 113,9 kg. Sila je naraščala s hitrostjo 0,2 kN/s. Merili smo upogib na sredini razpona, zdrse med stropnikom in CLT ploščo na obeh koncih stropnika ter zdrse med stropnikom in steklenim trakom na obeh koncih stropnika.

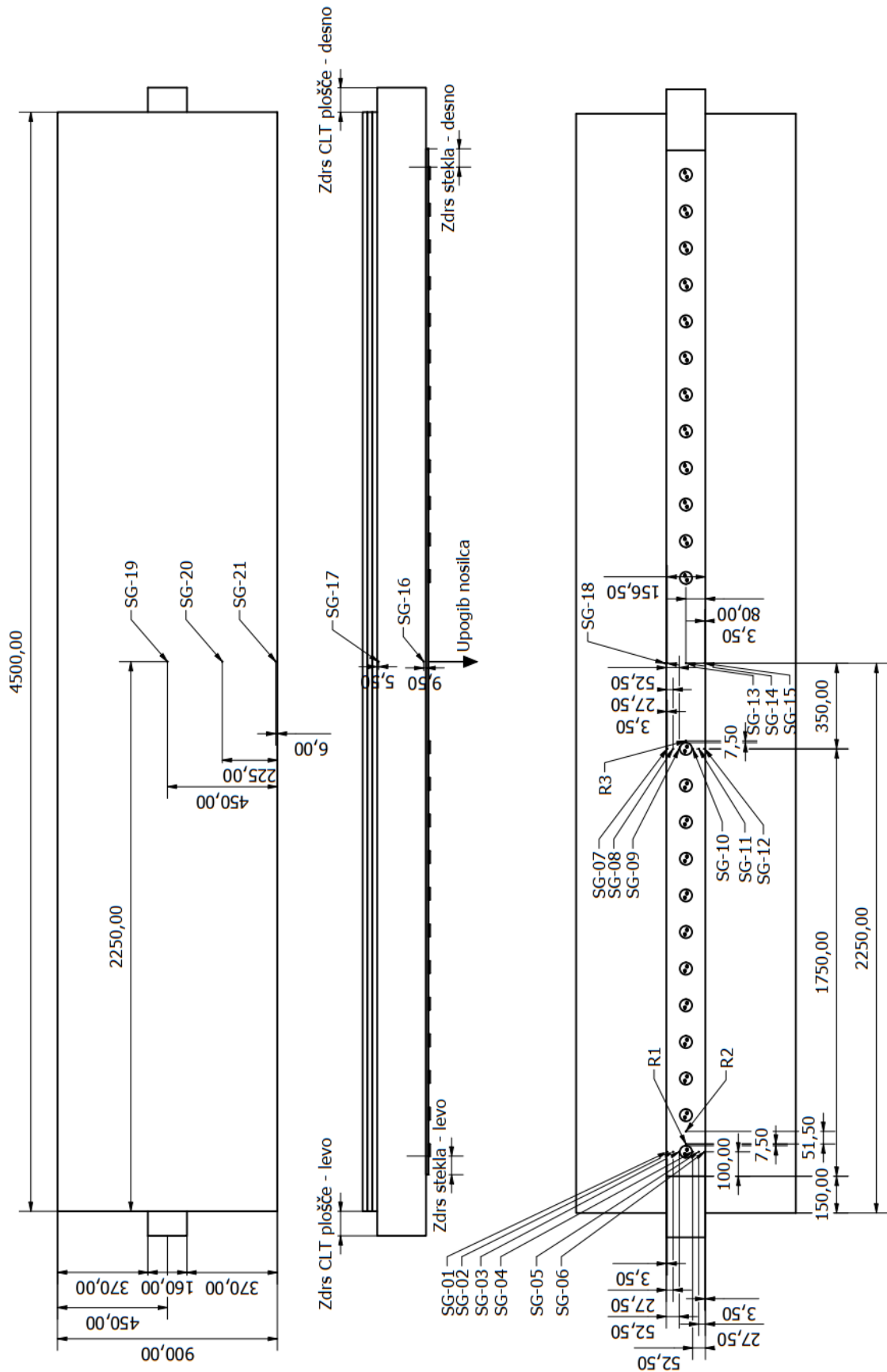
Na stropniku 5 smo merili tudi deformacije, in sicer na več mestih na steklenem traku, na spodnjem in zgornjem robu stropnika na sredini razpona, na spodnjem robu CLT plošče na sredini razpona ter na zgornjem robu CLT plošče (na treh različnih mestih glede na širino CLT plošče) na sredini razpona. Upogib in zdrse smo merili z induktivnimi merilniki pomikov, deformacije pa z merilnimi lističi in merilnimi rozetami. Merilna mesta so razvidna s slike 47. Z merilnimi lističi SG1–SG21 smo merili deformacije v vzdolžni smeri nosilca. Z merilnimi rozetami R1–R3 smo merili deformacije na steklenem traku v vzdolžni in prečni smeri stropnika ter pod kotom 45° glede na prečno smer stropnika.



Slika 45: Levo: vzdolžni prerez sovprežnega nosilca s prilepljenim steklom; desno: prečni prerez sovprežnega nosilca s prilepljenim steklom (dimenzije v mm)



Slika 46: Levo: vzdolžni prerez sovprežnega nosilca s točkovnim stikom steklo-les; desno: prečni prerez sovprežnega nosilca s točkovnim stikom steklo-les (dimenzije v mm)



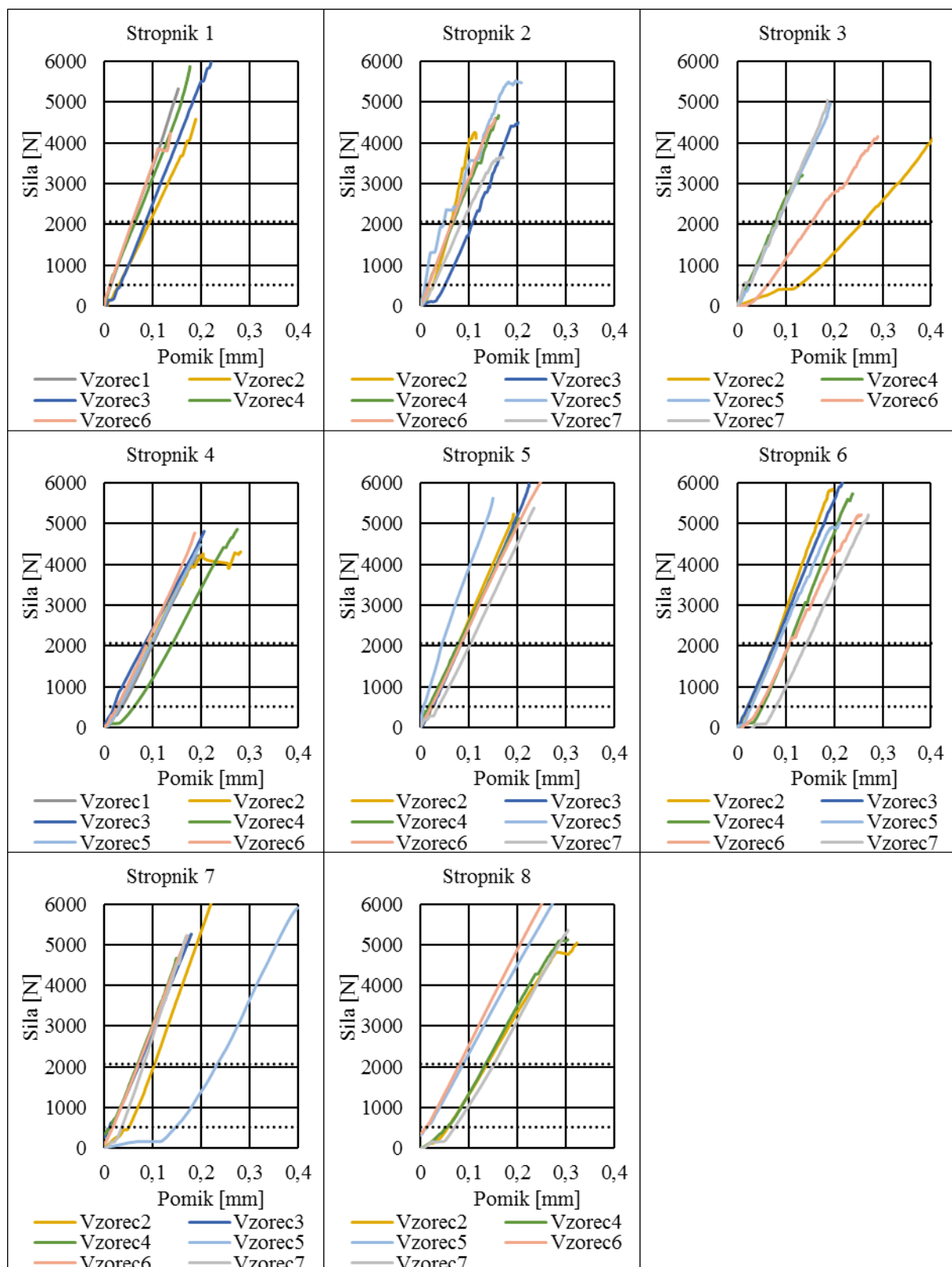
Slika 47: Merilna mesta za upogib, zdrse in deformacije (deformacije so bile merjene samo na stropniku 5)

## 6.2 Natezni preizkusi majhnih lesenih vzorcev

Vzporedno z upogibnimi preizkusi so bile mehanske karakteristike lesenih stropnikov določene na podlagi nateznih preizkusov, opravljenih na majhnih vzorcih, ki so bili odvzeti iz posameznih lesenih stropnikov. Natezni preizkusi majhnih vzorcev so bili izvedeni na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Zaradi ujemanja z vlažnostjo stropnikov so bili vzorci kondicionirani na 5-odstotno vlažnost. Imeli so konstanten prerez širine 10 mm in višine 20 mm ter dolžino 250 mm. Vpenjalna dolžina je bila 35 mm (na vsakem koncu). Merilno območje deformacij je imelo dolžino 100 mm. Vzorci so se pogosto porušili v bližini čeljusti nateznega stroja oz. zunaj merilnega območja deformacij. Dosežene natezne trdnosti se lahko posledično razumejo kot spodnje vrednosti dejanske natezne trdnosti posameznih majhnih vzorcev, saj je v območju čeljusti v vzorcih napetostno stanje sestavljeno iz natega vzporedno z vlakni in tlaka pravokotno na vlakna (zaradi čeljusti). Za vsak stropnik je bilo preizkušanih od 5 do 7 majhnih vzorcev. Rezultati nateznih preizkusov so podani v tabeli 23, krivulje sila-pomik pa na diagramih na sliki 48. Modul elastičnosti je bil določen na intervalu sile od 517 N do 2070 N. Interval je na sliki 48 označen s pikčasto črto in je bil določen kot 0,1- in 0,4-kratnik povprečne maksimalne nosilnosti vseh vzorcev.

Tabela 23: Gostota in rezultati nateznih preizkusov majhnih lesenih vzorcev

Stropnik			Stand. Dev.	Koef. Var. [/]
1	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	15193,37	2089,09	0,14
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	27,10	5,36	0,20
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	417,71	19,88	0,05
2	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	16493,51	3437,11	0,21
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	23,12	2,79	0,12
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	426,39	33,86	0,08
3	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	10668,23	3418,94	0,32
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	23,03	3,91	0,17
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	446,11	33,91	0,08
4	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	11519,04	978,64	0,08
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	22,78	1,25	0,05
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	404,62	13,19	0,03
5	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	14023,20	2994,34	0,21
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	28,24	1,72	0,06
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	441,04	11,05	0,03
6	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	13330,09	480,39	0,04
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	28,14	2,46	0,09
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	492,64	9,37	0,02
7	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	13740,23	2787,33	0,20
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	27,27	2,58	0,09
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	464,88	10,14	0,02
8	Povprečni modul elastičnosti serije [MPa]	10035,50	595,75	0,06
	Povprečna natezna trdnost serije [MPa]	29,62	5,17	0,17
	Povprečna gostota pri 12-% vlažnosti $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	481,50	11,72	0,02

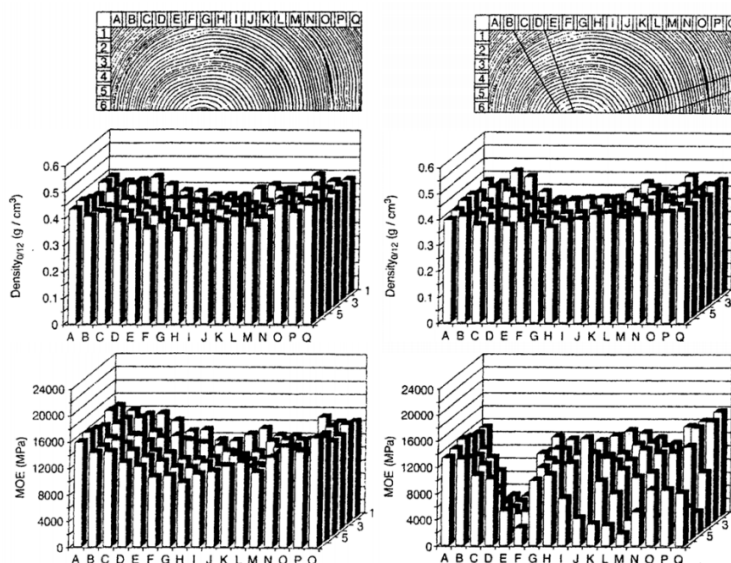


Slika 48: Diagrami sila-pomik majhnih lesenih vzorcev, odvzetih iz lesenih stropnikov (pikčasti črti označujeta interval za določitev modula elastičnosti)

Rezultati v tabeli 23 imajo relativno majhne standardne odklone in koeficiente variacije. Največji koeficient variacije je bil izračunan za modul elastičnosti majhnih vzorcev iz stropnika 3 (0,32), kar pa je še vedno v pričakovanih okvirih (v [125] je za koeficient variacije

natezne trdnosti lesa brez napak vzporedno z vlakni podana vrednost 0,25, za gostoto 0,1 in za modul elastičnosti 0,22).

Leseni stropniki so bili izdelani tako, da je pravokotni prerez obsegal skoraj celotno deblo (glej npr. sliko 44 desno). Znano je, da gostota in mehanske lastnosti v določenem preseku debela niso konstantne, ampak se povečujejo od notranjih delov debela proti njegovi zunanosti (glej npr. [126]). Ker so bili vzorci odvzeti iz skrajnih zunanjih delov lesenih stropnikov, se lahko dobljene vrednosti modula elastičnosti majhnih vzorcev razumejo kot zgornje meje modula elastičnosti pripadajočih lesenih stropnikov v upogibu. Podlaga za ta koncept je delo [127], v katerem je bila obravnavana razlika med modulom elastičnosti določenim na podlagi upogiba lesenih desk okoli šibke in močne osi. V sklopu tega dela so lesene deske (dodatno k upogibnim preizkusom) tudi razžagali v manjše deščice in jim izmerili gostoto ter na podlagi merjenja časa prehoda ultrazvoka skozi posamezni vzorec za vsakega določili modul elastičnosti. Za vzorca na sliki 49 je bilo na podlagi upogibnih preizkusov določeno, da imata modul elastičnosti enak 13950 MPa (slika 49 levo) in 12750 MPa (slika 49 desno). Kot je razvidno s slike 49 (levo in desno), imajo posamezne deščice v skrajnih delih prereza deske (zunanjji deli izhodiščnega lesenega debela) modul elastičnosti enak približno 16000 MPa (kar je tudi maksimalna vrednost vseh deščic v posameznem prerezu). Modul elastičnosti, določen na podlagi upogiba okoli močne osi (kot je tudi v primeru upogiba lesenih stropnikov v doktorski disertaciji), je torej za primer s slike 49 levo za 13 % manjši od maksimalnega modula elastičnosti deščice v zunanjem delu prereza, za primer s slike 49 desno pa kar za 20 % manjši od maksimalnega modula elastičnosti deščice v zunanjem delu prereza. Sklepamo lahko, da torej grče povečujejo odstopanje med modulom elastičnosti deščic iz skrajnih delov lesenega prereza (lokalnega modula elastičnosti) in modula elastičnosti, določenega na podlagi upogiba elementa s celotnim lesenim prerezom. Omenjena odstotka odstopanja nam služita kot ocena za odstopanje modulov elastičnosti lesenih tramov od modulov elastičnosti, pridobljenih z nateznimi preizkusi majhnih lesenih vzorcev (pridobljenih iz lesenih stropnikov).

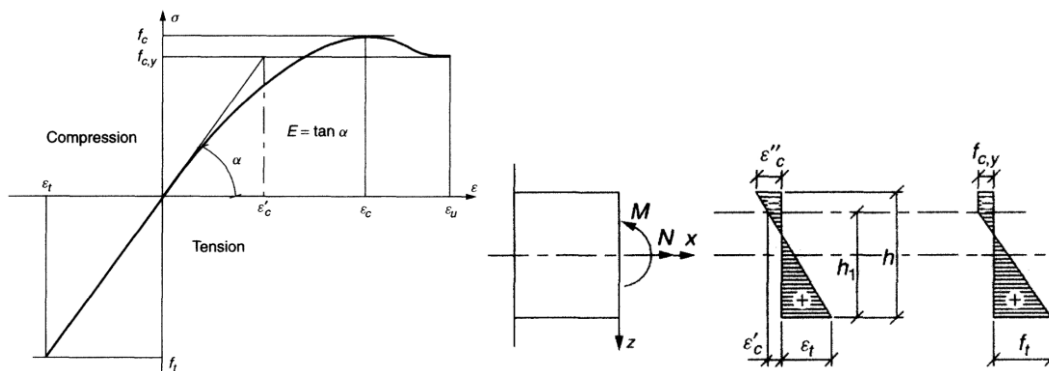


Slika 49: Primera razporeditve gostote in modula elastičnosti v prerezu lesenih desk (levo: vzorec brez napak, desno: vzorec z grčami) (vir slik: [127])

V [128] so na podlagi poenostavljenega elasto-plastičnega konstitutivnega zakona lesa (slika 50) razviti izrazi za izračun upogibne napetosti v trenutku porušitve lesenega elementa, obremenjenega z upogibnim momentom in osno silo. Izraz za izračun upogibne napetosti v trenutku porušitve (brez delovanja osne sile) se glasi:

$$\sigma_m = f_{c,y} \cdot \left( 3 - \frac{4 \cdot f_{c,y}}{f_{c,y} + f_t} \right) \quad (19)$$

kjer je  $\sigma_m$  upogibna napetost v trenutku porušitve,  $f_{c,y}$  asimptotična končna tlačna trdnost oz. tlačna trdnost po poenostavljenem elasto-plastičnem konstitutivnem zakonu lesa (približno 80 % tlačne trdnosti lesa oz.  $0,8 \cdot f_c$ , glej sliko 50),  $f_t$  pa natezna trdnost lesa. Dani izraz velja samo tedaj, ko se že začne plastifikacija tlačnega dela prereza. Za ostale primere (ko je razporeditev napetosti še linearna) je upogibna napetost ob porušitvi enaka natezni trdnosti ( $\sigma_m = f_t$ ). V [128] je opozorjeno, da mora biti za  $f_t$  upoštevana natezna trdnost brez negativnega vpliva grč in spreminjajoče se gostote v lesenem prerezu. To v veliki meri ustreza natezni trdnosti določeni na podlagi nateznih preizkusov majhnih vzorcev odvzetih iz skrajnih delov prereza lesenih stropnikov.



Slika 50: Levo: diagram napetosti v odvisnosti od deformacij za les (za tlak je podan tudi poenostavljen elasto-plastični konstitutivni zakon); desno: razporeditev deformacij oz. napetosti v lesenem prerezu, obremenjenem z upogibnim momentom in osno silo (vir slik: [128])

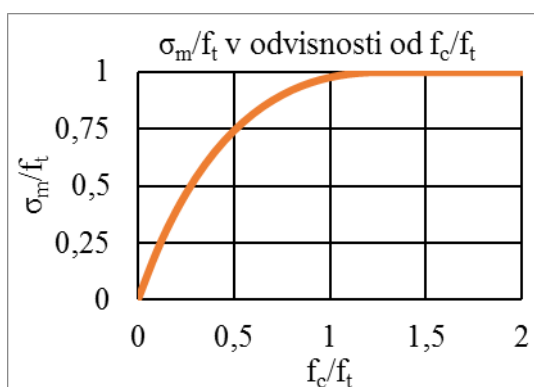
Enačbo 19 lahko preoblikujemo tako, da nam podaja odvisnost razmerja upogibne napetosti ob porušitvi z natezno trdnostjo ( $\sigma_m/f_t$ ) od razmerja tlačne in natezne trdnosti ( $f_c/f_t$ ) lesenega prereza:

$$\frac{\sigma_m}{f_t} = \frac{0,8 \cdot f_c}{f_t} \cdot \left( 3 - \frac{4 \cdot \frac{0,8 \cdot f_c}{f_t}}{\frac{0,8 \cdot f_c}{f_t} + 1} \right) \quad (20)$$

Enačba 20 je v obliki diagrama prikazana na sliki 51. V literaturi lahko najdemo različne podatke o tlačni in natezni trdnosti smrekovega (*Picea abies* oz. navadna smreka) lesa brez napak (ang. *clear wood*). Tako sta v [107] podana natezna in tlačna trdnost lesa brez napak 104 MPa oz. 36,5 MPa, kar daje razmerje  $f_c/f_t$  enako 0,35. V [129] pa je za smrekov gradbeni les podana natezna in tlačna trdnost 30,5 MPa oz. 45,8 MPa, kar daje razmerje  $f_c/f_t$  enako 1,5. Iz standarda [124] je razvidno, da je razmerje  $f_c/f_t$  za trdnostne razrede gradbenega lesa iglavcev od C14 do C50 med 2 in 1. V splošnem lahko razliko med  $f_c/f_t$  med lesom brez napak in gradbenim lesom razumemo v smislu, da napake v lesu bolj (negativno) vplivajo na natezno



kot na tlačno trdnost. Na podlagi omenjenih razmerij  $f_c/f_t$  in diagrama na sliki 51 lahko trdimo, da je dejanska upogibna trdnost (upogibna napetost ob poružitvi je takrat, ko na prerez ne deluje osna sila, enaka upogibni trdnosti  $f_{m,k}$ ) obravnavanih stropnikov vsaj 60 % natezne trdnosti, dosežene z nateznimi preizkusi majhnih vzorcev (velja za  $f_c/f_t$  enako 0,35). Glede na to, da naši majhni vzorci niso bili popolnoma brez napak, pa je verjetno dejansko razmerje  $f_c/f_t$  bližje vrednostim, značilnim za gradbeni les (med 1 in 2), kar pa bi že pomenilo, da je izmerjena natezna trdnost majhnih vzorcev praktično enaka upogibni trdnosti stropnikov. Kot poprej omenjeno, se je veliko majhnih vzorcev pri nateznem preizkusu porušilo v območju čeljusti in dosežene natezne trdnosti so posledično manjše od dejanskih nateznih trdnosti, kar še večja verjetnost, da je upogibna trdnost stropnikov blizu izmerjeni natezni trdnosti majhnih vzorcev (ali pa jo celo presega).



Slika 51: Diagram odvisnosti razmerja upogibne napetosti ob poružitvi z natezno trdnostjo od razmerja tlačne in natezne trdnosti lesenega prereza (na podlagi elasto-plastičnega konstitutivnega zakona za les iz [128])

Za obravnavane stropnike smo tako mehanske karakteristike določili na podlagi izmerjene gostote, natezne trdnosti (upoštevali smo jo kot upogibno trdnost stropnikov  $f_{m,k}$ ) in modula elastičnosti v nategu majhnih vzorcev, za kar smo uporabili izraze iz standarda [124]. Mehanske karakteristike smo določili z namenom, da izvedemo analitične in numerične izračune togosti in nosilnosti. Izračune smo izvedli v skladu z evrokodi (evropskimi standardi za dimenzioniranje gradbenih konstrukcij), zato je uporabljena tudi evrokodom ustrezajoča nomenklatura. Tako smo povprečne izmerjene mehanske karakteristike deklarirali kot karakteristične (kot se uporabljajo za izračune po evrokodih).

Natezno trdnost vzporedno z vlakni ( $f_{t,0,k}$ ) smo izračunali z izrazom:

$$f_{t,0,k} = 0,6 \cdot f_{m,k} \quad (21)$$

Tlačno trdnost vzporedno z vlakni ( $f_{c,0,k}$ ) smo izračunali z izrazom:

$$f_{c,0,k} = 5 \cdot f_{m,k}^{0,45} \quad (22)$$

Strižni modul ( $G_{mean}$ ) smo izračunali z izrazom:

$$G_{mean} = \frac{E_{0,mean}}{16} \quad (23)$$

kjer je za  $E_{0,\text{mean}}$  upoštevana vrednost modula elastičnosti majhnih lesenih vzorcev.

Karakteristično gostoto ( $\rho_k$ ) smo izračunali z izrazom:

$$\rho_k = \frac{\rho_{\text{mean}}}{1,2} \quad (24)$$

kjer je za  $\rho_{\text{mean}}$  upoštevana gostota majhnih lesenih vzorcev.

Za strižno trdnost ( $f_{v,k}$ ) smo upoštevali strižno trdnost trdnostnega razreda (v skladu s standardom [124]), katerega upogibna trdnost se najbolj ujema z upogibno trdnostjo posameznega stropnika. Končne mehanske lastnosti stropnikov so podane v tabeli 24.

Tabela 24: Ocenjene mehanske karakteristike stropnikov

	Številka stropnika							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{m,k}$ [MPa]	27,10	23,12	23,03	22,78	28,24	28,14	27,27	29,62
$f_{t,0,k}$ [MPa]	16,26	13,87	13,82	13,67	16,95	16,89	16,36	17,77
$f_{c,0,k}$ [MPa]	22,07	20,55	20,51	20,41	22,49	22,45	22,13	22,97
$f_{v,k}$ [MPa]	2,80	2,50	2,50	2,40	2,80	2,80	2,80	3,00
$E_{0,\text{mean}}$ [MPa]	15193,37	16493,51	10668,23	11519,04	14023,20	13330,09	13740,23	10035,50
$G_{\text{mean}}$ [MPa]	949,59	1030,85	666,76	719,94	876,45	833,13	858,76	627,22
$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	343,04	355,61	372,38	337,45	367,83	410,86	387,71	403,19
$\rho_{\text{mean}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	411,32	426,39	446,50	404,62	441,04	492,64	464,88	483,44

### 6.3 Obseg rezultatov upogibnih preizkusov

Rezultati upogibnih preizkusov so podani v obliki diagramov sile v odvisnosti od pomika oz. upogiba in v tabelah. Z  $u_i$  smo definirali pomik na sredini razpona, s  $F_i$  smo definirali silo, z  $\Delta_{s,CLT,i}$  smo definirali zdrs CLT plošče (povprečje zdrsa na levem in desnem koncu stropnika), z  $\Delta_{s,G,i}$  pa zdrs steklenega traku (povprečje zdrsa na levem in desnem koncu stropnika). Naštete vrednosti so ovrednotene za pomik, enak 1/300 razpona (zgornja meja, indeks  $i = 2$ ), in za pomik (spodnja meja, indeks  $i = 1$ ), enak približno 20 % prej podane zgornje meje. Pri lesenih stropih se za mejni upogib pri karakteristični obtežbi upošteva meja 1/300 razpona (v našem primeru to znaša 15 mm), kar je tudi razlog, da smo na danem intervalu določili upogibno togost  $EI_{\text{eff}}$ , ki je bila določena z izrazom:

$$EI_{\text{eff}} = \frac{23 \cdot (F_2 - F_1) \cdot L^3}{1296 \cdot (u_2 - u_1)} \quad (25)$$

Spodnja meja intervala je bila določena tako, da začetni nelinearni odziv oz. obnašanje nosilca ni vplival na naše rezultate. S  $K_{\text{TPR,CLT}}$  smo definirali razmerje  $\frac{F_2 - F_1}{\Delta_{s,CLT,2} - \Delta_{s,CLT,1}}$ , s  $K_{\text{TPR,S}}$  smo

definirali razmerje  $\frac{F_2-F_1}{\Delta_{s,G2}-\Delta_{s,G1}}$ . Odvisnosti sile od zdrsa CLT plošče in steklenega traku (količini  $K_{TPR,CLT}$  in  $K_{TPR,s}$ ) lahko razumemo kot indikatorja togosti priključne ravnine. Pomembno je sicer poudariti, da lahko le primerjava rezultatov  $K_{TPR,CLT}$  in  $K_{TPR,s}$  za isti stropnik in isto konfiguracijo služi kot indikator spremembe togosti priključne ravnine. Razlog je odvisnost razporeditve napetosti v prerezu od sestave prereza (v našem primeru konfiguracije). S  $F_{max}$  smo definirali največjo silo, doseženo pri preizkusih. V večini primerov je bila  $F_{max}$  tudi porušna sila, v nekaterih primerih pa do porušitve ni prišlo. Z  $u_{F_{max}}$  smo definirali k največji sili pripadajoči upogib na sredini razpona. Z upogibnimi preizkusi smo želeli določiti vpliv stekla na nosilnost oz. togost stropnega elementa, zato smo tudi primerjali rezultate različnih konfiguracij (istega stropnika). Z  $\Delta_{EI,eff}$  smo označili razliko upogibnih togosti, z  $\Delta_{F_{max}}$  razliko doseženih maksimalnih sil pri upogibnem preizkusu, z  $\Delta_{K_{TPR,CLT}}$  razliko razmerja med silo in zdrsom CLT plošče, z  $\Delta_{K_{TPR,s}}$  pa razliko razmerja med silo in zdrsom steklenega traku med dvema konfiguracijama.

Rezultate smo razdelili v štiri skupine. V prvo skupino smo uvrstili stropnik 4, ki ni bil ojačan. V drugo skupino smo uvrstili stropnik 6, ki je bil ojačan le s CLT ploščo. V tretjo skupino smo uvrstili stropnik 1 in stropnik 7, ki sta bila ojačana s CLT ploščo in prilepljenim steklenim trakom. V četrto skupino pa smo uvrstili stropnike 2, 3, 5 in 8, ki so bili ojačani s CLT ploščo in privitim steklenim trakom. Razporeditev v skupine je podana tudi v tabeli 25.

Tabela 25: Pregled različnih skupin preizkušancev

	Stropnik	Preizkušene konfiguracije	Opis konfiguracij
Skupina 1	4	C	samo stropnik
Skupina 2	6	B	stropnik in CLT plošča
Skupina 3	1 in 7	A1 in B	stropnik ojačan s CLT ploščo in prilepljenim steklenim trakom (konf. A1) – po zlomu stekla smo preizkus ponovili (konf. B).
Skupina 4	2, 3, 7, 8	A2 in B	stropnik ojačan s CLT ploščo in privitim steklenim trakom (konf. A2) – po zlomu stekla smo preizkus ponovili (konf. B).

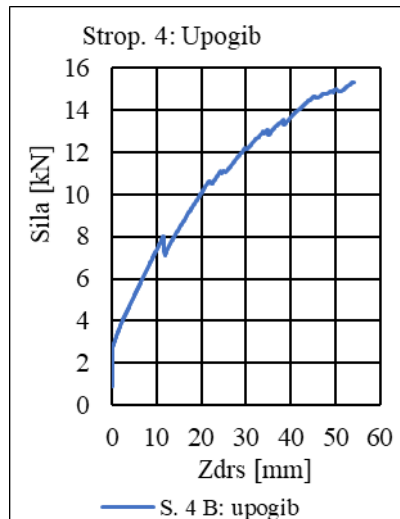
## 6.4 Skupina 1 – Konfiguracija C

### 6.4.1 Stropnik 4

Stropnik 4 (konfiguracija C) je viden na sliki 52. Krivulja sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba je podana na sliki 53, rezultati meritev pa v tabeli 26. Na sliki 54 je vidno stanje po preizkusu.



Slika 52: Stropnik 4 pred upogibnim preizkusom (konfiguracija C)



Slika 53: Stropnik 4, konfiguracija C: krivulja sile v odvisnosti od upogiba

Tabela 26: Stropnik 4: rezultati upogibnih preizkusov

i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$EI_{\text{eff}}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$F_{\text{max}}$ [kN]	$u_{F_{\text{max}}}$ [mm]
1	3,00	4,30	705,32	15,30	53,98
2	11,5	8,01			

Upogibno togost smo določili na intervalu upogiba med 3 mm in 11,5 mm, saj je pri 11,5-milimetrskem upogibu prišlo do nezveznosti krivulje sile v odvisnosti od upogiba (glej sliko 53). Rezultati za stropnik 4 v tabeli 26 služijo za direktno primerjavo modula elastičnosti, pridobljenega na podlagi upogibnih preizkusov, z modulom elastičnosti, pridobljenim z nateznimi preizkusi majhnih vzorcev. Če iz upogibne togosti, pridobljene na podlagi upogibnega preizkusa ( $705,32 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ ), izračunamo modul elastičnosti v upogibu (ob uporabi nominalnega vztrajnostnega momenta stropnika  $10667 \text{ cm}^4$ ), dobimo modul elastičnosti  $6612 \text{ MPa}$ . Modul elastičnosti, pridobljen z upogibnim preizkusom stropnika 4 ( $6612 \text{ MPa}$ ), je torej kar za 43 % nižji od modula elastičnosti, pridobljenega z nateznimi preizkusi majhnih vzorcev ( $11519 \text{ MPa}$ ). Tudi ob natančnejšem upoštevanju dimenzij prereza (spremenljive dimenzije po dolžini stropnika) in upoštevanju strižnih deformacij (za strižni modul smo upoštevali eno šestnajstino modula elastičnosti) se razmerje dosti ne spremeni, saj je rezultirajoči modul elastičnosti še vedno le  $7522 \text{ MPa}$  (razlika je 35 %). Razlika modulov v določeni meri izhaja iz dejstva, da je bil modul elastičnosti, pridobljen z nateznimi preizkusi majhnih vzorcev, uporabljen kot modul elastičnosti v upogibu, vendar pa je malo verjetno, da bi se modula zaradi omenjenega razloga razlikovala za 43 %, saj smo v poglavju 6.2 ocenili, da bi razlika

lahko znašala do maksimalno 20 %. Najpomembnejši razlog za odstopanje je poškodovanost stropnika na določenih mestih (vidno na sliki 52). Veliko boljše ujemanje bi sicer bilo pričakovati, če bi vse stropnike preiskali z neporušnimi metodami (npr. z akustično tomografijo), s katerimi bi lahko natančneje določili residualne oz. zdrave dele prereзов po dolžini stropnika (kot je nakazano v prilogi 12.3). Na sliki 54 so vidne razpoke na spodnji strani stropnika po upogibnem preizkusu, kar pomeni, da se je zgodila porušitev v natezni coni prereza.



Slika 54: Stropnik 4 po upogibnem preizkusu, kjer je prišlo do porušitve v natezni coni prereza (mesto porušitve približno na sredini razpona)

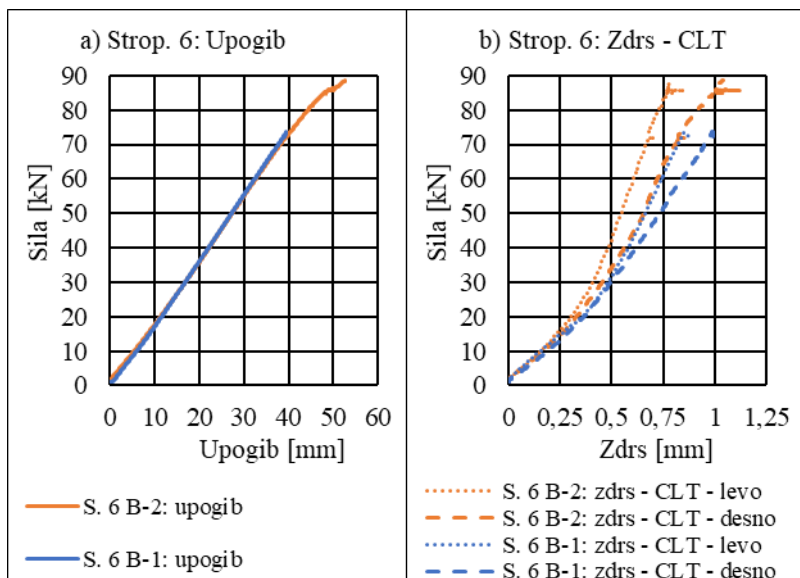
## 6.5 Skupina 2 – Konfiguracija B

### 6.5.1 Stropnik 6

Stropnik 6 (konfiguracija B) je viden na sliki 55. Krivulje sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba, zdrsov CLT plošče in zdrsov steklenega traku so podane na sliki 56, rezultati meritev pa v tabeli 27.



Slika 55: Stropnik 6 konfiguracija B



Slika 56: Stropnik 6: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a) in zdrsa CLT plošče (b)

Tabela 27: Stropnik 6: rezultati upogibnih preizkusov

Konfiguracija	i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$\Delta_{s,CLT,i}$ [mm]	$EI_{eff}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{TPR,CLT}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$F_{max}$ [kN]	$u_{F_{max}}$ [mm]
B-1	1	2,99	5,18	0,07	2882,67	56,82	73,65	39,51
	2	14,99	26,57	0,45				
B-2	1	2,98	6,29	0,09	2740,36	66,91	88,79	52,71
	2	15,00	26,65	0,40				
Primerjava rezultatov								
Konfiguraciji		$\Delta_{EI_{eff}}$ [%]		$\Delta_{F_{max}}$ [%]		$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]		
B-2-B-1		5,19		-17,05		-15,08		

Preizkusi na stropniku 6, ki je bil ojačan le s CLT ploščo, so bili opravljeni dvakrat. Prvi preizkus oz. konfiguracijo smo označili z B-1, drugi preizkus oz. konfiguracijo pa z B-2. Preizkus konfiguracije B-1 se je prekinil pri sili 73,65 kN, razlog pa ni bila porušitev nosilca, ampak zvrnitev dodatnega senzorja sile zaradi sicer minimalnega torzijskega zasuka kompozitnega nosilca. Dodatni senzor sile je bil nameščen med hidravlični bat in jekleno konstrukcijo za razdelitev sile na dva dela, uporabljen pa je bil za primerjavo s silo, ki je izmerjena na podlagi tlaka v hidravličnem cilindru. Različno izmerjene velikosti sil so se ujemale, zato se s to primerjavo pri drugih preizkusih nismo več ukvarjali. Preizkusa konfiguracij B-1 in B-2 sta služila za kontrolo, ali večkratno preizkušanje istega nosilca vpliva na njegovo upogibno togost. Iz primerjave rezultatov v tabeli 27 je razvidno, da je upogibna togost pri drugem preizkusu istega nosilca nekoliko manjša (razlika je 5 %), krivulji sil v odvisnosti od upogiba na sliki 56 a pa se skoraj popolnoma prekrivata, kar kaže na zelo podobno obnašanje obeh konfiguracij. S slike 56 b je razvidno, da je imela konfiguracija B-2 večjo togost priključne ravnine CLT-stropnik. Kot je razvidno iz tabele 27, je ta razlika znašala 15 % (na obravnavanem intervalu). To je najverjetneje posledica aktivacije lesnih vijakov med prvim preizkusom. Večja togost priključne ravnine CLT-stropnik in posledično višja raven delovanja sovprežnosti CLT plošče in stropnika pa glede na rezultate meritev ni rezultirala v večji upogibni togosti konfiguracije B-2 v primerjavi s konfiguracijo B-1. Mogoče je sicer, da



so izmerjeni pomiki konfiguracije B-1 nekoliko manjši zaradi nagiba nosilca, zaradi katerega imajo npr. točke z enakim položajem na longitudinalni osi nosilca na spodnji ploskvi stropnika (na kateri smo merili pomike) različne pomike. Primerjava konfiguracij B-1 in B-2 pa vendar nakazuje, da je sprememba upogibne togosti zaradi večkratnega preizkušanja nosilcev zelo majhna. Na podlagi rezultatov konfiguracij stropnika 6 trdimo, da je manjša upogibna togost konfiguracij brez stekla v primerjavi s konfiguracijami s steklom (konfiguracije istih stropnikov) resnično indikator prispevka stekla k upogibni togosti.

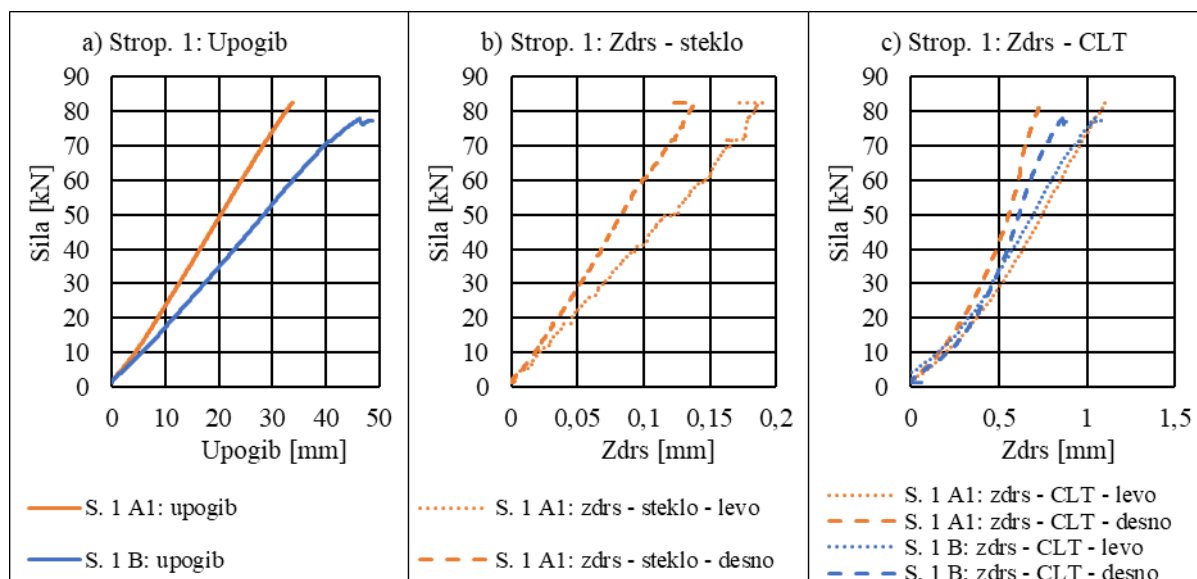
## 6.6 Skupina 3 – Konfiguracija A1

### 6.6.1 Stropnik 1

Stropnik 1 (konfiguracija A1) je viden na sliki 57. Krivulje sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba, zdrsov CLT plošče in zdrsov steklenega traku so podane na sliki 58, rezultati meritev pa v tabeli 28. Primerjava rezultatov konfiguracij je izvedena tako, da smo izračunali odstopanje rezultatov konfiguracije A1 od rezultatov konfiguracije B (v smislu  $((A1-B)/B)$ ). Rezultati primerjave torej prikazujejo vpliv steklenega traku. Na sliki 59 je vidna konfiguracija B oz. stanje z zlomljenim steklom.



Slika 57: Stropnik 1, konfiguracija A1: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo



Slika 58: Stropnik 1: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c)

Tabela 28: Stropnik 1: rezultati upogibnih preizkusov

Konfiguracija	i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$\Delta_{s,CLT,i}$ [mm]	$\Delta_{s,G,i}$ [mm]	$EI_{eff}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{TPR,CLT}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$K_{TPR,s}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$F_{max}$ [kN]	$u_{F,max}$ [mm]
A1	1	2,98	7,21	0,13	0,01	3905,97	73,45	492,23	82,63	33,82
	2	14,99	36,22	0,52	0,07					
B	1	3,00	6,05	0,08		2690,48	59,11		77,86	46,32
	2	15,00	26,01	0,42						
Primerjava rezultatov										
Konfiguraciji		$\Delta_{EI,eff}$ [%]			$\Delta_{F,max}$ [%]			$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]		
B-A1		45,18			6,13			24,26		

Iz tabele 28 je razvidno, da je steklo vplivalo predvsem na togost sovprežnega nosilca 1 (konfiguracija A1 je imela za 45 % večjo upogibno togost od konfiguracije B), čeprav je bila tudi porušna sila za konfiguracijo A1 nekoliko večja kot za konfiguracijo B (konfiguracija A1 je imela za 6 % večjo porušno silo od konfiguracije B). Steklo je torej bolj vplivalo na togost kot na nosilnost stropnika. Kot je razvidno s slike 58 b, so zdrsi steklenega traku izredno majhni, kar kaže na visoko raven sovprežnega delovanja steklenega traku. Če bi bila primerjana le modula elastičnosti in upogibni trdnosti stekla ter tega stropnika, bi ob upoštevanju popolnega sovprežnega delovanja oz. zveznosti upogibnih deformacij (normalne vzdolžne deformacije zaradi upogiba) v sovprežnem prerezu lahko sklepali o tem, kateri del (steklo ali stropnik) bo najprej porušen. Razmerje modulov elastičnosti je v tem primeru enako 4,6, razmerje upogibnih trdnosti pa 4,4 (oboje v korist stekla). Predstavljeno razmišljanje bi torej pomenilo, da je steklo počilo pred lesenim stropnikom. Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 58 a za konfiguracijo A1 je razvidno, da je bila zveza med silo in upogibom praktično linearna. Odvisnost sile od zdrsov CLT plošče in steklenega traku (glej sliki 58 b in c za konfiguracijo A1) ni bila povsem linearna, se je pa očitno togost priključne ravnine z naraščajočo silo povečevala (povečeval se je naklon krivulje), kar lahko pripišemo aktivaciji lesnih vijakov. Konfiguracija A1 je imela tudi za 24 % večjo vrednost količine  $K_{TPR,CLT}$ , kar pomeni, da so zdrsi CLT plošče pri enaki sili manjši kot pri konfiguraciji B.



Slika 59: Stropnik 1, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A1)

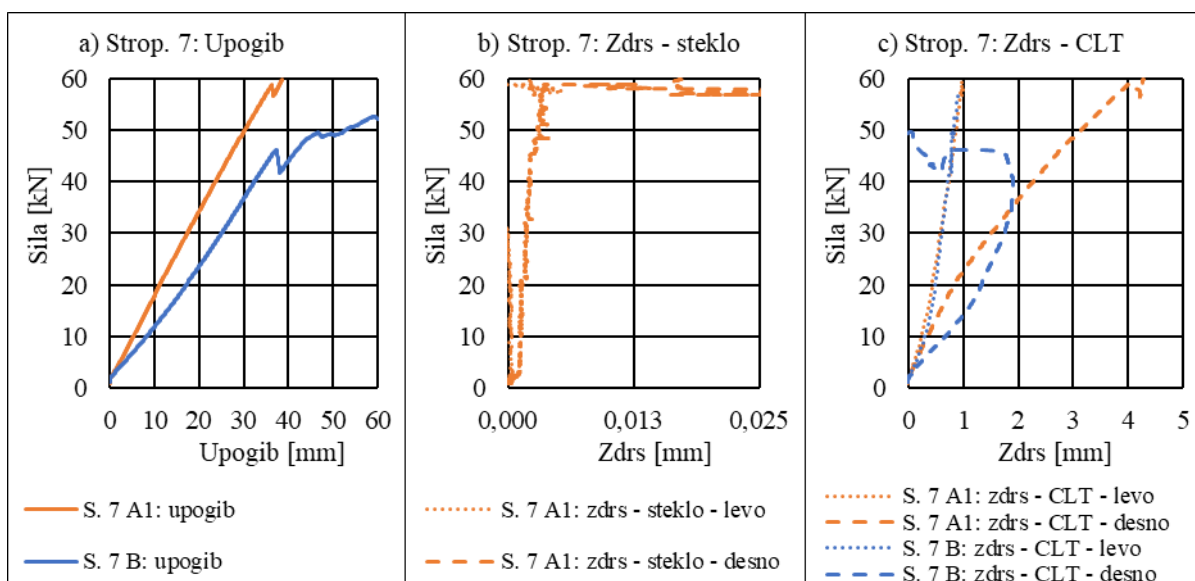


## 6.6.2 Stropnik 7

Stropnik 7 (konfiguracija A1) je viden na sliki 60. Krivulje sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba, zdrsov CLT plošče in zdrsov steklenega traku so podane na sliki 61, rezultati meritev pa v tabeli 29. Primerjava rezultatov konfiguracij je izvedena tako, da smo izračunali odstopanje rezultatov konfiguracije A1 od rezultatov konfiguracije B (v smislu  $((A1-B)/B)$ ). Rezultati primerjave torej prikazujejo vpliv steklenega traku. Na sliki 62 je vidna konfiguracija B oz. stanje z zlomljenim steklom.



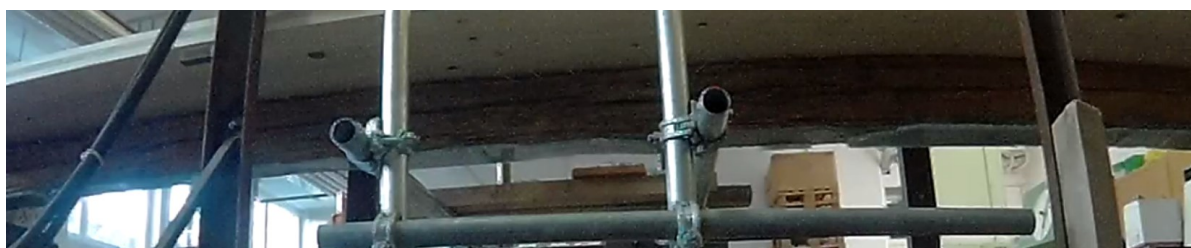
Slika 60: Stropnik 7, konfiguracija A1: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo



Slika 61: Stropnik 7: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c)

Tabela 29: Stropnik 7: rezultati upogibnih preizkusov

Konfiguracija	i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$\Delta_{s,CLT,i}$ [mm]	$\Delta_{s,G,i}$ [mm]	$EI_{eff}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{TPR,CLT}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$K_{TPR,s}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$F_{max}$ [kN]	$u_{F,max}$ [mm]
A1	1	2,98	6,18	0,16	7,01E-04	2697,76	27,68	151646,79	59,70	38,59
	2	14,99	26,22	0,88	8,33E-04					
B	1	2,97	4,79	0,16		1700,99	18,70		57,33	71,57
	2	15,00	17,43	0,83						
Primerjava rezultatov										
Konfiguraciji		$\Delta_{EI,eff}$ [%]			$\Delta_{F,max}$ [%]			$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]		
B-A1		58,60			4,13			48,02		



Slika 62: Stropnik 7, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A1)

Iz tabele 29 je razvidno, da je steklo vplivalo predvsem na togost sovprežnega nosilca 7 (konfiguracija A1 je imela za 59 % večjo upogibno togost od konfiguracije B), čeprav je bila tudi porušna sila za konfiguracijo A1 nekoliko večja kot za konfiguracijo B (konfiguracija A1 je imela za 4 % večjo porušno silo od konfiguracije B). Steklo je torej bolj vplivalo na upogibno togost kot na nosilnost stropnika. Kot je razvidno s slike 61 b, so zdrsi steklenega traku izredno majhni, kar kaže na visoko raven sovprežnega delovanja steklenega traku. To je razvidno tudi iz tabele 29, kjer smo izračunali zelo velik količnik  $K_{TPR,s}$ . Če bi torej primerjali le modula elastičnosti in upogibni trdnosti stekla ter tega stropnika, bi ob upoštevanju popolnega sovprežnega delovanja oz. zveznosti upogibnih deformacij (normalne vzdolžne deformacije zaradi upogiba) v sovprežnem prerezu lahko sklepali o tem, kateri del (steklo ali stropnik) bo najprej porušen. Razmerje modulov elastičnosti je v tem primeru enako 5,1, razmerje upogibnih trdnosti pa 4,4 (oboje v korist stekla). Predstavljeno razmišljanje bi torej kot pri stropniku 1 pomenilo, da je steklo počilo pred lesenim stropnikom. Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 61 a za konfiguracijo A1 je razvidno, da je bila zveza med silo in upogibom praktično linearna. Odvisnost sile od zdrsov CLT plošče in steklenega traku (glej sliko 61 b in c za konfiguracijo A1) ni bila povsem linearna. Povečevanje zdrsa CLT plošče na desnem koncu nakazuje na popuščanje veznih sredstev. Kot je razvidno s slik 61 a, b in c, se je pri sili približno 58 kN pojavila nezveznost na vseh krivuljah konfiguracije A1 v obliki hipnega padca sile, nato se je sila do porušitve še malo povečala (porušitev stekla se je zgodila pri sili 59,7 kN). S slike 61 a je razvidno, da je po omenjeni nezveznosti naklon krivulje celo nekoliko večji, kar pomeni, da se je tudi upogibna togost nekoliko povečala. Podobno velja tudi za zdrse CLT plošče na desnem koncu na sliki 61 a. Naklon preostalih krivulj je bil po nezveznosti razmeroma nespremenjen. Možno je torej, da so določena vezna sredstva na desnem koncu CLT plošče popustila in se je strižna sila prerazporedila na preostala vezna

sredstva, kar je povzročilo povečanje togosti priključne ravnine CLT plošče. Pri konfiguraciji B pa se je naklon krivulje zdrsov CLT plošče na desnem koncu stropnika povečeval vse do sile približno 46 kN, ko je prišlo do nenadnega navideznega zmanjšanja zdrsov CLT plošče. Pri tej sili je prišlo tudi do nezveznosti na krivulji sile v odvisnosti od upogiba na sliki 61 a. Po nezveznosti se je naklon krivulje sile v odvisnosti od upogiba vedno bolj zmanjševal. Kot je razvidno s slike 63, je bil desni konec po preizkusu konfiguracije B delno prestrižen oz. se je tvoril nekakšen tramovni sklad, kar je povzročilo prej omenjeno napako pri merjenju zdrsov CLT plošče na desnem koncu stropnika. Manjši oz. odstriženi del stropnika je nekoliko odmaknil držalo senzorja, ki je bilo pritrjeno na čelno stran stropnika, kar je povzročilo razširitev induktivnega merilnika pomikov. Konfiguracija B se je torej porušila zaradi striga na desnem koncu stropnika, to pa je povzročilo tvorbo tramovnega sklada.



Slika 63: Desni konec stropnika 7 po preizkusu konfiguracije B

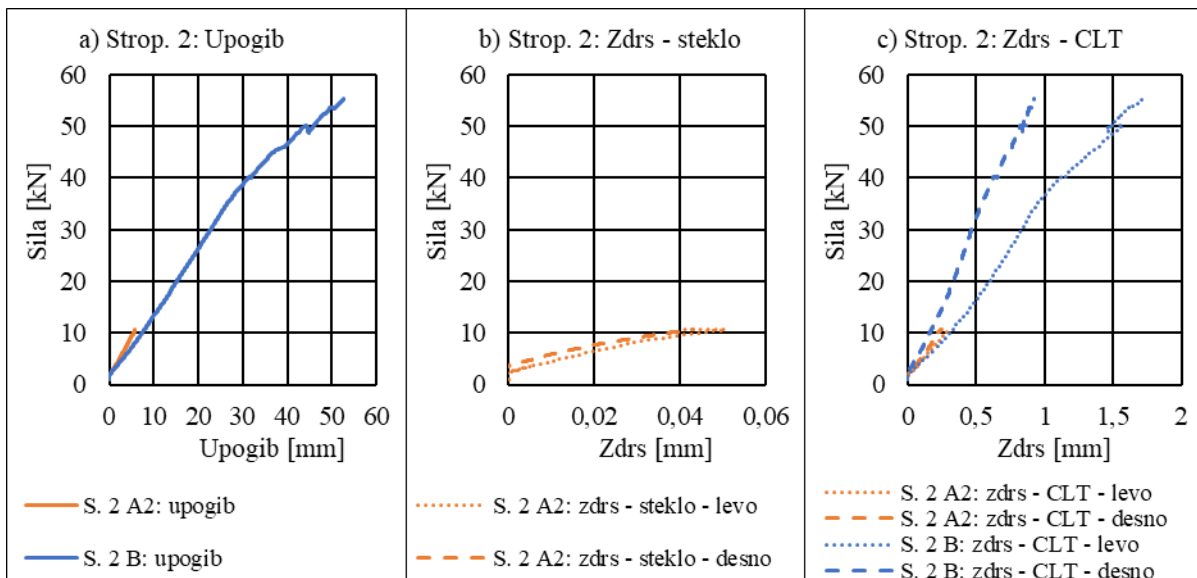
## 6.7 Skupina 4 – Konfiguracija A2

### 6.7.1 Stropnik 2

Stropnik 2 (konfiguracija A2) je viden na sliki 64. Krivulje sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba, zdrsov CLT plošče in zdrsov steklenega traku so podane na sliki 65, rezultati meritev pa v tabeli 30. Primerjava rezultatov konfiguracij je izvedena tako, da smo izračunali odstopanje rezultatov konfiguracije A2 od rezultatov konfiguracije B (v smislu  $((A2-B)/B)$ ). Rezultati primerjave torej prikazujejo vpliv steklenega traku. Na sliki 66 je vidna konfiguracija B oz. stanje z zlomljenim steklom.



Slika 64: Stropnik 2, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo



Slika 65: Stropnik 2: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c)

Tabela 30: Stropnik 2: rezultati upogibnih preizkusov

Konfiguracija	i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$\Delta_{s,CLT,i}$ [mm]	$\Delta_{s,G,i}$ [mm]	$EI_{eff}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{TPR,CLT}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$K_{TPR,s}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$F_{max}$ [kN]	$u_{F,max}$ [mm]
A2	1	2,99	6,05	0,14	0,01	2571,12	32,81	170,05	10,66	5,89
	2	5,89	10,66	0,28	0,04					
B	1	2,97	4,92	0,09		2000,16	40,58		55,30	52,69
	2	14,99	19,79	0,46						
Primerjava rezultatov										
Konfiguraciji		$\Delta_{EI_{eff}}$ [%]			$\Delta_{F_{max}}$ [%]			$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]		
B-A2		28,55			-80,72			-19,15		

Pri konfiguraciji A2 je prišlo do porušitve stekla že pri 10,66 kN oz. pri upogibu 5,89 mm. Za razliko od določitve upogibne togosti pri ostalih stropnikih in konfiguracijah je bila upogibna



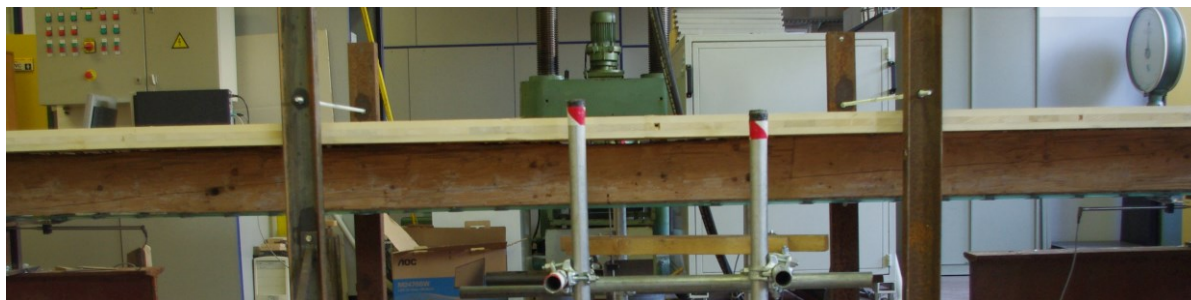
togost (ter  $K_{TPR,CLT}$  in  $K_{TPR,s}$ ) določena na intervalu upogiba med 3 mm in 5,89 mm. Iz tabele 30 je razvidno, da je steklo vplivalo predvsem na togost sovprežnega nosilca 1 (konfiguracija A2 je imela za 29 % večjo upogibno togost od konfiguracije B). Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 65 a za konfiguracijo A2 je razvidno, da je bila zveza med silo in upogibom praktično linearna. Odvisnost sile od zdrsov CLT plošče in steklenega traku (glej sliko 65 b in c za konfiguracijo A2) je bila prav tako linearna. Linearno obnašanje lahko pripišemo majhni doseženi sili. Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 65 a za konfiguracijo B pa je razvidno, da se je naklon krivulje začel pri sili približno 40 kN zmanjševati, pri sili 50 kN pa je prišlo tudi do nezveznosti (hipen padec sile). Nezveznost lahko opazimo tudi na krivulji sile v odvisnosti od zdrsov CLT plošče na levem koncu stropnika (glej sliko 65 c za konfiguracijo B), kjer pa se je poleg padca sile zgodil tudi hipen padec zdrsa CLT plošče. Možno je, da so se pri sili 40 kN začele zelo povečevati strižne deformacije, pri sili 50 kN pa je prišlo do delne strižne porušitve, ki je povzročila pomik na čelni strani stropnika in posledično razširitev induktivnega merilca zdrsa CLT plošče na levem koncu stropnika. Ta pojav je nekoliko podrobneje opisan pri stropniku 5. Konfiguracija A2 je imela za 19 % nižjo vrednost količine  $K_{TPR,CLT}$ , kar pomeni, da so zdrsi CLT plošče pri enaki sili večji kot pa pri konfiguraciji B.



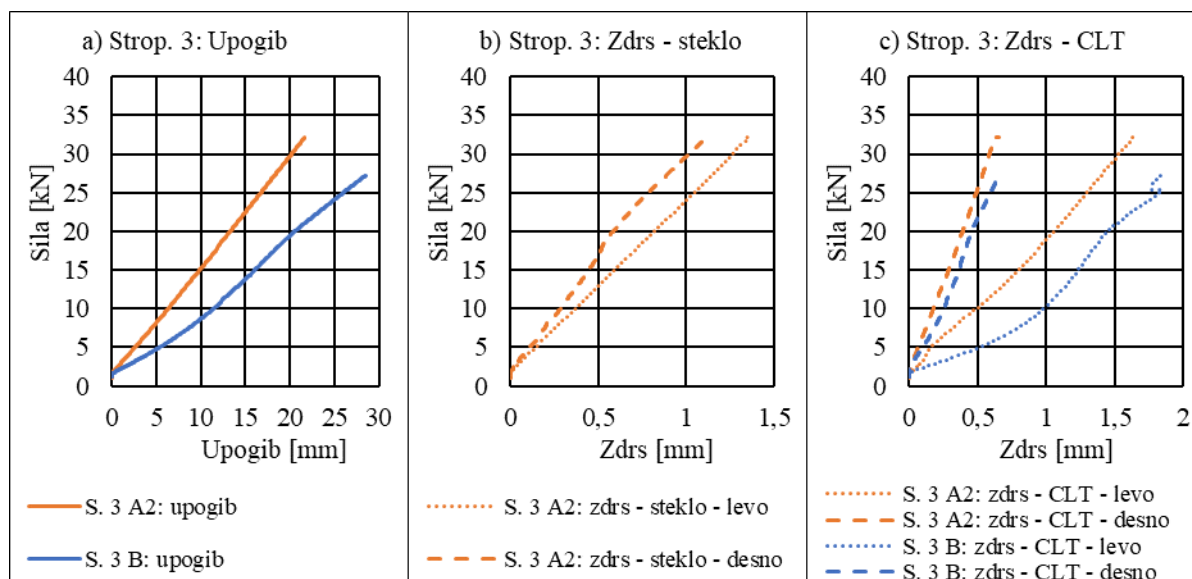
Slika 66: Stropnik 2, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A2)

### 6.7.2 Stropnik 3

Stropnik 3 (konfiguracija A2) je viden na sliki 67. Krivulje sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba, zdrsov CLT plošče in zdrsov steklenega traku so podane na sliki 68, rezultati meritev pa v tabeli 31. Primerjava rezultatov konfiguracij je izvedena tako, da smo izračunali odstopanje rezultatov konfiguracije A2 od rezultatov konfiguracije B (v smislu  $((A2-B)/B)$ ). Rezultati primerjave torej prikazujejo vpliv steklenega traku. Na sliki 69 je vidna konfiguracija B oz. stanje z zlomljenim steklom.



Slika 67: Stropnik 3, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo



Slika 68: Stropnik 3: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c)

Tabela 31: Stropnik 3: rezultati upogibnih preizkusov

Konfiguracija	i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$\Delta_{s,CLT,i}$ [mm]	$\Delta_{s,G,i}$ [mm]	$EI_{eff}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{TPR,CLT}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$K_{TPR,s}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$F_{max}$ [kN]	$u_{F,max}$ [mm]
A2	1	2,98	5,50	0,14	0,15	2285,85	25,13	25,78	32,13	21,69
	2	15,00	22,49	0,81	0,81					
B	1	2,99	3,45	0,16		1393,25	17,21		27,24	28,52
	2	15,00	13,80	0,76						
Primerjava rezultatov										
Konfiguraciji		$\Delta_{EI_{eff}}[\%]$			$\Delta_{F_{max}}[\%]$			$\Delta_{K_{TPR,CLT}}[\%]$		
B-A2		64,07			17,95			46,02		

Iz tabele 31 je razvidno, da je steklo vplivalo predvsem na togost sovprežnega nosilca 3 (konfiguracija A2 je imela za 64 % večjo upogibno togost od konfiguracije B). Tudi porušna sila za konfiguracijo A2 je bila nekoliko večja kot za konfiguracijo B (konfiguracija A2 je imela za 18 % večjo porušno silo od konfiguracije B). Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 68 a za konfiguracijo A2 je razvidno, da je bila zveza med silo in upogibom praktično linearna. Odvisnost sile od zdrsov CLT plošče in steklenega traku konfiguracije A2 (glej sliko 68 b in c) je bila v primerjavi s konfiguracijo B prav tako linearna. Odvisnost sile od zdrsov CLT plošče konfiguracije B na levem koncu (slika 68 c) je zelo odstopala od linearnosti. Pri

sili približno 25 kN lahko opazimo nezveznost na krivulji sile v odvisnosti od zdrsov CLT plošče na levem koncu stropnika, kjer se je zgodil hipen padec zdrsa CLT plošče. Možno je, da je prišlo do delne strižne porušitve, ki je povzročila pomik na čelni strani stropnika in posledično razširitev induktivnega merilca zdrsa CLT plošče na levem koncu stropnika. Pojav je nekoliko podrobneje opisan pri stropniku 5. Očitno pa opisano dogajanje v zvezi s padcem zdrsa na levem koncu stropnika ni vplivalo na upogib, saj podobne nezveznosti na krivulji sile v odvisnosti od upogiba na sliki 68 a za konfiguracijo B ni moč opaziti. Konfiguracija A2 je sicer imela za 46 % večjo vrednost količine  $K_{TPR,CLT}$ , kar pomeni, da so zdrsi CLT plošče pri enaki sili manjši kot pri konfiguraciji B.



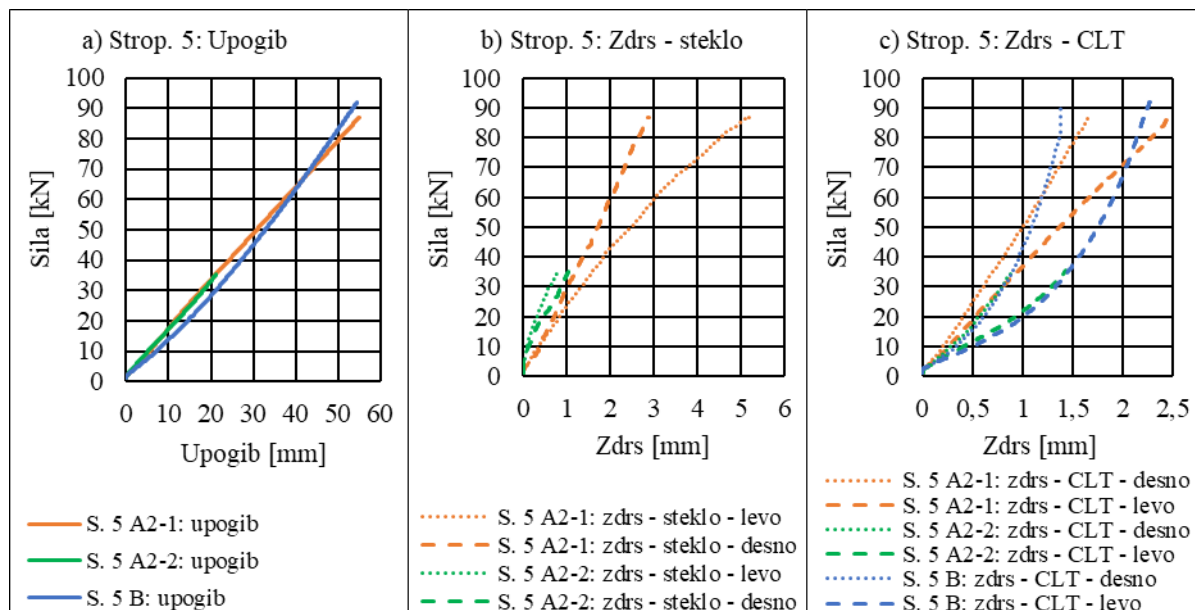
Slika 69: Stropnik 3, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A2)

### 6.7.3 Stropnik 5

Stropnik 5 (konfiguracija A2) je viden na sliki 70. Krivulje sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba, zdrsov CLT plošče in zdrsov steklenega traku so podane na sliki 71, rezultati meritev pa so podani v tabeli 32. Primerjava rezultatov konfiguracij je izvedena tako, da smo izračunali odstopanje rezultatov konfiguracije A2 od rezultatov konfiguracije B (v smislu  $((A2-B)/B)$ ). Rezultati primerjave torej prikazujejo vpliv steklenega traku. S stropnikom 5 sta bila opravljena dva upogibna preizkusa konfiguracije A2 (A2-1 je bil prvi, A2-2 pa drugi preizkus).



Slika 70: Stropnik 5, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo



Slika 71: Stropnik 5: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklene traku (b) in zdrsa CLT plošče (c)

Tabela 32: Stropnik 5: rezultati upogibnih preizkusov

	i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$\Delta_{s,CLT,i}$ [mm]	$\Delta_{s,G,i}$ [mm]	$EI_{eff}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{TPR,CLT}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$K_{TPR,s}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$F_{max}$ [kN]	$u_{F,max}$ [mm]
A2-1	1	2,99	5,85	0,13	0,17	2694,86	41,75	24,10	86,89	55,18
	2	15,00	25,85	0,61	1,00					
A2-2	1	2,98	6,67	0,20	0,05	2436,46	25,95	35,54	35,32	21,25
	2	15,00	24,78	0,90	0,56					
B	1	2,99	5,21	0,16		2106,08	23,42		91,86	54,49
	2	14,99	20,85	0,83						
Primerjava rezultatov										
Konfiguraciji		$\Delta_{EI_{eff}}$ [%]	$\Delta_{F_{max}}$ [%]	$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]	$\Delta_{K_{TPR,s}}$ [%]					
A2-2-A2-1		10,61	146,01	60,89	-32,19					
B-A2-2		15,69	-61,55	10,80						
B-A2-1		27,96	-5,41	78,27						

Pri preizkusu konfiguracije A2-1 ni prišlo do porušitve stekla niti pri sili 86,89 kN, zato smo preizkus sami prekinili. Pri pregledu rezultatov smo ugotovili, da je prišlo do zelo velikih zdrsov stekla na levem koncu stropnika (slika 71 b). Pred naslednjim preizkusom smo se odločili še dodatno priviti vijake za pritrditev stekla na lesene stropnike (A2-2). Pri tem opravilu pa smo med vijačenjem pretrgali lesni vijak na desnem koncu stropnika, a ga nismo nadomestili z novim, saj je steblo pretrganega vijaka ostalo v stropniku in novega vijaka nismo mogli priviti. Konfiguracija A2-2 je torej v primerjavi s konfiguracijo A2-1 imela bolj pritevite vijake, vendar je manjkal natezno obremenjeni lesni vijak na desnem koncu stropnika. Kot je razvidno iz tabele 32, je konfiguracija A2-1 imela za 32 % manjšo togost priključne ravnine steklo-stropnik ( $K_{TPR,s}$ ), kar pomeni, da smo z naknadnim vijačenjem in kljub pretrganemu vijakom vseeno dosegli manjše zdrse med steklenim trakom in lesenim stropnikom pri preizkusu konfiguracije A2-2 v primerjavi s konfiguracijo A2-1. Preizkus konfiguracije A2-2 se je končal (počilo je steklo) pri sili 35,32 kN, kar ponovno kaže, da nam je z dodatnim

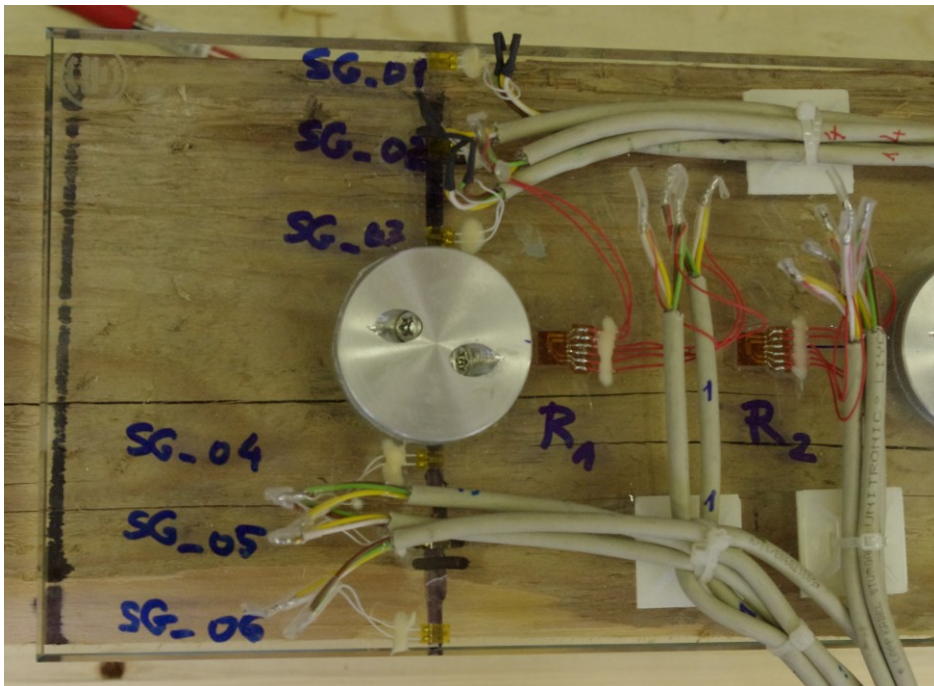


vijačenjem uspelo aktivirati stekleni trak (v primerjavi s konfiguracijo A2-1, kjer do porušitve stekla ni prišlo niti pri sili 86,89 kN). Iz tabele 32 je razvidno, da je bila upogibna togost konfiguracije A2-1 vseeno za 11 % večja od upogibne togosti konfiguracije A2-2. Razlog je očitno manjša togost priključne ravnine CLT-stropnik konfiguracije A2-2, konfiguracija A2-1 je imela namreč kar za 60 % večjo vrednost  $K_{TPR,CLT}$  (glej tabelo 32). Omenjeno kaže na popuščanje veznih sredstev med CLT ploščo in lesnim stropnikom.

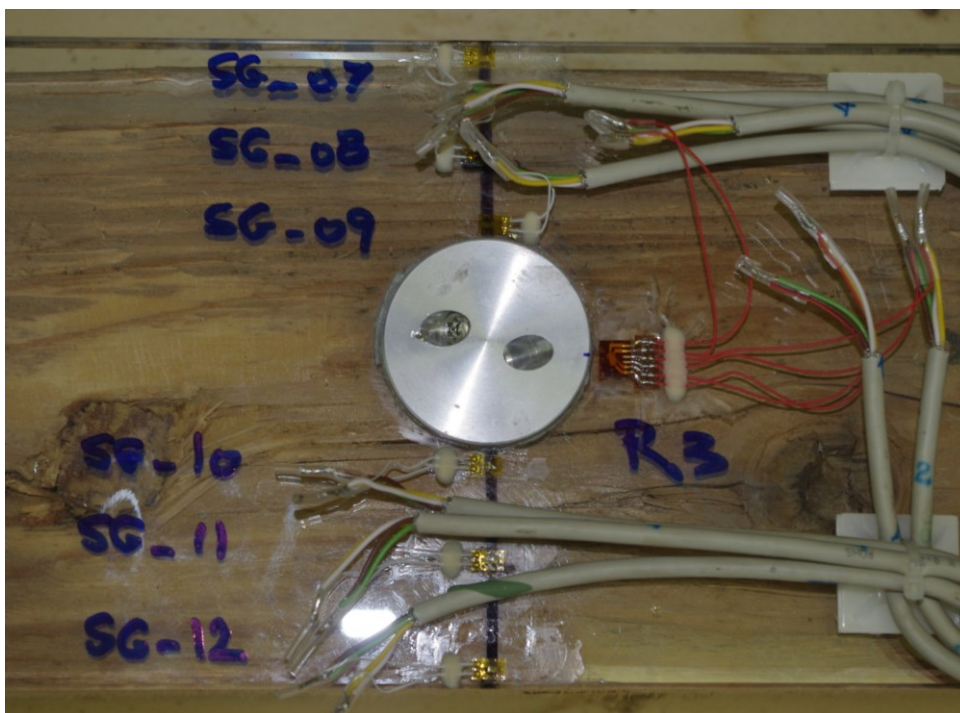
Konfiguracija B je imela v primerjavi s konfiguracijo A2-2 za 16 % manjšo upogibno togost, ki smo jo ovrednotili na intervalu upogiba do 15 mm. Na tem intervalu je imela konfiguracija B tudi za 11 % manjšo vrednost  $K_{TPR,CLT}$ , vendar zaradi različne razporeditve napetosti v prerezu primerjava vrednosti  $K_{TPR,CLT}$  različnih konfiguracij pove le, za koliko so se razlikovali zdrs, in ni merilo za morebitno popuščanje veznih sredstev. Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 71 a je vidno, da je konfiguracija B z večanjem sile postajala tudi bolj toga. Tako je bil pri sili približno 70 kN upogib konfiguracije enak upogibu konfiguracije A2-1 pri isti sili. Razlog je očitno večanje togosti priključne ravnine CLT-stropnik konfiguracije B z naraščanjem sile, kot je razvidno s slike 71 c. Ponovno pa poudarjamo, da so relevantni predvsem upogibi do 15 mm (in pripadajoče vrednosti ostalih količin).

Konfiguracije B nismo uspeli porušiti. Preizkus smo prekinili pri sili 91,86 kN, ki je maksimalno možna sila uporabljene opreme (interna pravila laboratorija). Opravljeni preizkusi torej kažejo, da je steklo vplivalo na upogibno togost, na nosilnost pa ne oz. nosilnost stropnika, ojačanega le s CLT ploščo (konfiguracija B), je večja kot sila, pri kateri je počilo steklo pri konfiguraciji A2-2. Pri lesenih stropnih elementih je za dimenzioniranje običajno merodajno mejno stanje uporabnosti (SLS) in ne mejno stanje nosilnosti (ULS), kar pomeni, da bi tudi ojačitev v smislu konfiguracije A2 lahko bila uporabna, saj kljub ničnem vplivu na nosilnost (v primeru stropnika 5), znatno vpliva na upogibno togost.

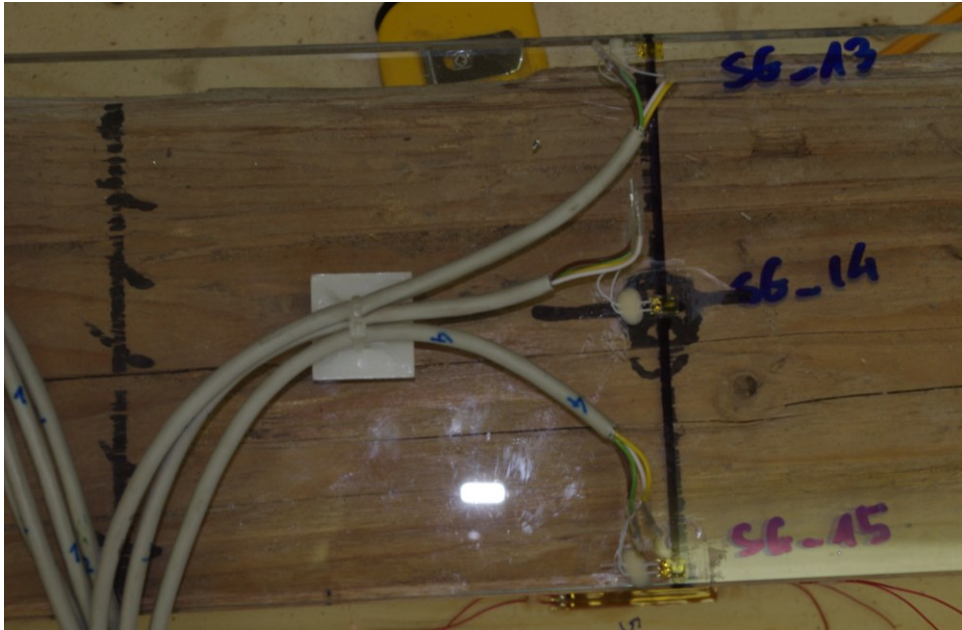
Na stropniku 5 smo merili tudi deformacije. Merilna mesta oz. merilni lističi in rozete so vidne na slikah 72–77. Merilna mesta so razvidna tudi s slike 47.



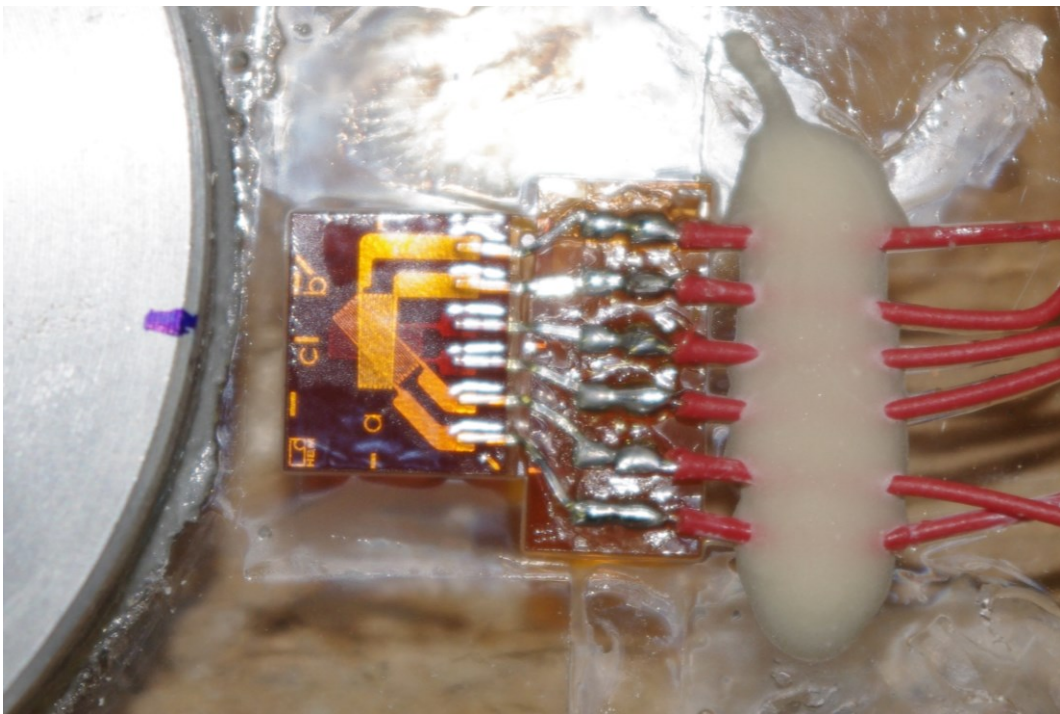
Slika 72: Stropnik 5, konfiguracija A2: položaj merilnih lističev SG-01 do SG-06 in merilnih rozet R1 in R2



Slika 73: Stropnik 5, konfiguracija A2: položaj merilnih lističev SG-07 do SG-12 in merilne rozete R3

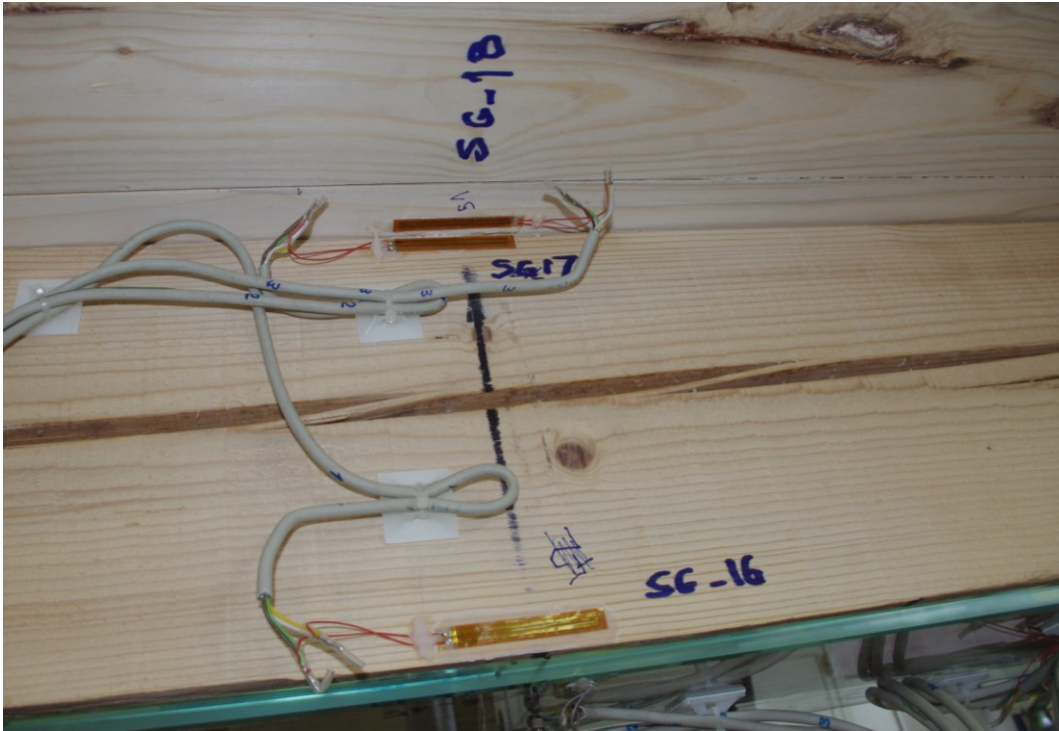


Slika 74: Stropnik 5, konfiguracija A2: položaj merilnih lističev SG-13 do SG-15

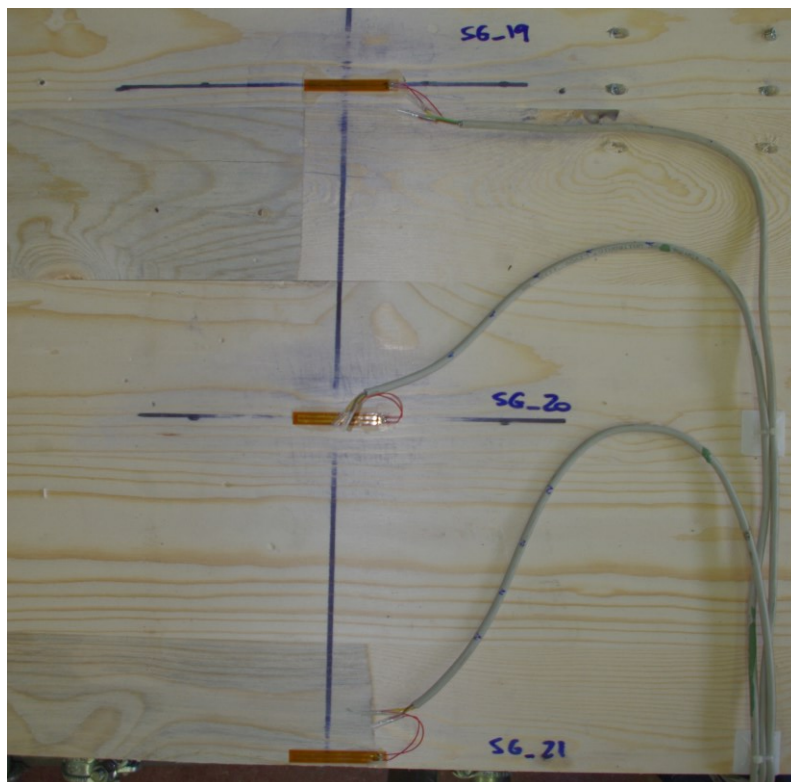


Slika 75: Stropnik 5, konfiguracija A2: merilna rozeta R3 z vidnimi smermi (smeri glede na vzdolžno os stropnika: a – prečno, b – pod kotom 45° in c – vzdolžno) merjenja deformacij



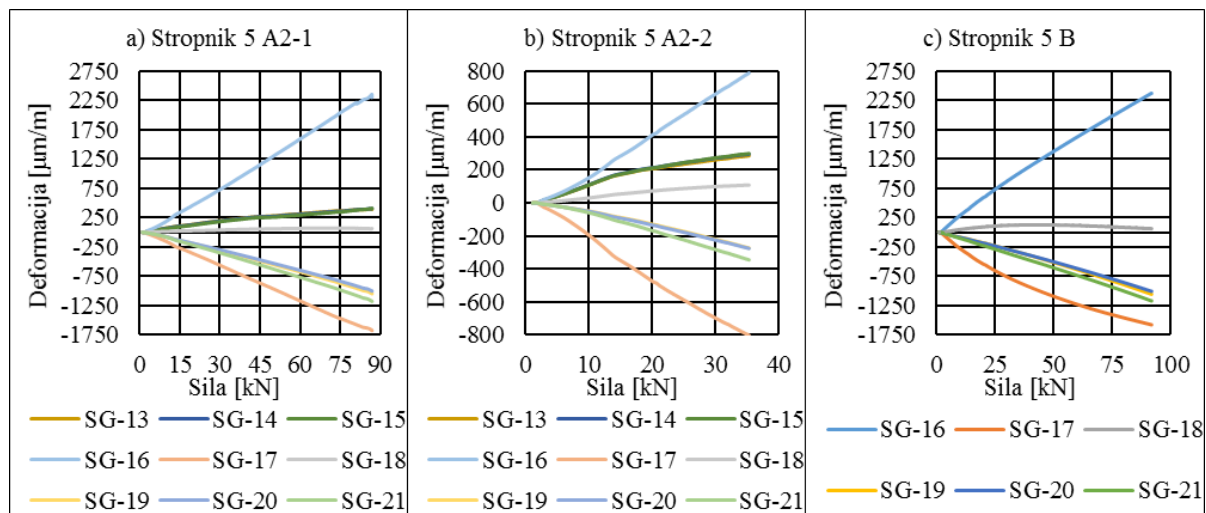


Slika 76: Stropnik 5: položaj merilnih lističev SG-16 do SG-18



Slika 77: Stropnik 5: položaj merilnih lističev SG-19 do SG-21

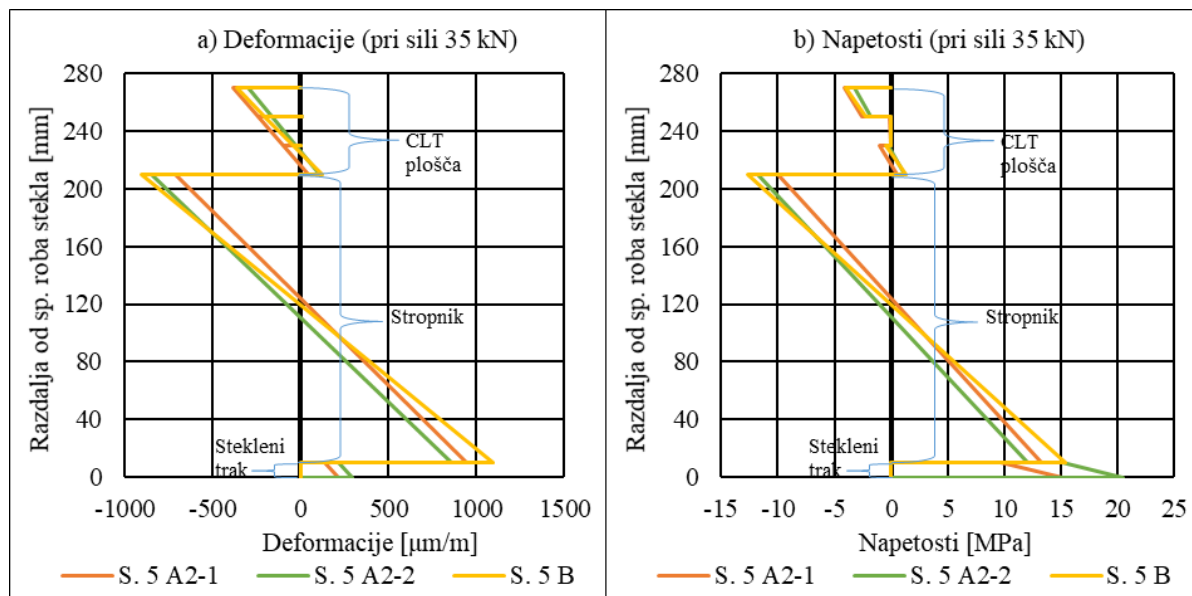
Krivulje deformacij v odvisnosti od sile na podlagi merilnih lističev na sredini razpona (SG-13 – SG-21) so razvidne s slike 78.



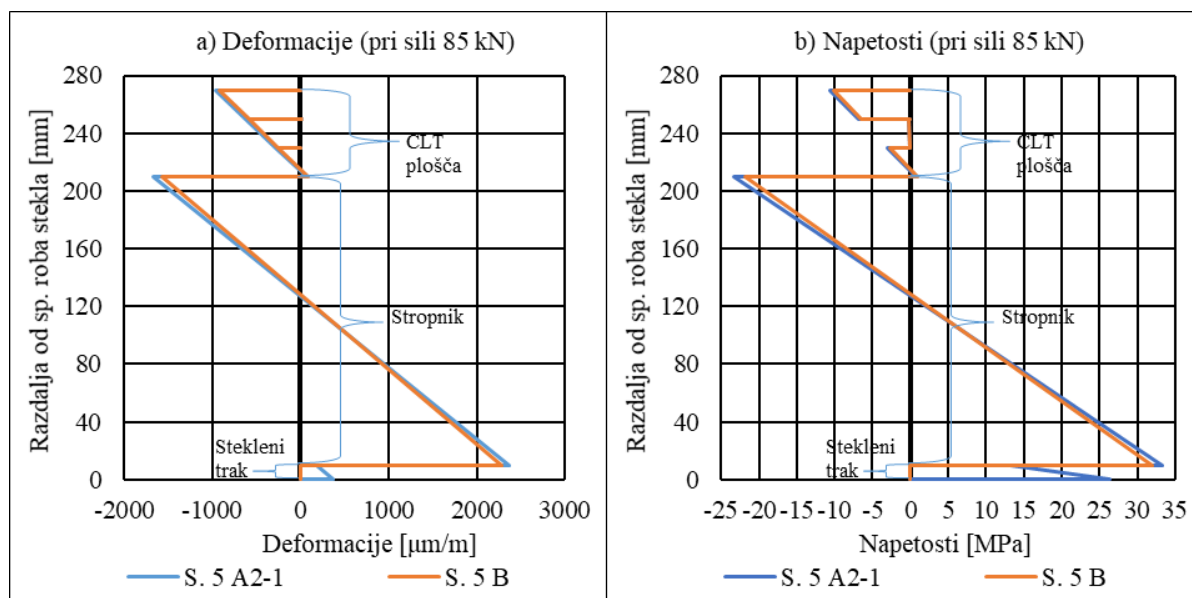
Slika 78: Deformacije na sredini razpona za različne konfiguracije stropnika 5 v odvisnosti od sile v hidravličnem cilindru

S slike 78 je razvidno, da so bile deformacije na sredini razpona razmeroma linearno odvisne od sile, ki je delovala na nosilec. Še največje odstopanje kaže krivulja deformacij merilnega lističa SG-18 pri konfiguraciji B (slika 78 c), s katerim smo merili deformacije na spodnjem robu CLT plošče. Vidno je, da so se deformacije začele pri sili približno 50 kN zmanjševati, kar pomeni, da je prerez CLT plošče postajal vedno bolj tlačен oz. se je začela povečevati raven sovprežnosti. To je tudi v skladu s krivuljami zdrsa CLT plošče konfiguracije B na sliki 71 c; iz teh krivulj je razvidno povečevanje togosti priključne ravnine CLT-stropnik (z večanjem zdrsov se večja tudi naklon krivulje).

Meritve deformacij smo uporabili tudi za izris poteka deformacij in napetosti po višini prereza. Predpostavili smo linearni potek deformacij po višini prereza. Za potek deformacij po CLT plošči in stropniku smo enostavno povezali deformacije na spodnjem in zgornjem robu. Zdrse med sloji CLT plošče smo zanemarili. Na steklenem traku smo merili samo deformacije na spodnjem robu stekla. Deformacije na zgornjem robu steklenega traku smo izračunali na podlagi predpostavke o enakem naklonu deformacijske ravnine v vseh sestavnih delih sovprežnega prereza. Za naklon deformacijske ravnine smo vzeli povprečje naklonov deformacijskih ravnin v CLT plošči in lesenem stropniku. Napetosti smo izračunali tako, da smo deformacije enostavno pomnožili s pripadajočimi moduli elastičnosti. Diagrame deformacij in napetosti v prerezu smo izrisali za dve različni sili, in sicer za silo 35 kN (glej sliko 79) in za silo 85 kN (glej sliko 80). Za silo 35 kN imamo podatke za tri konfiguracije: A2-1, A2-2 in B; za silo 85 kN pa imamo podatke za dve konfiguraciji: A2-1 in B.



Slika 79: Deformacije (a) in napetosti (b) v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN



Slika 80: Deformacije (a) in napetosti (b) v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN

S slike 79 je razvidno, da je stekleni trak povzročil manjše napetosti na spodnjem robu stropnika (konfiguraciji A2-1 in A2-2 v primerjavi s konfiguracijo B). Še posebej je to vidno pri konfiguraciji A2-2, pri kateri smo dodatno privili vijake za stik steklo-les in tako povečali sovprežno delovanje steklenega traku. Opazno je tudi, da je težišče prereza stropnika in težišče sovprežnega prereza sovpadalo, saj je absolutna vrednost napetosti na zgornjem in spodnjem robu skoraj enaka, napetosti pa so ravno na višini težišča prereza stropnika približno enake nič. Na prerezu na sredini razpona konfiguracij A2-1 in B pa očitno poleg upogibnega momenta deluje tudi natezna sila, saj je absolutna vrednost nateznih napetosti na spodnjem robu stropnika večja kot absolutna vrednost tlačnih napetosti na zgornjem robu stropnika; težišče stropnika se torej nahaja v natezni coni sovprežnega prereza.

Na sliki 80 so prikazani nepričakovani rezultati, in sicer da ima konfiguracija A2-1 večje deformacije kot konfiguracija B (glej zgornji rob CLT plošče ter spodnji in zgornji rob stropnika). Na prvi pogled se zdi, da stekleni trak ne vpliva pozitivno na napetosti v stropniku. Razlog je verjetno v načinu merjenja deformacij in pomikov (upogib in zdrsi). Pred preizkusom vsake konfiguracije smo namreč deformacije in pomike nulirali. To v primeru popolnoma linearnega obnašanja sovprežnih nosilcev sicer nima vloge, saj v tem primeru prirastek deformacij povzroči linearno proporcionalni prirastek napetosti, pri konfiguracijah A2-1 in B pa je možno, da smo v tlaku preseгли mejo proporcionalnosti tlačnih deformacij in napetosti, zato obnašanje ni bilo več linearno elastično. V [107] je namreč navedeno, da je meja proporcionalnosti deformacij in napetosti za tlačne napetosti vzporedno z vlakni od 30 % do 50 % tlačne trdnosti. Iz tabele 24 je razvidno, da smo za tlačno trdnost (vzporedno z vlakni) stropnika 5 predpostavili vrednost 22,49 MPa, kar pomeni, da se je stropnik v tlačni coni že plastično deformiral. To bi pomenilo, da razporeditev napetosti v prerezu lesenega stropnika ni bila več linearna in napetosti na sliki 80 b ne odražajo več realnega stanja. Obstaja torej možnost, da smo s prekoračenjem meje proporcionalnosti utrdili material (les), ki se je ob ponovni obremenitvi (preizkus konfiguracij A2-2 in B) obnašal linearno do večjih obremenitev oz. do nove meje proporcionalnosti, ki jo je predstavljala največja sila, dosežena s konfiguracijo A2-1. Pri enakih deformacijah so bile napetosti v prerezih konfiguracij A2-2 in B večje kot pri konfiguraciji A2-1. V tabeli 33 so podane deformacije po koncu preizkusa posamezne konfiguracije. Vidimo, da je po preizkusu konfiguracije A2-1 prerez na sredini razpona ostal trajno deformiran. Možno je torej, da so se v prerezu že pojavile plastične deformacije in/ali pa je steklo po preizkusu oviralo povratek nosilca v izhodiščno lego, kar bi lahko bil razlog za negativne (tlačne) deformacije, po koncu preizkusa, v steklenem traku na sredini razpona.

Tabela 33: Deformacije v prerezu na sredini razpona po koncu preizkusa posamezne konfiguracije

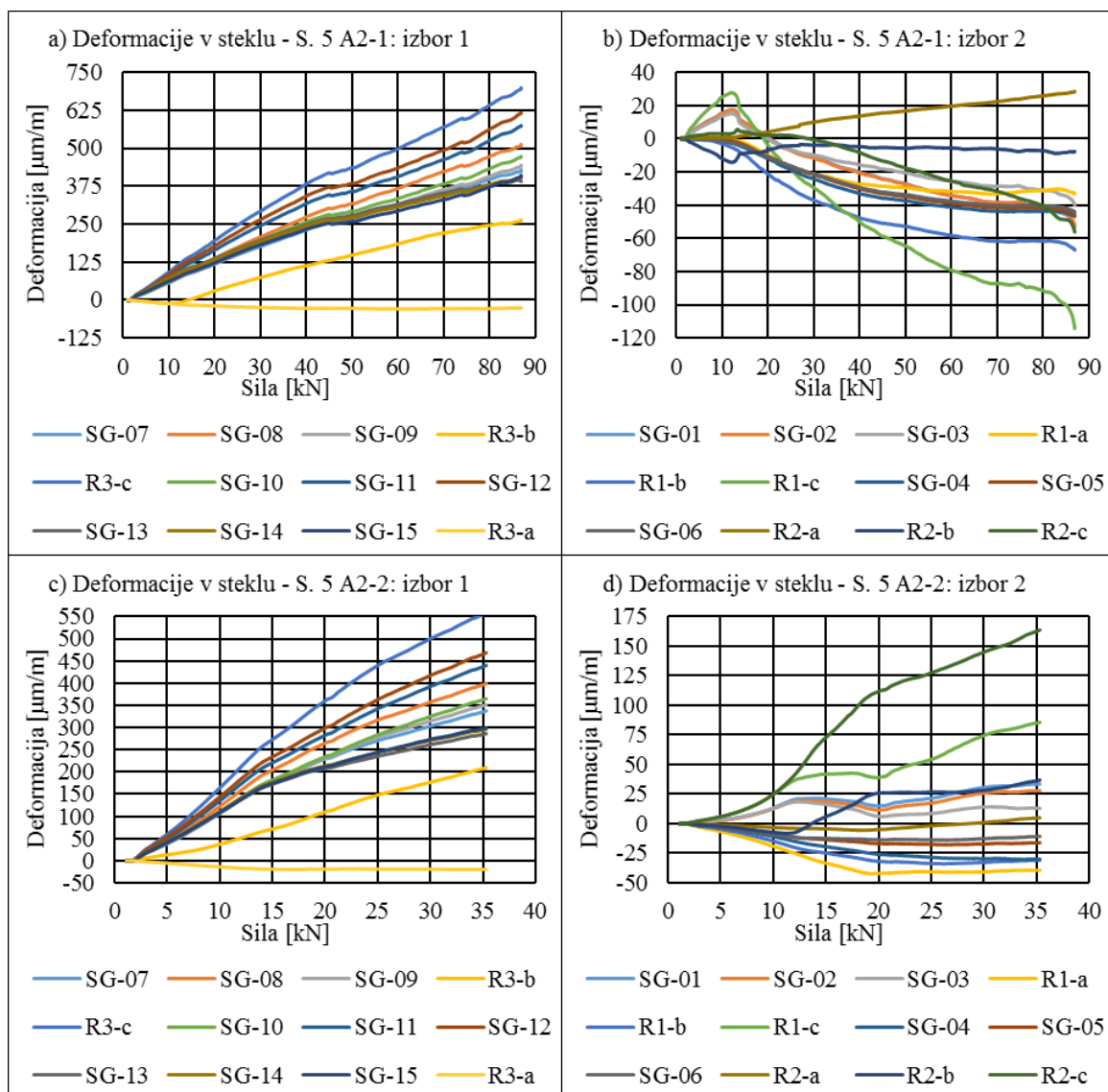
Konfiguracija	SG-13 [μm/m]	SG-14 [μm/m]	SG-15 [μm/m]	SG-16 [μm/m]	SG-17 [μm/m]	SG-18 [μm/m]	SG-19 [μm/m]	SG-20 [μm/m]	SG-21 [μm/m]
A2-1	-98,225	-98,3417	-87,8583	134,95	-122,18	40,92	-30,24	-37,74	-55,18
A2-2				13,97	3,38	1,84	-4,54	-5,60	-7,85
B				-0,51	-16,16	-8,26	-12,76	-9,15	-9,90

Na podlagi diagramov napetosti na slikah 79 b in 80 b smo izračunali tudi rezultantne sile in upogibne momente v prerezih na sredini razpona obravnavanih konfiguracij. Iz ravnotežja velja, da mora biti vsota vseh sil in momentov v prerezu enaka vsoti zunanjih sil in momentov. Zunanja osna sila je bila enaka nič, saj je bil prerez obremenjen le z upogibnim momentom (za silo 35 kN enak 26,25 kNm, za silo 85 kN pa 63,75 kNm). Primerjava z izračunanimi notranjimi silami in upogibnimi momenti na podlagi diagramov normalnih napetosti v tabeli 34 kaže na dobro ujemanje izračunov za konfiguracijo A2-1, za konfiguraciji A2-2 in B pa je ujemanje slabše. Tudi to opažanje kaže na morebitno utrditev materiala pri preizkusu konfiguracije A2-1 in posledično bolj togo obnašanje lesenega stropnika pri preizkusih konfiguracij A2-2 in B.

Tabela 34: Izračunane rezultantne sile in upogibni momenti v prerezu na sredini razpona

Konfiguracija	Sila 35 kN		Sila 85 kN	
	Rezultantna sila [kN]	Rezultantni upogibni moment [kNm]	Rezultantna sila [kN]	Rezultantni upogibni moment [kNm]
A2-1	5,97	25,37	2,58	63,97
A2-2	-4,84	20,98		
B	-5,79	21,70	-6,75	55,83

Na slikah 81 a, b, c in d so prikazane deformacije v steklenem traku za konfiguracij A2-1 in A2-2 stropnika 5 v odvisnosti od sile v hidravličnem cilindru. Zaradi boljše razvidnosti rezultatov smo deformacije glede na velikost razdelili na dva izbora za vsako konfiguracijo, tako da sta za vsako konfiguracijo na sliki 81 dva diagrama. Izbor 1 obsega merilna mesta blizu sredine steklenega traku (SG-07 – SG-15 in R3-a, R3-b in R3-c), izbor 2 pa merilna mesta blizu roba steklenega traku (SG-01 – SG-06 in R1-a, R1-b in R1-c ter R2-a, R2-b in R2-c).

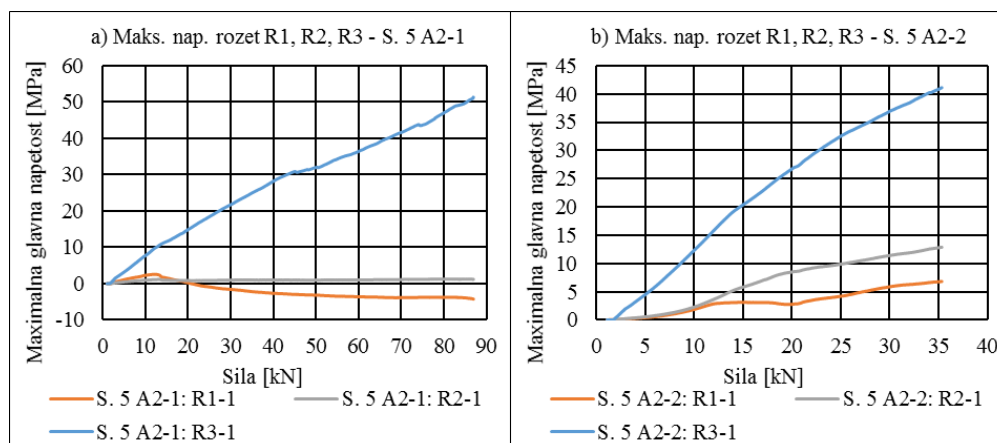


Slika 81: Deformacije v steklenem traku konfiguracij A2-1 in A2-2 stropnika 5 v odvisnosti od sile v hidravličnem cilindru



Opazimo lahko, da so se deformacije na vseh merilnih mestih izbora 1 obeh konfiguracij povečevale razmeroma linearno. Še največja izjema so deformacije na merilnem mestu R3-b, ki so bile pri konfiguraciji A2-1 (slika 81 a) najprej negativne (tlačne), pri sili približno 15 kN so postale pozitivne (natezne), do konca preizkusa pa so se linearno povečevale. Opazimo tudi, da so bile deformacije izbora 1 pri konfiguraciji A2-1 manjše kot pri konfiguraciji A2-2, kar ponovno kaže, da smo z dodatnim privitjem vijakov med preizkusoma konfiguracij A2-1 in A2-2 kljub pretrganju enega od vijakov dosegli večjo aktivacijo oz. bolj sovprežno delovanje steklenega traku. Deformacije izbora 2 konfiguracije A2-1 kažejo na začetno nelinearno odvisnost deformacij od sile v hidravličnem cilindru, pri sili približno 15 kN so vse krivulje spremenile svoj naklon, nekatere celo tako zelo, da so deformacije pri višjih silah menjale predznak (merilna mesta R1-c, R2-c in SG-01–SG-03). Deformacije konfiguracije A2-1 vseh merilnih mest izbora 2, razen merilnega mesta R2-a, so bile negativne, kar je precejšnja razlika s konfiguracijo A2-2, pri kateri so deformacije merilnih mest R1-c, R2-a, R2-b, R2-c ter SG-01–SG-03 vsaj za večje sile pozitivne. Krivulja deformacij merilnega mesta R2-b konfiguracije A2-2 je pri sili 11 kN spremenila naklon, pri sili 14 kN pa so deformacije tudi menjale predznak. Opazimo tudi, da je več krivulj deformacij konfiguracije A2-2 pri sili 15 kN spremenilo naklon in da so deformacije konfiguracije A2-2 vseh merilnih mest izbora 2 pri sili, večji od 20 kN, začele postajati bolj pozitivne. Te spremembe se ujemajo z obnašanjem krivulje zdrsa steklenega traku na desnem koncu stropnika (slika 71 b, konfiguracija A2-2). To lahko razumemo kot popuščanje strižno obremenjenega vijaka med silama 11 in 14 kN, pri silah, večjih od 14 kN, pa kot ponovno aktivacijo vijaka. Obnašanje deformacij izbora 2 konfiguracij A2-1 in A2-2 kaže na težave z lesnimi vijaki v točkovnem stiku blizu roba steklenega traku, pri konfiguraciji A2-1 so bili lesni vijaki očitno premalo priviti, pri konfiguraciji A2-2 pa je bil pretrgan natezno obremenjeni vijak oz. ga ni bilo.

Na podlagi meritev in upoštevanja ravninskega napetostnega stanja smo izračunali tudi maksimalne glavne napetosti na merilnih mestih rozet R1, R2 in R3 (merilna mesta na steklenem traku). Za modul elastičnosti stekla smo upoštevali 70 GPa, za Poissonov količnik pa 0,22. Rezultati maksimalnih glavnih napetosti v odvisnosti od sile v hidravličnem cilindru so podani na sliki 82 a in b (rezultati za konfiguraciji A2-1 in A2-2).



Slika 82: Maksimalne glavne napetosti na merilnih mestih R1, R2 in R3: a) stropnik 5, konfiguracija A2-1; b) stropnik 5, konfiguracija A2-2

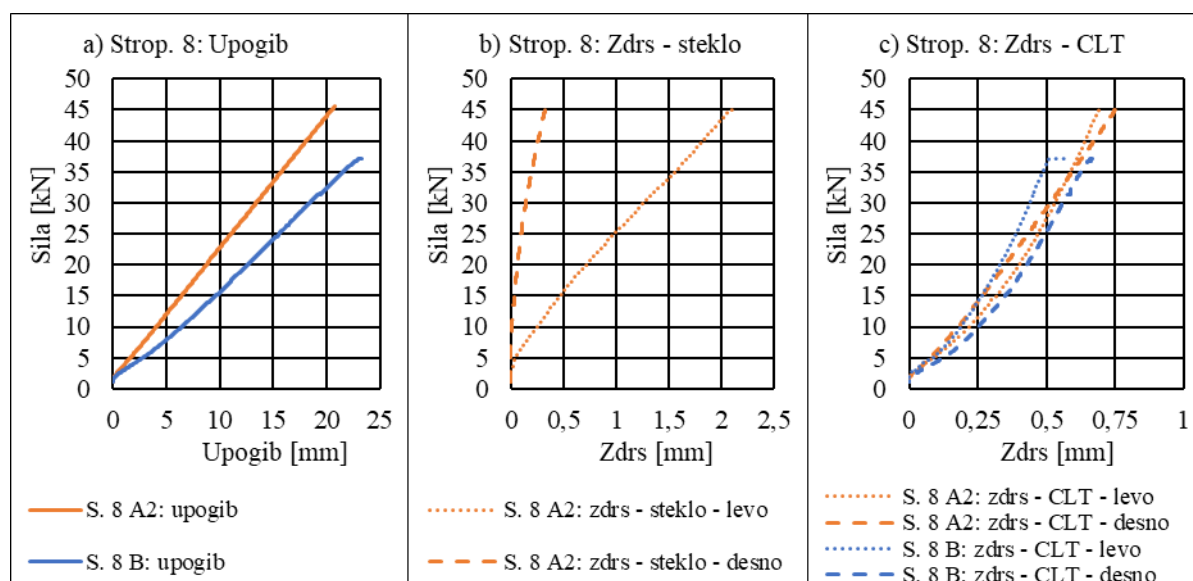
Iz rezultatov na slikah 82 a in b je ponovno razvidno, da je stekleni trak pri konfiguraciji A2-2 deloval bolj sovprežno kot pri konfiguraciji A2-1, saj so pri enakih silah maksimalne glavne napetosti konfiguracije A2-2 opazno večje kot maksimalne glavne napetosti konfiguracije A2-1. Za rezultate veljajo podobna opažanja kot za deformacije v prejšnjih odstavkih (na podlagi katerih so maksimalne glavne napetosti tudi izračunane). Omeniti pa velja, da smo pri konfiguraciji A2-1 dosegli večjo maksimalno glavno napetost kot pri konfiguraciji A2-2.

#### 6.7.4 Stropnik 8

Stropnik 8 (konfiguracija A2) je viden na sliki 83. Krivulje sile (sila hidravličnega cilindra) v odvisnosti od upogiba, zdrsov CLT plošče in zdrsov steklenega traku so podane na sliki 84, rezultati meritev pa v tabeli 35. Primerjava rezultatov konfiguracij je izvedena tako, da smo izračunali odstopanje rezultatov konfiguracije A2 od rezultatov konfiguracije B (v smislu  $((A2-B)/B)$ ). Rezultati primerjave torej prikazujejo vpliv steklenega traku. Na sliki 85 je vidna konfiguracija B oz. stanje z zlomljenim steklom.



Slika 83: Stropnik 8, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo



Slika 84: Stropnik 8: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c)

Tabela 35: Stropnik 8: rezultati upogibnih preizkusov

Konfiguracija	i	$u_i$ [mm]	$F_i$ [kN]	$\Delta_{s,CLT,i}$ [mm]	$\Delta_{s,G,i}$ [mm]	$EI_{eff}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{TPR,CLT}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$K_{TPR,s}$ [ $\frac{kN}{mm}$ ]	$F_{max}$ [kN]	$u_{F_{max}}$ [mm]
A2	1	2,99	7,74	0,15	0,08	3451,60	61,10	34,57	45,55	20,75
	2	15,00	33,37	0,57	0,82					
B	1	2,99	5,24	0,11		2535,40	58,64		37,12	23,31
	2	14,99	24,05	0,43						
Primerjava rezultatov										
Konfiguraciji		$\Delta_{EI_{eff}}$ [%]			$\Delta_{F_{max}}$ [%]			$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]		
B-A2		36,14			22,71			4,20		



Slika 85: Stropnik 8, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A2)

Iz tabele 35 je razvidno, da je steklo vplivalo predvsem na togost sovprežnega nosilca 1 (konfiguracija A2 je imela za 36 % večjo upogibno togost od konfiguracije B). Tudi porušna sila za konfiguracijo A2 je bila nekoliko večja kot za konfiguracijo B (konfiguracija A2 je imela za 23 % večjo porušno silo od konfiguracije B). Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 84 a za konfiguracijo A2 je razvidno, da je bila zveza med silo in upogibom praktično linearna. Iz krivulje sile v odvisnosti od upogiba na sliki 84 a za konfiguracijo B pa je razvidno, da je stropnik do sile približno 10 kN pridobival upogibno togost, pri večjih silah pa je bila zveza med silo in upogibom prav tako linearna. Krivulja odvisnosti sile od zdrsov steklenega traku pri konfiguraciji A2 (glej sliko 84 b) razkriva, da se je togost priključne ravnine steklo-stropnik z naraščajočo silo nekoliko zmanjševala, prav tako pa lahko opazimo, da so bili na levem koncu stropnika zdrsi steklenega traku večji kot na desnem koncu. Nakloni krivulj odvisnosti sile od zdrsov CLT plošče pri konfiguracijah A2 in B so se z naraščajočo silo povečevali, kar nakazuje na vedno večjo aktivacijo lesenih vijakov. Konfiguracija A2 je imela sicer za 4 % večjo vrednost količine  $K_{TPR,CLT}$ , kar pomeni, da so zdrsi CLT plošče pri enaki sili manjši kot pri konfiguraciji B.

## 6.8 Primerjava rezultatov upogibnih preizkusov

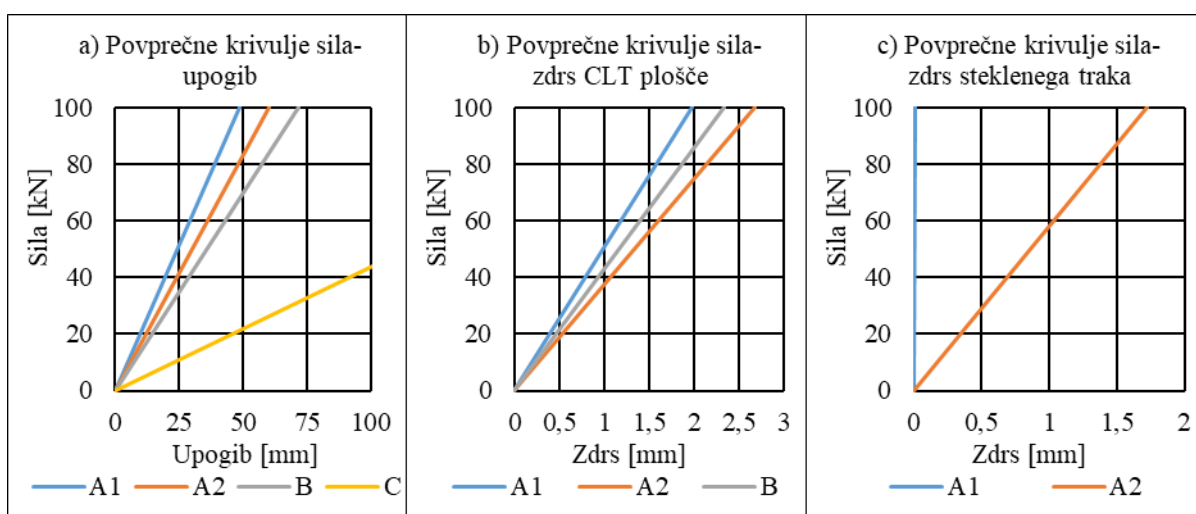
Zaradi lažje primerjave so v tabeli 36 zbrani rezultati vseh stropnikov in konfiguracij. Na podlagi rezultatov v tabeli 36 so v tabeli 37 izračunane povprečne vrednosti, standardni odmiki in koeficienti variacij rezultatov za obravnavane konfiguracije stropnikov. Rezultati  $\Delta_{EI_{eff}}$  in  $\Delta_{F_{max}}$  predstavljajo vpliv stekla na stropnik, ojačan s CLT ploščo, oz. razliko med konfiguracijo A1 ali A2 in pripadajočo konfiguracijo B istega stropnika. V tabeli 37 so dodani še rezultati za stropnik 4, ki predstavljajo rezultate za konfiguracijo C (preizkušena samo v enem primeru) V diagramih na sliki 86 so prikazane povprečne krivulje sile v odvisnosti od upogiba, zdrsa CLT plošče in steklenega traku. Opazimo lahko, da je največjo povprečno vrednost upogibnih togosti imela konfiguracija A1, sledita konfiguracija A2 in konfiguracija B. Najmanjšo upogibno togost je pričakovano imela konfiguracija C oz. stropnik brez ojačitev. Čeprav so stropniki imeli različne mehanske lastnosti (kot je razvidno iz tabele 23), so različne ojačitve zadostno vplivale na upogibne togosti, da lahko presodimo, katera konfiguracija je s tega vidika najučinkovitejša (torej konfiguracija A1). Velike razlike med posameznimi stropniki so sicer tipične za stare lesene nosilce, na kar opozarjajo številne študije (glej npr. [130]). Nekoliko drugačni so rezultati za maksimalne dosežene sile pri upogibnih preizkusih (z izjemo stropnika 5 so bile enake porušni sili), saj je imela konfiguracija B višjo povprečno vrednost maksimalnih sil kot konfiguracija A2. Omenjeno nakazuje, da bo privit stekleni trak počil pri silah, manjših od nosilnosti pripadajočih konfiguracij B (stropnikov, ojačanih le s CLT ploščo). Glede na povprečne vrednosti količine  $K_{TPR,CLT}$  je jasno, da je imela konfiguracija A1 najmanjše zdrse CLT plošče, sledi konfiguracija B in šele potem konfiguracija A2. Zanimivejši so rezultati za količino  $K_{TPR,S}$ , ki razkrivajo, da so zdrsi prilepljenega steklenega traku dosti manjši od zdrsov privitega steklenega traku. Za  $K_{TPR,S}$  smo izračunali največje standardne odmike in koeficiente variacij, kar lahko nakazuje tudi na velik vpliv kakovosti izdelave preizkušancev. Velik standardni odmik za konfiguracijo A2 je posledica rezultata stropnika 2, ki je izkazoval največjo in zelo odstopajočo vrednost  $K_{TPR,S}$ . To nakazuje na razlog porušitve steklenega traku konfiguracije A2 stropnika 2 pri relativno majhni sili (10,66 kN), namreč privitje posameznih vijakov v stiku steklo-les s preveliko silo oz. momentom. Na podlagi primerjave vrednosti  $\Delta_{EI_{eff}}$  (sprememba upogibne togosti zaradi steklenega traku) lahko potrdimo, da je vpliv prilepljenega steklenega traku večji kot pa vpliv privitega steklenega traku. Vrednosti  $\Delta_{F_{max}}$  razkrivata, da prilepljen stekleni trak (konfiguracija A1) povečuje nosilnost stropnika, ojačanega s CLT ploščo, privit stekleni trak (konfiguracija A2) pa se poruši, še preden je dosežena sila enaka nosilnosti stropnika ojačanega le s CLT ploščo. Standardni odmik za  $\Delta_{F_{max}}$  za konfiguracijo A2 je izredno velik. To nakazuje na velike razlike med stropniki, kar se tiče vpliva privitega steklenega traku. Pri določenih stropnikih smo namreč s konfiguracijo A2 vseeno dosegli večjo nosilnost kot s konfiguracijo B (stropnik 3 in 8). Na velik standardni odmik so ponovno vplivali rezultati stropnika 2.

Tabela 36: Zbrani rezultati upogibnih preizkusov

	Konf.	$EI_{\text{eff}}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{\text{TPR,CLT}}$ [ $\frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ ]	$K_{\text{TPR,s}}$ [ $\frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ ]	$F_{\text{max}}$ [kN]	$\Delta_{E_{\text{eff}}}$ [%]	$\Delta_{F_{\text{max}}}$ [%]
Stropnik 1	A1	3905,97	73,45	492,23	82,63	45,18	6,13
	B	2690,48	59,11		77,86		
Stropnik 2	A2	2571,12	32,81	170,05	10,66	28,55	-80,72
	B	2000,16	40,58		55,3		
Stropnik 3	A2	2285,85	25,13	25,78	32,13	64,07	17,95
	B	1393,25	17,21		27,24		
Stropnik 5	A2-1	2694,86	41,75	24,1	86,89	27,96	-5,41
	A2-2	2436,46	25,95	35,54	35,32	15,69	-61,55
	B	2106,08	23,42		91,86		
Stropnik 6	B-1	2882,67	56,82		73,65		
	B-2	2740,36	66,91		88,79		
Stropnik 7	A1	2697,76	27,68	151646,8	59,7	58,6	4,13
	B	1700,99	18,7		57,33		
Stropnik 8	A2	3451,6	61,1	34,57	45,55	36,14	22,71
	B	2535,4	58,64		37,12		

Tabela 37: Rezultati upogibnih preizkusov različnih konfiguracij stropnikov

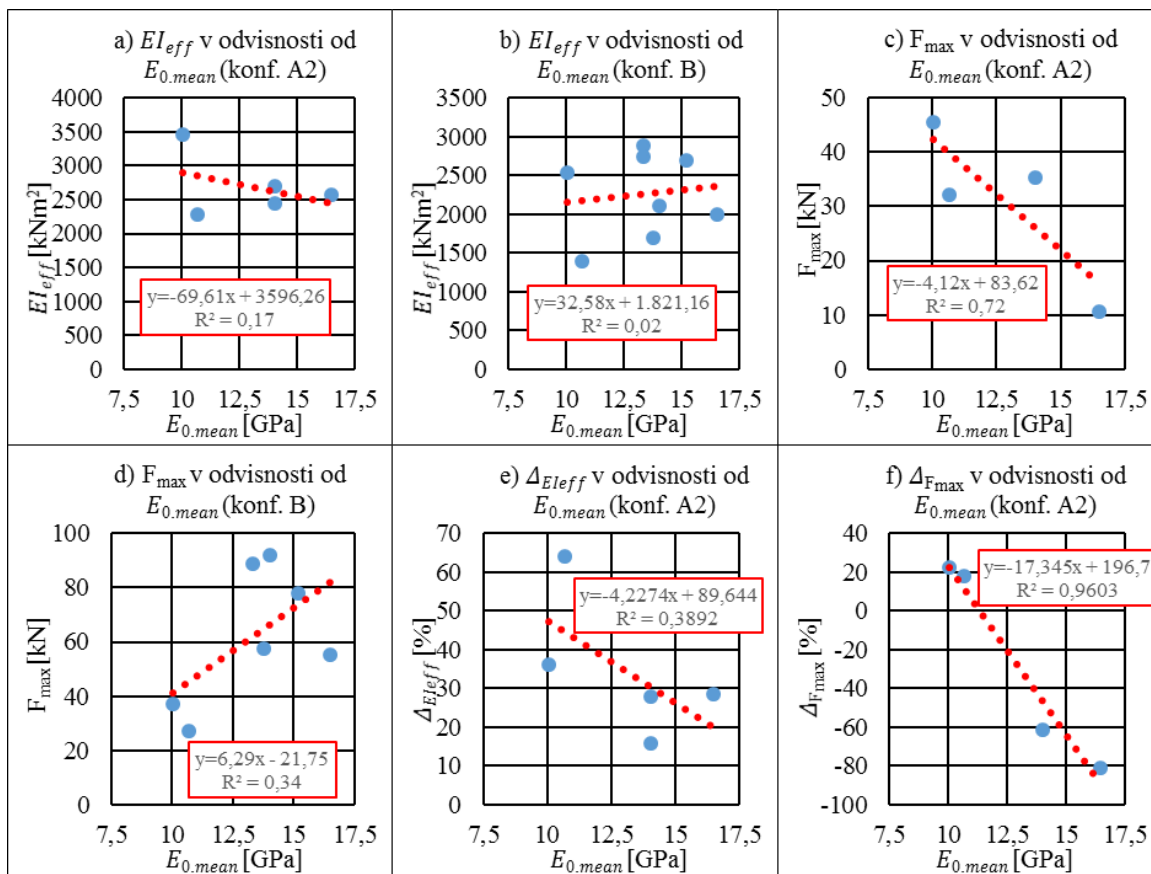
Konf.		$EI_{\text{eff}}$ [kN·m <sup>2</sup> ]	$K_{\text{TPR,CLT}}$ [ $\frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ ]	$K_{\text{TPR,s}}$ [ $\frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ ]	$F_{\text{max}}$ [kN]	$\Delta_{E_{\text{eff}}}$ [%]	$\Delta_{F_{\text{max}}}$ [%]
A1	Povprečje	3301,87	50,57	76069,51	71,17	51,89	5,13
	Standardni odmik	854,33	32,36	106882,41	16,21	9,49	1,41
	Koeficient variacije [%]	25,87	64,01	140,51	22,78	18,29	27,57
A2	Povprečje	2687,98	37,35	58,01	42,11	34,48	-13,35
	Standardni odmik	453,26	14,86	62,84	28,07	18,09	58,39
	Koeficient variacije [%]	16,86	39,79	108,33	66,66	52,46	-437,27
B	Povprečje	2256,17	42,67		63,64		
	Standardni odmik	539,11	20,39		23,51		
	Koeficient variacije [%]	23,89	47,79		36,94		
C	Rezultati za stropnik 4	705,32			15,3		



Slika 86: Povprečne krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsra CLT plošče (b) in zdrsra steklenega traku (c)

Modul elastičnosti ( $E_{0,\text{mean}}$ ) je najpogosteje uporabljen indikator za kvaliteto lesa. Da bi preverili vpliv kvalitete lesa stropnikov na rezultate posameznih konfiguracij, smo določene rezultate vnesli v diagrame tako, da so prikazovali odvisnost od  $E_{0,\text{mean}}$ . Diagrami so na sliki 87. Na diagrame smo s pomočjo programa Microsoft Excel vnesli tudi trendne črte, v rdečih okvirčkih pa so podani enačbe trendnih črt in determinacijski koeficienti ( $R^2$ ). Iz diagramov na slikah 87 a in b sledi zelo nepričakovana odvisnost, in sicer da  $E_{0,\text{mean}}$  ne vpliva na upogibno togost konfiguracij A2 in B (majhna determinacijska koeficienta), kar bi lahko bila posledica poškodovanosti stropnikov oz. je to posledica različnih poškodb stropnikov, ki jih s prostim očesom ne moremo odkriti. Primer rešitve predstavlja uporaba naprave za akustično tomografijo, kot je prikazano v prilogi 12.3. Izrazito večji determinacijski koeficient smo izračunali za odvisnost maksimalne sile ( $F_{\text{max}}$ ) od modula elastičnosti stropnikov za konfiguracijo A2 (slika 87 c), diagram pa kaže, da višji modul elastičnosti stropnikov negativno vpliva na maksimalno silo oz. porušno silo steklenega traku. Drugače je pri konfiguraciji B (slika 87 d), pri kateri višji modul elastičnosti stropnikov pozitivno vpliva na maksimalno silo oz. porušno silo. Za to odvisnost smo izračunali nekoliko manjši determinacijski koeficient. Podoben determinacijski koeficient smo izračunali za odvisnost vpliva stekla na upogibno togost stropnika, ojačanega s CLT ploščo,  $\Delta_{EI_{\text{eff}}}$  (razlika med konfiguracijo A2 in pripadajočo konfiguracijo B) od modula elastičnosti istega stropnika (slika 87 e). Diagram kaže, da je za višje module elastičnosti stropnikov prispevek stekla k upogibni togosti manjši. Največji determinacijski koeficient smo izračunali za odvisnost vpliva stekla na maksimalno silo stropnika, ojačanega s CLT ploščo,  $\Delta_{F_{\text{max}}}$  (razlika med konfiguracijo A2 in pripadajočo konfiguracijo B) od modula elastičnosti istega stropnika (slika 87 f). Diagram kaže, da je za višje module elastičnosti stropnikov porušna sila steklenega traku manjša od porušne sile stropnika, ojačanega le s CLT ploščo. Iz diagrama je razvidno, da obstaja mejna vrednost modula elastičnosti (11,7 MPa), do katere priviti stekleni trak očitno povečuje nosilnost, in nad katero vrednostjo priviti stekleni trak nosilnosti ne povečuje več. Rezultatov za konfiguracijo A1 nismo vnašali v diagrame, saj smo z njo opravili le dva preizkusa, tako da lahko že iz rezultatov iz tabele 36 razberemo morebitne odvisnosti. Glede na to, da je stropnik 1 imel modul elastičnosti enak 15,19 GPa, stropnik 7 pa 13,74 GPa, opazimo, da je prispevek stekla k upogibni togosti  $\Delta_{EI_{\text{eff}}}$  večji za stropnik 7 (z nižjim modulom elastičnosti). Prispevka steklenega traku k nosilnosti  $\Delta_{F_{\text{max}}}$  pa sta zelo podobna za oba stropnika (z različnima moduloma elastičnosti), tako da na podlagi rezultatov ni mogoče trditi, da obstaja odvisnost.

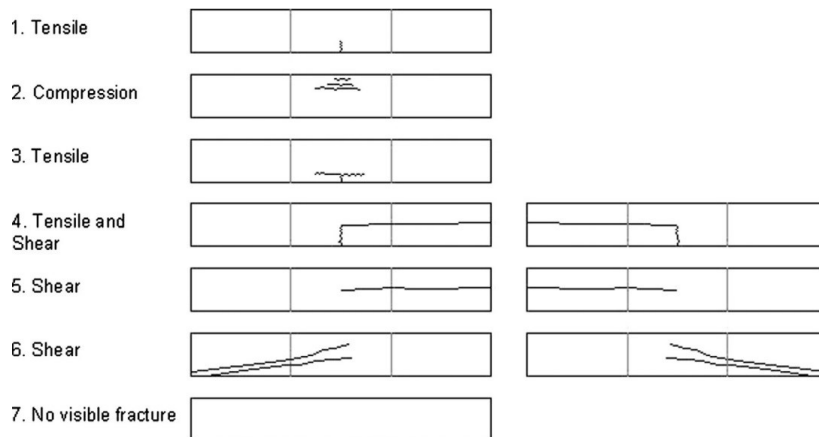




Slika 87: Upogibna togost ( $EI_{eff}$ ), maksimalna dosežena sila ( $F_{max}$ ), sprememba upogibne togosti zaradi steklenega traku ( $\Delta EI_{eff}$ ) in sprememba maksimalne dosežene sile zaradi steklenega traku ( $\Delta F_{max}$ ) v odvisnosti od modula elastičnosti ( $E_{0.mean}$ ) stropnikov (za različne konfiguracije)

Pri konfiguracijah A1 in A2 je do porušitve vedno prišlo zaradi zloma steklenega traku, za konfiguracije B pa načina porušitve na podlagi vizualne ocene stanja po upogibnem preizkusu nismo mogli določiti. Glede na to, da na CLT ploščah po preizkusih ni bilo nobenih novih razpok ali drugih poškodb, lahko trdimo, da so se vse konfiguracije B porušile zaradi porušitve lesenih stropnikov. Stropniki so se po preizkusih konfiguracij B vrnili skoraj v izhodiščni položaj, zaostali pomiki po razbremenitvi so bili namreč vedno manjši od 10 mm. Majhni zaostali pomiki po razbremenitvi so bili v veliki meri posledica oz. učinek nepoškodovanih CLT plošč. Vrnitev v položaj blizu izhodiščnemu je povzročil zaprtje oz. zmanjšanje razpok, nastalih (ali povečanih) med upogibnim preizkusom. To še posebej velja za strižne razpoke, saj so že tako običajno zaprte (glej npr. [131]). Nekoliko boljše sliko o načinu porušitve bi lahko dobili, če bi stropnike obteževali še naprej, torej po dosežku maksimalne sile, kar bi bilo možno, saj so CLT plošče še ohranile svojo nosilnost. Za kaj takšnega bi bili potrebni dosti večji pomiki, česar pa nam uporabljena merilna konfiguracija ni omogočala. Navedeno bomo skušali pojasniti v sklopu analitičnega izračuna (poglavje 7) in numeričnega izračuna (poglavje 8). Način porušitve bi lahko bila še odpoved lesnih vijakov, česar pa iz krivulj zdrsa CLT plošč nismo mogli razbrati. Stropniki so namreč že pred upogibnimi preizkusi imeli zelo veliko razpok, veliko površin je bilo tudi strohnelih, to pa nam je onemogočalo, da bi sledili povečevanju obstoječih razpok in pojavu novih oz. te niso bile vidne. Na odpoved stropnikov sta kazala tudi značilen zvok oz. pokanje in prašenje iz določenih delov stropnikov tik pred

poružitvijo. Z različnimi načini poružitve lesenih stropnikov, ojačanih s polimernimi trakovi na spodnji strani (torej v natezni coni), so se ukvarjali npr. v [132]. Na sliki 88 so prikazani različni načini poružitve, opaženi pri upogibnih preizkusih, večina pa jih je ali nateznih ali strižnih ali pa kombinacija obojih. Če primerjamo razpoke na sliki 88 in razpoke na naših stropnikih (obstoječe že pred upogibnimi preizkusi) ter domnevamo, da so se obstoječe razpoke med upogibnim preizkusom povečevale do poružitve, lahko sklepamo, da so se naši stropniki (konfiguracije B) porušili zaradi kombinacije strižnih in nateznih poružitev. Tlačna poružitve praktično ni bila mogoča, saj je bila na zgornji strani stropnikov privita CLT plošča, pa tudi sicer do tlačne poružitve pri upogibnih preizkusih pride zelo redko (tudi če so stropniki ojačani v natezni coni, glej npr. [132] in [133]).



Slika 88: Načini poružitve lesenih stropnikov, ojačanih s polimernimi trakovi (vir slike: [132])

Ne smemo pozabiti tudi na vpliv lesnih vijakov na širjenje razpok. Vijaki so namreč z zgornje strani (vijaki CLT plošč) stropnikov prodrali 80 mm globoko, pri stropnikih s konfiguracijo A2 pa tudi s spodnje strani (vijaki stika steklo-les), in to približno 100 mm globoko. V [134] je bilo ugotovljeno, da lahko z lesnimi vijaki skoraj izničimo vpliv vzdolžnih razpok na nosilnost razpokanih lesenih nosilcev in da so razpoke na lesenih nosilcih z lesnimi vijaki manjše kot razpoke na lesenih nosilcih brez lesnih vijakov. V našem primeru vijaki sicer niso bili nameščeni po celotni višini stropnikov, kar pomeni, da so lahko obstajale vzdolžne razpoke, na širjenje katerih lesni vijaki niso imeli vpliva.



## 7 ANALITIČNO MODELIRANJE OBNAŠANJA OJAČANIH STROPNIH ELEMENTOV

### 7.1 Analitični model

Jedro analitičnega izračuna predstavljajo izrazi iz standarda [56]. Za izračun efektivne upogibne togosti sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo smo uporabili gama metodo oz. metodo za nosilce s sestavljenimi prečnimi prerezi iz standarda [56], ki se uporablja za izračun upogibne togosti sovprežnih nosilcev s podajnimi veznimi sredstvi.

#### 7.1.1 Efektivna upogibna togost CLT plošče

Pri prerezu CLT plošč gre za sovprežni prerez s podajnimi veznimi sredstvi, ki jih predstavljajo prečni sloji z lastnostmi lesa pravokotno na vlakna. V skladu s [135] so koeficienti togosti priključne ravnine za CLT plošče izračunani s pomočjo enačbe:

$$\gamma_{CLT,i} = \frac{1}{1 + \frac{(\pi^2 \cdot E_{CLT,i} \cdot A_{CLT,i} \cdot d_{i,2})}{I^2 \cdot b_{clt} \cdot G_{R,i,2}}} \quad (26)$$

kjer je  $E_{CLT,i}$  modul elastičnosti i-tega sloja CLT plošče,  $A_{CLT,i}$  prečni prerez i-tega sloja CLT plošče,  $d_{i,2}$  debelina prečnega sloja med i-tim in drugim vzdolžnim slojem CLT plošče,  $G_{R,i,2}$  modul zasučnega striga prečnega sloja med i-tim in drugim vzdolžnim slojem CLT plošče,  $l$  pa razpon. Ta metoda je uporabna za CLT plošče s tremi ali petimi sloji, z razliko, da so vmesni rezultati za plošče s tremi sloji nesimetrični. V obeh primerih je drugi vzdolžni sloj (šteto od zgornjega roba CLT plošče) izbran kot primarni element ( $\gamma_{CLT,2}=1$ ), ostali sloji pa so povezani z njim s podajnimi veznimi sredstvi oz. s prečnimi sloji, ki imajo lastnosti lesa pravokotno na vlakna in so zaradi tega relativno podajni.

Efektivna upogibna togost CLT plošče  $(EI)_{CLT,eff}$  se izračuna z enačbo:

$$(EI)_{CLT,eff} = \sum_{i=1}^N (E_{CLT,i} \cdot I_{CLT,i} + \gamma_{CLT,i} \cdot E_{CLT,i} \cdot A_{CLT,i} \cdot a_{CLT,i}^2) \quad (27)$$

kjer je  $E_{CLT,i}$  modul elastičnosti i-tega sloja CLT plošče,  $A_{CLT,i}$  prečni prerez i-tega sloja CLT plošče,  $a_{CLT,i}$  razdalja med težiščem i-tega vzdolžnega sloja CLT plošče in težiščem sovprežnega prereza CLT plošče,  $I_{CLT,i}$  vztrajnostni moment i-tega vzdolžnega sloja CLT plošče. CLT plošče so iz lesa enega trdnostnega razreda, torej lahko izraz za izračun efektivne upogibne togosti  $(EI)_{CLT,ef}$  uporabimo tudi za izračun efektivnega vztrajnostnega momenta CLT plošče  $(I_{clt,ef})$ , tako da iz izraza izpustimo modul elastičnosti  $E_{CLT,i}$ .

#### 7.1.2 Efektivna upogibna togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo

Koeficient togosti priključne ravnine CLT plošče se izračuna z enačbo:

$$\gamma_{CLT} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{CLT} \cdot A_{CLT,neto} \cdot s_{CLT}}{K_{CLT} \cdot l^2}} \quad (28)$$

kjer je  $E_{CLT}$  modul elastičnosti CLT plošče,  $A_{CLT.neto}$  neto prečni prerez CLT plošče (upoštevani samo njeni vzdolžni sloji),  $s_{CLT}$  razmik med lesnimi vijaki CLT plošče v vzdolžni smeri,  $K_{CLT}$  modul pomika lesnih vijakov CLT plošče (ene vrste v prečni smeri razporejenih lesnih vijakov).

Koeficient togosti priključne ravnine steklenega traku se za lepljeni stik izračuna z enačbo:

$$\gamma_{s.adh} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot A_s \cdot t_{adh}}{l_s^2 \cdot b_{adh} \cdot G_{adh}}} \quad (29)$$

kjer je  $E_s$  modul elastičnosti steklenega traku,  $A_s$  prečni prerez steklenega traku,  $t_{adh}$  debelina sloja adheziva,  $b_{adh}$  njegova širina in  $G_{adh}$  njegov strižni modul,  $l_s$  pa dolžina steklenega traku. Omenjeni princip izračuna koeficienta togosti priključne ravnine za leseno-steklene kompozitne nosilce je uporabljen npr. v [15].

Koeficient togosti priključne ravnine steklenega traku se za točkovni stik izračuna z enačbo:

$$\gamma_{s.v} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot A_s \cdot s_{s.con}}{K_{slip.con} \cdot l_s^2}} \quad (30)$$

kjer je  $E_s$  modul elastičnosti steklenega traku,  $A_s$  njegov prečni prerez,  $s_{s.con}$  razmik med točkovnimi stiki steklenega traku,  $l_s$  njegova dolžina,  $K_{slip.con}$  modul pomika točkovnega stika steklenega traku (izračun je predstavljen v pod poglavju 5.1.8).

Lego težišča prereza stropnika glede na težišče sovprežnega prereza ( $a_1$ ) smo izračunali z enačbo:

$$a_1 = \frac{\gamma_{CLT} \cdot E_{CLT} \cdot A_{CLT.neto} \cdot \frac{h_{CLT} + h_1}{2} \cdot \gamma_s \cdot E_s \cdot A_s \cdot \frac{h_s + h_1}{2}}{\gamma_{CLT} \cdot E_{CLT} \cdot A_{CLT.neto} + \gamma_s \cdot E_s \cdot A_s + E_1 \cdot A_1} \quad (31)$$

kjer je  $\gamma_{CLT}$  koeficient togosti priključne ravnine CLT plošče,  $E_{CLT}$  modul elastičnosti CLT plošče,  $A_{CLT.neto}$  površina prereza vzdolžnih slojev CLT plošče,  $h_{CLT}$  debelina CLT plošče,  $h_1$  višina stropnika,  $\gamma_s$  koeficient togosti priključne ravnine steklenega traku,  $E_s$  modul elastičnosti steklenega traku,  $A_s$  površina njegovega prereza,  $h_s$  njegova debelina. Z  $a_1$  smo izračunali tudi lego težišč steklenega traku ( $a_s$ ) in CLT plošče ( $a_{CLT}$ ) glede na težišče sovprežnega prereza.

Efektivna upogibna togost ( $(EI)_{eff}$ ) sovprežnega prereza se izračuna z enačbo:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^N (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad (32)$$

kjer je  $\gamma_i$  koeficient togosti priključne ravnine i-tega dela sovprežnega prereza (CLT plošča, leseni stropnik ali stekleni trak),  $E_i$  modul elastičnosti i-tega dela sovprežnega prereza,  $A_i$  prečni prerez i-tega sloja sovprežnega prereza,  $a_i$  razdalja med težiščem i-tega dela sovprežnega prereza in težiščem sovprežnega prereza,  $I_i$  vztrajnostni moment i-tega dela sovprežnega prereza.

### 7.1.3 Izračun normalnih napetosti

Normalne napetosti v različnih delih prereza smo izračunali z enačbo:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \pm \frac{E_i \cdot M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \cdot \frac{h_i}{2} \quad (33)$$

kjer je  $\gamma_i$  koeficient togosti priključne ravnine i-tega dela sovprežnega prereza (CLT plošča, leseni stropnik ali stekleni trak),  $E_i$  modul elastičnosti i-tega dela sovprežnega prereza,  $h_i$  debelina i-tega dela sovprežnega prereza,  $a_i$  razdalja med težiščem i-tega dela sovprežnega prereza in težiščem sovprežnega prereza,  $M_{Ed}$  upogibni moment,  $(EI)_{eff}$  efektivna upogibna togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo. Za izračun napetosti na zgornjem robu posameznega dela sovprežnega prereza drugi člen enačbe odštejemo, za izračun napetosti na spodnjem robu pa prištejemo. Prvi člen zgornje enačbe predstavlja konstantno napetostno komponento ( $\sigma_{N,i}$ ), ki po celotnem prerezu dela i povzroča enake tlačne ali natezne napetosti, drugi člen pa predstavlja upogibno komponento ( $\sigma_{M,i}$ ), ki ob pozitivnem upogibnem momentu ( $M_{Ed}$ ) na zgornjem robu prereza dela i povzroča tlačne napetosti, na spodnjem pa natezne napetosti.

### 7.1.4 Izračun strižnih napetosti v CLT plošči in lesenem stropniku

Za izračun maksimalne strižne napetosti v lesenem stropniku ( $\tau_{max,les}$ ) smo uporabili izraz:

$$\tau_{max,les} = \frac{\gamma_{CLT} \cdot E_{CLT} \cdot A_{CLT,neto} \cdot a_{CLT} + E_1 \cdot b_1 \cdot \frac{(h_1 - a_1)^2}{2}}{k_{cr} \cdot b_1 \cdot (EI)_{eff}} \cdot V_{Ed} \quad (34)$$

kjer je  $\gamma_{CLT}$  koeficient togosti priključne ravnine CLT plošče,  $E_{CLT}$  modul elastičnosti CLT plošče,  $A_{CLT,neto}$  neto prečni prerez CLT plošče (upoštevani samo njeni vzdolžni sloji),  $a_{CLT}$  razdalja med težiščem prereza CLT plošče in težiščem sovprežnega prečnega prereza CLT-stropnik-steklo,  $E_1$  modul elastičnosti lesenega stropnika,  $b_1$  širina lesenega stropnika,  $h_1$  njegova višina,  $a_1$  razdalja med težiščem prereza lesenega stropnika in težiščem sovprežnega prečnega prereza CLT-stropnik-steklo,  $k_{cr}$  koeficient vpliva razpok v lesenem stropniku,  $(EI)_{eff}$  efektivna upogibna togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo in  $V_{Ed}$  projektna prečna sila.

Za izračun maksimalne strižne napetosti v CLT plošči ( $\tau_{max,CLT}$ ) smo uporabili izraz:

$$\tau_{max,CLT} = \frac{\gamma_{CLT} \cdot E_{CLT} \cdot A_{CLT,neto} \cdot a_{CLT}}{k_{cr} \cdot b_{CLT} \cdot (EI)_{eff}} \cdot V_{Ed} \quad (35)$$

kjer je  $b_{CLT}$  upoštevana širina CLT plošče,  $\gamma_{CLT}$  koeficient togosti priključne ravnine CLT plošče,  $E_{CLT}$  modul elastičnosti CLT plošče,  $A_{CLT,neto}$  neto prečni prerez CLT plošče (upoštevani samo vzdolžni sloji CLT plošče),  $a_{CLT}$  razdalja med težiščem prereza CLT plošče in težiščem sovprežnega prečnega prereza CLT-stropnik-steklo,  $k_{cr}$  koeficient vpliva razpok v lesenem stropniku,  $(EI)_{eff}$  efektivna upogibna togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-

steklo in  $V_{Ed}$  projektna prečna sila. Maksimalno strižno napetost v CLT plošči smo uporabili za dimenzioniranje na zasučni strig, ki se zgodi v prečnih slojih CLT plošče, kjer so strižne napetosti nekoliko manjše, tako da je naš izračun glede zasučnega striga konzervativen.

### 7.1.5 Izračun sil v veznih sredstvih

Maksimalno silo ( $F_{screw,CLT}$ ) v lesnem vijaku CLT plošče in maksimalno silo v točkovnem stiku steklo-les ( $F_{con.s}$ ) smo izračunali z enačbama:

$$F_{screw,CLT} = \frac{\gamma_{CLT} \cdot E_{CLT} \cdot A_{CLT,neto} \cdot a_{CLT} \cdot s_{CLT}}{(EI)_{eff} \cdot n_{per}} \cdot V_{Ed} \quad (36)$$

$$F_{con.s} = \frac{\gamma_s \cdot E_s \cdot A_s \cdot a_s \cdot s_s}{(EI)_{eff}} \cdot V_{Ed} \quad (37)$$

kjer je  $\gamma_i$  koeficient togosti priključne ravnine i-tega dela sovprežnega prereza,  $E_i$  modul elastičnosti i-tega dela sovprežnega prereza,  $A_i$  prečni prerez i-tega dela sovprežnega prereza,  $a_i$  razdalja med težiščem i-tega dela sovprežnega prereza in težiščem sovprežnega prereza,  $s_i$  vzdolžni razmik med vijaki CLT plošče ali med točkovnimi stiki steklo-les,  $(EI)_{eff}$  efektivna upogibna togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo,  $n_{per}$  število vrst lesenih vijakov v prečni smeri in  $V_{Ed}$  projektna prečna sila.

Strižnih napetosti v adhezivu nismo računali, saj je strižna nosilnost lepljenega stika dokazana s kontrolo strižne nosilnosti lesenega stropnika (glej poglavje 4).

### 7.1.6 Izračun nosilnosti in modula pomikov lesenih vijakov

Za točkovni stik steklo-les smo izraze za modul pomikov in nosilnost razvili v podpoglavju 5.1.8, tukaj pa podajamo izraze za modul pomikov in nosilnost lesenih vijakov CLT plošče. Uporabili smo enak računski pristop kot je predstavljen v [5, 45, 47], tako da sta modul pomika in nosilnost lesnega vijaka izračunana kot kombinacija obnašanja lesnega vijaka ob strižni in osni obremenitvi.

Karakteristični upogibni moment tečenja lesnega vijaka ( $M_{y,k}$ ) se izračuna z enačbo:

$$M_{y,k} = 0.15 \cdot 600 \text{MPa} \cdot d_{screw}^{2.6} \quad (38)$$

kjer je  $d_{screw}$  premer lesnega vijaka v milimetrih. V izračunu se za izraz  $d_{screw}^{2.6}$  (v katerega vstavimo premer lesnega vijaka v mm) upošteva enota  $\text{mm}^3$ , tako da je enota  $M_{y,k}$  enaka  $\text{Nmm}$ .

Karakteristična izvlečna nosilnost lesenega vijaka ( $F_{ax,Rk}$ ) se izračuna z enačbo:

$$F_{ax,Rk} = \frac{n_{per,eff}}{n_{per}} \frac{12 \cdot d_{screw} \cdot \min(l_{ef,pen,les} \cdot \frac{\rho_{k,l}}{350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}, l_{ef,pen,CLT} \cdot \frac{\rho_{k,CLT}}{350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}})}{1.2 \cdot (\cos \alpha_{hor})^2 + (\sin \alpha_{hor})^2} \quad (39)$$

kjer je  $n_{per,eff}$  efektivno število vrst lesenih vijakov v prečni smeri,  $n_{per}$  dejansko število vrst lesenih vijakov v prečni smeri,  $l_{ef,pen,les}$  efektivna sidrna dolžina lesenih vijakov v lesenem

stropniku,  $l_{ef,pen,CLT}$  efektivna sidrna dolžina lesnih vijakov v CLT plošči,  $\alpha_{hor}$  kot med osjo lesnega vijaka in smerjo lesnih vlaken,  $\rho_{k,l}$  karakteristična gostota lesa stropnika in  $\rho_{k,CLT}$  karakteristična gostota CLT plošče.

Efektivno število vrst lesnih vijakov v prečni smeri ( $n_{per,eff}$ ) izračunamo z:

$$n_{per,eff} = \max(n_{per}^{0,9}, 0,9 \cdot n_{per}) \quad (40)$$

Karakteristična bočna trdnost lesnih vijakov v CLT plošči ali lesenem stropniku ( $f_{h,k,i}$ ) se izračuna z enačbo:

$$f_{h,k,i} = \frac{0,082 \cdot d_{screw}^{-0,3} \cdot \rho_{k,i}}{2,5 \cdot (\cos \alpha_{hor})^2 + (\sin \alpha_{hor})^2} \quad (41)$$

Modul pomika pravokotno na os lesnega vijaka ( $K_{ser,per}$ ) se izračuna z enačbo:

$$K_{ser,per} = \frac{\rho_{m,eff}^{1,5} \cdot d_{screw,eff}}{23} \quad (42)$$

kjer je  $\rho_{m,eff}$  efektivna povprečna gostota CLT plošče in lesenega stropnika, ki se izračuna z enačbo  $\rho_{m,eff} = \sqrt{\rho_{m,CLT} \cdot \rho_{m,l}}$  ( $\rho_{m,CLT}$  je povprečna gostota CLT plošče,  $\rho_{m,l}$  je povprečna gostota lesenega stropnika),  $d_{screw,eff}$  efektivni premer lesnega vijaka (enak 1,1-kratniku premera jedra lesnega vijaka).

Modul pomika vzporedno z osjo lesnega vijaka se izračuna z enačbo:

$$K_{ser,axial} = \left( \frac{1}{25 \cdot d_{screw,eff} \cdot l_{ef,pen,les}} + \frac{1}{25 \cdot d_{screw,eff} \cdot l_{ef,pen,CLT}} \right)^{-1} \quad (43)$$

kjer je  $d_{screw,eff}$  efektivni premer lesnega vijaka (enak 1,1-kratniku premera jedra lesnega vijaka),  $l_{ef,pen,les}$  efektivna sidrna dolžina lesnih vijakov v lesenem stropniku,  $l_{ef,pen,CLT}$  efektivna sidrna dolžina lesnih vijakov v CLT plošči.

Modul pomika ( $K_{ser}$ ) lesnih vijakov (ene vrste v prečni smeri razporejenih lesnih vijakov) smo izračunali kot kombinacijo modula pomika prečno in vzporedno z osjo lesnega vijaka:

$$K_{ser} = n_{per} (K_{ser,per} \cdot \cos \alpha_{ver} \cdot ((\cos \alpha_{ver}) - \mu_{fr,clt} \cdot \sin \alpha_{ver}) + K_{ser,axial} \cdot \sin \alpha_{ver} \cdot (\sin \alpha_{ver} + \mu_{fr,CLT} \cdot \cos \alpha_{ver})) \quad (44)$$

kjer je  $\alpha_{ver}$  kot med osjo lesnega vijaka in vertikalno smerjo in  $\mu_{fr,CLT}$  koeficient trenja med lesenimi elementi (enak 0,25).

Podoben pristop kombinacije osne ( $F_{ax,Rk}$ ) in prečne nosilnosti ( $F_{per,Rk,JFM}$ ) lesnih vijakov uporabimo tudi za izračun nosilnosti poševno nameščenega lesnega vijaka ( $F_{Rk,JFM}$ ). Prečna nosilnost lesnih vijakov ( $F_{per,Rk,JFM}$ ) je izračunana za vsako Johansenovo porušno obliko, tako da smo tudi nosilnosti poševno nameščenega lesnega vijaka ( $F_{Rk,JFM}$ ) izračunali za vsako Johansenovo porušno obliko (kratica JFM):

$$F_{Rk.JFM} = F_{ax.Rk} \cdot (\mu_{fr.clt} \cdot \cos \alpha_{ver} + \sin \alpha_{ver}) + F_{per.Rk.JFM} \cdot \cos \alpha_{ver} \cdot (1 - \mu_{fr.clt} \cdot \tan \alpha_{ver}) \quad (45)$$

Izrazi za prečne nosilnosti lesnih vijakov posameznih Johansenovih porušnih oblik se glasijo:

$$F_{per.Rk.a} = f_{h.k.CLT} \cdot l_{ef.pen.CLT} \cdot d_{screw.eff} \quad (46)$$

$$F_{per.Rk.b} = f_{h.k.l} \cdot l_{ef.pen.les} \cdot d_{screw.eff} \quad (47)$$

$$F_{per.Rk.c} = \frac{f_{h.k.CLT} \cdot t_{CLT} \cdot d_{screw.eff}}{(1+\beta) \cdot \cos \alpha_{ver}} \cdot \left( \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_{les}}{t_{CLT}} + \left(\frac{t_{les}}{t_{CLT}}\right)^2\right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_{les}}{t_{CLT}}\right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_{les}}{t_{CLT}}\right) \right) \quad (48)$$

$$F_{per.Rk.d} = \frac{f_{h.k.CLT} \cdot t_{CLT} \cdot d_{screw.eff}}{(2+\beta) \cdot \cos \alpha_{ver}} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2+\beta) \cdot M_{y.k}}{f_{h.k.CLT} \cdot d_{screw.eff} \cdot l_{ef.pen.CLT}^2}} - \beta \right) \quad (49)$$

$$F_{per.Rk.e} = \frac{f_{h.k.CLT} \cdot t_{les} \cdot d_{screw.eff}}{(1+2 \cdot \beta) \cdot \cos \alpha_{ver}} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1+2 \cdot \beta) \cdot M_{y.k}}{f_{h.k.CLT} \cdot d_{screw.eff} \cdot l_{ef.pen.les}^2}} - \beta \right) \quad (50)$$

$$F_{per.Rk.f} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1+\beta} \cdot 2 \cdot M_{y.k} \cdot f_{h.k.CLT} \cdot d_{screw.eff}} \quad (51)$$

kjer je  $\beta$  razmerje med bočnima trdnostma v lesenem stropniku in CLT plošči ( $\beta = \frac{f_{h.k.l}}{f_{h.k.CLT}}$ ),  $t_{les}$  globina lesnega vijaka v lesenem stropniku (pravokotno glede na os stropnika),  $t_{CLT}$  pa debelina CLT plošče.

### 7.1.7 Izračun pomika in zdrsov CLT plošče ter steklenega traku

Pomik na sredini razpona smo izračunali z integracijo produkta funkcije poteka upogibnih momentov obtežbe ( $M_{Ed}(x)$ ) in funkcije poteka momentov zaradi virtualne enotske sile na sredini razpona ( $M_{virt}(x)$ ):

$$u = \int_0^l \frac{M_{virt}(x) \cdot M_{Ed}(x)}{(EI)_{eff}} dx \left( + \int_0^l \frac{V_{virt}(x) \cdot V_{Ed}(x)}{(GA)_{eff}} dx \right) \quad (52)$$

V splošnem k pomiku nosilca prispevajo tudi strižne deformacije (drugi člen enačbe 52), ki pa smo se jih odločili zanemariti, saj imajo obravnavani nosilci visoke količnike razpona in višine prereza.

Zdrse med CLT ploščo in lesenim stropnikom ( $\Delta_{CLT}$ ) ter med stropnikom in steklenim trakom ( $\Delta_s$ ) smo izračunali z enačbama:

$$\Delta_{CLT} = \int_0^l (\varepsilon_{CLT.sp}(x) - \varepsilon_{l.zg}(x)) dx \quad (53)$$

$$\Delta_s = \int_0^l (\varepsilon_{l.sp}(x) - \varepsilon_{s.zg}(x)) dx \quad (54)$$

kjer je  $\varepsilon_{CLT.sp}(x)$  funkcija poteka normalnih deformacij na spodnjem robu CLT plošče,  $\varepsilon_{l.zg}(x)$  funkcija poteka normalnih deformacij na zgornjem robu stropnika,  $\varepsilon_{l.sp}(x)$  funkcija poteka normalnih deformacij na spodnjem robu stropnika,  $\varepsilon_{s.zg}(x)$  funkcija poteka normalnih deformacij na zgornjem robu steklenega traku.

Funkcije poteka normalnih deformacij v različnih delih prereza smo izračunali z enačbo:

$$\varepsilon_i(x) = \frac{\gamma_i \cdot a_i \cdot M_{Ed}(x)}{(EI)_{eff}} \pm \frac{M_{Ed}(x)}{(EI)_{eff}} \cdot \frac{h_i}{2} \quad (55)$$

kjer je  $\gamma_i$  koeficient togosti priključne ravnine i-tega dela sovprežnega prereza (CLT plošča, leseni stropnik ali stekleni trak),  $h_i$  debelina i-tega dela sovprežnega prereza,  $a_i$  razdalja med težiščem i-tega dela sovprežnega prereza in težiščem sovprežnega prereza,  $M_{Ed}(x)$  funkcija poteka upogibnih momentov,  $(EI)_{eff}$  efektivna upogibna togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo oz. sovprežnega nosilca CLT-stropnik. Za izračun deformacij na zgornjem robu posameznega dela sovprežnega prereza drugi člen enačbe odštejemo, za izračun deformacij na spodnjem robu pa prištejemo.

### 7.1.8 Upoštevanje različnih mejnih stanj

Pri izračunu za različna mejna stanja ULS (mejno stanje nosilnosti) in SLS (mejno stanje uporabnosti) se uporabljata različna modula pomikov. Za mejno stanje uporabnosti je modul pomika ( $K_{i,u}$ ) enak

$$K_{i,u} = \frac{2}{3} \cdot K_{i,ser} \quad (56)$$

kjer je  $K_{i,ser}$  modul pomika za mejno stanje uporabnosti in se izračuna z izrazi v podpoglavju 7.1.6.

Mejni stanji razdelimo še na stanji pred lezenjem lesa in potem. Tako modul elastičnosti lesenega stropnika  $E_{l,u,fin}$  in CLT plošče  $E_{CLT,u,fin}$  po lezenju za mejno stanje nosilnosti izračunamo z enačbo:

$$E_{i,u,fin} = \frac{E_{i,mean}}{1+k_{def,i}} \quad (57)$$

kjer je  $E_{i,mean}$  modul elastičnosti CLT plošče ali lesenega stropnika pred lezenjem,  $k_{def,i}$  pa je deformacijski faktor CLT plošče ali lesenega stropnika.

Modul elastičnosti lesenega stropnika  $E_{l,u,fin}$  in CLT plošče  $E_{CLT,u,fin}$  po lezenju za mejno stanje uporabnosti izračunamo z enačbo:

$$E_{i,ser,fin} = \frac{E_{i,mean}}{1+\psi_2 \cdot k_{def,i}} \quad (58)$$

kjer je  $E_{i,mean}$  modul elastičnosti CLT plošče ali lesenega stropnika pred lezenjem,  $k_{def,i}$  deformacijski faktor CLT plošče ali lesenega stropnika,  $\psi_2$  pa kombinacijski faktor, ki upošteva vpliv trajanja obtežbe.

Moduli pomika po izvedenem lezenju za mejno stanje nosilnosti ( $K_{CLT,u,fin}$  in  $K_{s,u,fin}$ ) in mejno stanje uporabnosti ( $K_{CLT,ser,fin}$  in  $K_{s,ser,fin}$ ) se izračunajo z enačbami:

$$K_{CLT,u,fin} = \frac{K_{CLT,u}}{1 + \psi_2 \cdot 2 \cdot \sqrt{k_{def,CLT} \cdot k_{def,l}}}, \quad (59)$$

$$K_{CLT,ser,fin} = \frac{K_{CLT,ser}}{1 + 2 \cdot \sqrt{k_{def,CLT} \cdot k_{def,l}}}, \quad (60)$$

$$K_{s,u,fin} = \frac{K_{s,u}}{1 + \psi_2 \cdot k_{def,l}}, \quad (61)$$

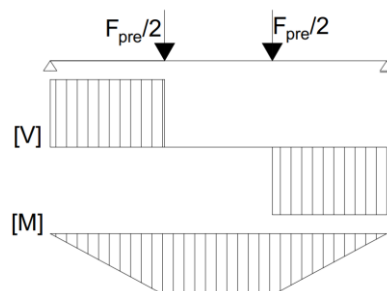
$$K_{s,ser,fin} = \frac{K_{s,ser}}{1 + k_{def,l}}. \quad (62)$$

## 7.2 Analitični izračuni preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov

Analitični izračuni preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov so bili nastavljeni tako, da smo izračunali nosilnost posamezne konfiguracije ( $F_{pre}$ ). Nosilnost oz. maksimalna sila je enaka vsoti dveh sil, ki delujeta na tretjinah razpona pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu oz. je v smislu štiritočkovnega upogibnega preizkusa enaka sili v hidravličnem cilindru, s katerim smo obremenjevali preizkušance. Za obremenitev, enako nosilnosti, smo izvedli dimenzioniranje s karakterističnimi trdnostmi oz. nosilnostmi in za obtežbo brez varnostnih faktorjev. Izračune smo izvedli z moduli pomikov za mejno stanje nosilnosti (ULS) in mejno stanje uporabnosti (SLS). Razlika med izračunoma prikazuje vpliv modula pomika na nosilnost sovprežnega nosilca CLT-les-steklo (konfiguraciji A1 in A2) oz. sovprežnega nosilca CLT-les (konfiguracija B). V splošnem velja, da bi za upogibno togost morali upoštevati modul pomika za mejno stanje SLS, za nosilnost pa modul pomika za mejno stanje ULS. Za stropnike smo upoštevali mehanske lastnosti iz tabele 24, za CLT ploščo, lesne vijake, stekleni trak in adheziv pa smo lastnosti definirali v podpoglavju 6.1. Upoštevali smo povprečne dimenzije prečnih prereзов stropnikov iz tabele 21: .

Štiritočkovni upogibni preizkus rezultira v takšni razporeditvi notranjih statičnih količin, v kakršni mesto maksimalnih strižnih sil in mesto maksimalnega upogibnega momenta sovpadata (slika 89). Mesto maksimalne napetosti v steklenem traku ob uporabi točkovnega stika (konfiguracija A2) je na tretjinah razpona oz. v neposredni bližini.





Slika 89: Notranje statične količine (V – prečne sile, M – upogibni momenti) pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu (sili  $F_{pre}/2$  delujeta na tretjinah razpona)

Rezultati z moduli pomika za mejno stanje uporabnosti so prikazani v tabeli 38, rezultati z moduli pomika za mejno stanje nosilnosti pa v tabeli 39.

V tabelah 38 in 39 smo podali tudi izračunane vrednosti izkoriščenosti različnih trdnosti oz. nosilnost sestavnih delov sovprežnih nosilcev. Tako smo izkoriščenost natezno-upogibne trdnosti stropnika na spodnjem robu ( $Iz_{les.sp}$ ) izračunali z enačbo:

$$Iz_{les.sp} = \frac{\sigma_{l.N}}{f_{t.0.k.l}} + \frac{\sigma_{l.M}}{f_{m.0.k.l}} \quad (63)$$

Izkoriščenost strižne trdnosti lesenih stropnikov ( $Iz_{les.strig}$ ) smo izračunali z enačbo:

$$Iz_{les.strig} = \frac{\tau_{max.les}}{f_{v.0.k.l}} \quad (64)$$

Izkoriščenost tlačno-upogibne trdnosti na zgornjem robu CLT plošče ( $Iz_{CLT.zg}$ ) smo izračunali z enačbo:

$$Iz_{CLT.zg} = \left( \frac{\sigma_{CLT.N}}{f_{c.0.k.l}} \right)^2 + \frac{\sigma_{CLT.M}}{f_{m.0.k.l}} \quad (65)$$

Izkoriščenost zasučne strižne trdnosti v CLT plošči ( $Iz_{CLT.strig}$ ) smo izračunali z enačbo:

$$Iz_{CLT.strig} = \frac{\tau_{max.CLT}}{f_{v.R.k}} \quad (66)$$

Izkoriščenost upogibne trdnosti v steklenem traku ( $Iz_s$ ) smo izračunali z enačbo:

$$Iz_s = \frac{\max(\sigma_{s.sp}, \sigma_{s.1001}, \sigma_{s.1002}, \sigma_{s.1003}, \sigma_{s.1004}, \sigma_{s.1005})}{f_{b.k}} \quad (67)$$

Izkoriščenost nosilnosti lesnih vijakov CLT plošče ( $Iz_{screw.CLT}$ ) smo izračunali z enačbo:

$$Iz_{screw.CLT} = \frac{F_{screw.CLT}}{F_{Rk.JFM}} \quad (68)$$

Kot rezultate podajamo tudi obliko porušitve lesnih vijakov CLT plošče po Johansenu ( $JFM_{CLT}$ ).

Izkoriščenost nosilnosti lesnih vijakov v točkovnem stiku steklo-les ( $Iz_{con.s}$ ) smo izračunali z enačbo:

$$I_{z_{con.s}} = \frac{F_{con.s}}{F_{con.s.Rk}} \quad (69)$$

Kot rezultate podajamo tudi obliko porušitve lesnih vijakov točkovnega stika steklo-les po Johansenu ( $JFM_{s,ST}$  – strižno in natezno obremenjeni lesni vijak,  $JFM_{s,S}$  – strižno obremenjeni lesni vijak).

Tabela 38: Rezultati analitičnih izračunov preizkušenih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za SLS)

SLS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$(EI)_{eff}$ [kNm <sup>2</sup> ]	5789,43	3883,89	5087,92	3999,42	4657,25	3387,99	1247,28	5174,30	4003,63	3784,98	5353,95	3465,18	4467,71	3098,52
$(EI)_{eff,BS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3883,89		3999,42		3387,99			4003,63			3465,18		3098,52	
$\Delta_{CLT}$ [mm]	0,78	0,98	0,79	0,75	0,75	0,97		0,80	0,97	1,03	0,70	0,92	0,70	0,95
$\Delta_s$ [mm]	0,00		0,66		0,72			0,70			0,00		0,65	
$u$ [mm]	15,72	24,06	18,47	19,71	17,31	26,45	41,45	17,86	24,25	24,92	15,87	26,01	16,67	27,97
$F_{pre}$ [kN]	56,28	57,79	58,12	48,74	49,85	55,42	31,97	57,12	60,03	58,32	52,52	55,74	46,04	53,59
$K_s$ [kN/mm]	12,05		12,23		12,46			12,40		13,02	12,68		12,91	
$K_{CLT}$ [kN/mm]	14,01	14,01	14,05	14,05	14,12	14,12		14,10	14,10	14,26	14,18	14,18	14,24	14,24
$\gamma_s$	1,00		0,57		0,57			0,57			1,00		0,58	
$\gamma_{CLT}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42		0,42	0,42	0,43	0,42	0,42	0,42	0,42
$\sigma_{les,N}$ [MPa]	1,49	5,91	2,87	4,83	2,23	5,53	0,00	2,52	5,45	5,80	1,48	6,28	2,23	6,20
$\sigma_{les,M}$ [MPa]	11,26	17,24	14,13	15,08	8,74	13,36	22,78	11,91	16,17	15,83	10,02	16,43	7,94	13,33
$\sigma_{CLT,zg}$ [MPa]	-6,39	-8,68	-7,18	-7,17	-6,61	-9,17		-6,99	-8,83	-8,95	-6,35	-9,11	-6,29	-9,41
$\tau_{max,les}$ [MPa]	1,07	1,18	1,12	0,99	0,83	0,99	1,17	1,00	1,11	1,12	0,99	1,14	0,83	1,04
$\sigma_{CLT,sp}$ [MPa]	-1,58	-1,31	-1,53	-1,14	-1,31	-1,07		-1,53	-1,41	-1,32	-1,50	-1,15	-1,19	-0,85
$\tau_{max,CLT}$ [MPa]	0,14	0,13	0,14	0,11	0,13	0,14		0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,14
$\sigma_{s,zg}$ [MPa]	58,75		39,49		39,81			39,71			58,55		39,92	
$\sigma_{s,sp}$ [MPa]	63,86		45,49		45,43			45,50			63,70		45,33	
$I_{z_{les,sp}}$	0,51	1,00	0,82	1,00	0,54	0,98	1,00	0,57	0,89	0,91	0,46	0,99	0,39	0,80
$I_{z_{les,strig}}$	0,38	0,42	0,45	0,40	0,33	0,39	0,49	0,36	0,40	0,40	0,36	0,41	0,28	0,35
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,29	0,39	0,33	0,32	0,30	0,41		0,32	0,40	0,40	0,29	0,41	0,28	0,42
$I_{z_{CLT,strig}}$	0,19	0,18	0,18	0,15	0,18	0,19		0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,17	0,19
$I_{z_s}$	0,53		1,00		1,00			1,00			0,53		1,00	
$F_{screw,CLT}$ [kN]	-4,09	-4,00	-4,07	-3,32	-3,86	-4,10		-4,01	-4,10	-4,11	-4,10	-4,10	-3,75	-4,11
$F_{Rk,JFM}$ [kN]	4,09	4,09	4,09	4,09	4,10	4,10		4,10	4,10	4,11	4,10	4,10	4,11	4,11
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,00	0,98	0,99	0,81	0,94	1,00		0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F		F	F	F	F	F	F	F
$F_{con.s}$ [kN]			6,80		6,82			6,82					6,82	
$F_{con.s,Rk}$ [kN]			9,60		9,93			9,84					10,54	
$JFM_{s,ST}$			E		E			E					E	
$JFM_{s,S}$			E		E			E					E	
$I_{z_{con.s}}$			0,71		0,69			0,69					0,65	
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]			120,00		119,78			120,00					119,48	

SLS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]			60,62		60,72			60,73					60,68	
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]			74,48		74,64			74,65					74,62	
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]			119,67		120,00			119,97					120,00	
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]			98,10		98,37			98,35					98,38	

Tabela 39: Rezultati analitičnih izračunov preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za ULS)

ULS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	5238,92	3511,14	4449,04	3618,62	4024,20	3062,22	1247,28	4514,08	3621,28	3422,46	4833,55	3131,00	3843,71	2805,23
$(EI)_{\text{eff,BS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3511,14		3618,62		3062,22			3621,28			3131,00		2805,23	
$\Delta_{\text{CLT}}$ [mm]	1,17	1,29	1,17	0,98	1,13	1,34		1,20	1,43	1,52	1,05	1,24	1,05	1,43
$\Delta_s$ [mm]	0,00		0,97		1,07			1,04			0,00		0,97	
$u$ [mm]	19,22	25,70	22,78	21,02	21,44	28,93	41,45	22,02	28,96	29,41	19,31	28,23	20,67	33,12
$F_{\text{prel}}$ [kN]	62,25	55,81	62,66	47,03	53,35	54,78	31,97	61,45	64,85	62,24	57,70	54,66	49,12	57,45
$K_s$ [kN/mm]	8,04		8,15		8,31			8,26		8,68	8,45		8,60	
$K_{\text{CLT}}$ [kN/mm]	9,34	9,34	9,37	9,37	9,41	9,41		9,40	9,40	9,51	9,45	9,45	9,49	9,49
$\gamma_s$	1,00		0,46		0,47			0,47			1,00		0,48	
$\gamma_{\text{CLT}}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\sigma_{\text{les,N}}$ [MPa]	0,97	5,21	2,86	4,22	2,27	5,05	0,00	2,52	5,36	5,68	0,98	5,67	2,30	6,20
$\sigma_{\text{les,M}}$ [MPa]	13,77	18,42	17,43	16,08	10,83	14,61	22,78	14,68	19,31	18,68	12,19	17,83	9,85	15,78
$\sigma_{\text{CLT,zg}}$ [MPa]	-6,92	-8,33	-7,80	-6,85	-7,25	-9,11		-7,60	-9,47	-9,53	-6,88	-8,94	-6,93	-10,20
$\tau_{\text{max,les}}$ [MPa]	1,24	1,19	1,28	1,00	0,93	1,01	1,17	1,13	1,25	1,24	1,14	1,16	0,92	1,14
$\sigma_{\text{CLT,sp}}$ [MPa]	-1,04	-0,47	-0,83	-0,42	-0,69	-0,25		-0,86	-0,61	-0,53	-0,97	-0,30	-0,61	-0,06
$\tau_{\text{max,CLT}}$ [MPa]	0,14	0,12	0,13	0,10	0,13	0,13		0,13	0,13	0,13	0,14	0,12	0,12	0,14
$\sigma_{s,zg}$ [MPa]	67,89		38,01		38,47			38,27			67,09		38,74	
$\sigma_{s,sp}$ [MPa]	74,13		45,40		45,43			45,42			73,36		45,45	
$I_{z_{\text{les,sp}}}$	0,57	1,00	0,96	1,00	0,63	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	0,51	1,00	0,46	0,88
$I_{z_{\text{les,strig}}}$	0,44	0,42	0,51	0,40	0,37	0,40	0,49	0,40	0,45	0,44	0,41	0,41	0,31	0,38
$I_{z_{\text{CLT,zg}}}$	0,31	0,37	0,35	0,31	0,33	0,41		0,34	0,43	0,43	0,31	0,40	0,31	0,46
$I_{z_{\text{CLT,strig}}}$	0,19	0,16	0,18	0,13	0,17	0,17		0,18	0,18	0,18	0,19	0,17	0,17	0,19
$I_z$	0,62		1,00		1,00			1,00			0,61		1,00	
$F_{\text{screw,CLT}}$ [kN]	-4,09	-3,52	-3,95	-2,91	-3,77	-3,75		-3,90	-4,03	-4,02	-4,10	-3,70	-3,67	-4,11
$F_{\text{Rk,JFM}}$ [kN]	4,09	4,09	4,09	4,09	4,10	4,10		4,10	4,10	4,11	4,10	4,10	4,11	4,11
$I_{z_{\text{screw,CLT}}}$	1,00	0,86	0,97	0,71	0,92	0,91		0,95	0,98	0,98	1,00	0,90	0,89	1,00
$\text{JFM}_{\text{CLT}}$	F	F	F	F	F	F		F	F	F	F	F	F	F
$F_{\text{con,s}}$ [kN]			6,67		6,71			6,70					6,74	
$F_{\text{con,s,Rk}}$ [kN]			9,60		9,93			9,84					10,54	
$\text{JFM}_{s,ST}$			E		E			E					E	
$\text{JFM}_{s,S}$			E		E			E					E	
$I_{z_{\text{con,s}}}$			0,70		0,68			0,68					0,64	

ULS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]			120,00		120,00			120,00					120,00	
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]			59,80		60,05			59,94					60,20	
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]			73,32		73,68			73,52					73,89	
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]			117,56		118,22			117,93					118,60	
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]			96,35		96,90			96,66					97,21	

Tako rezultati z moduli pomika za SLS (tabela 38) in ULS (tabela 39) za konfiguracijo A1 kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih najprej do porušitve vijalne zveze CLT-stropnik. Drugo najvišjo vrednost izkoriščenosti smo izračunali za upogibno trdnost steklenega traku, tretjo pa za trdnost stropnika na spodnjem, nateznem robu prereza.

Rezultati z moduli pomika za SLS (tabela 38) in ULS (tabela 39) za konfiguracijo A2 kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih najprej do porušitve steklenega traku. Drugo najvišjo vrednost izkoriščenosti smo izračunali za nosilnost vijalne zveze CLT-stropnik, tretjo pa za nosilnost vijakov v točkovnih stikih steklo-les.

Rezultati z moduli pomika za SLS (tabela 38) za konfiguracijo B kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih najprej do porušitve vijalne zveze CLT-stropnik ali do porušitve lesenega stropnika na spodnjem robu. Rezultati z moduli pomika za ULS (tabela 39) za konfiguracijo B pa kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih najprej do porušitve lesenega stropnika na spodnjem robu.

Rezultati z moduli pomika za SLS (tabela 38) za konfiguracijo A2 kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih do porušitve steklenega traku na kritičnem območju 1001 ali 1004. Rezultati z moduli pomika za ULS (tabela 39) pa kažejo, da pride do porušitve steklenega traku vedno na kritičnem območju 1001. Pojav lahko obrazložimo s tem, da uporaba modulov pomika za ULS rezultira v manjših vrednostih koeficienta togosti priključne ravnine in posledično prihaja (pri isti sili) do večje upogibne obremenjenosti steklenega traku kot natezne obremenjenosti. Ravno za upogibno obremenitev (OBT 2, podpoglavje 5.2) pa ima območje 1001 največji faktor koncentracij napetosti.

V tabeli 40 so navedeni izračuni razlike med konfiguracijami B in A1 oz. med B in A2. Izračunane razlike prikazujejo vpliv steklenega traku na nosilnost in togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo.

Tabela 40: Primerjava med konfiguracijami posameznih stropnikov oz. vpliv stekla na upogibno togost in nosilnost stropnikov – analitični izračun

		S 1. B - S 1. A1	S 2. B - S 2. A2	S 3. B - S 3. A2	S 5. B - S 5. A2	S 7. B - S 7. A1	S 8. B - S 8. A2
SLS	$\Delta_{E_{\text{eff}}}$ [%]	49,06	27,22	37,46	29,24	54,51	44,19
	$\Delta_{F_{\text{max}}}$ [%]	-2,61	19,24	-10,05	-4,85	-5,78	-14,09
ULS	$\Delta_{E_{\text{eff}}}$ [%]	49,21	22,95	31,41	24,65	54,38	37,02
	$\Delta_{F_{\text{max}}}$ [%]	11,54	33,24	-2,61	-5,24	5,56	-14,51

V tabeli 40 vidimo, da je za konfiguraciji A1 vpliv steklenega traku na upogibno togost ( $EI_{\text{eff}}$ ) sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo neodvisen od uporabe modula za SLS ali ULS. Drugače pa je pri nosilnosti ( $F_{\text{max}}$ ), saj vidimo, da pri uporabi modula pomika za SLS stekleni trak ne prispeva k večji nosilnosti oz. pride do porušitve pred doseženo silo, enako nosilnosti pripadajoče konfiguracije B. Pri uporabi modula pomika za ULS pa stekleni trak prispeva k večji nosilnosti oz. pride do porušitve pri večji sili, kot je nosilnost pripadajoče konfiguracije B.

V tabeli 40 vidimo tudi, da je za konfiguracije A2 vpliv steklenega traku na upogibno togost ( $EI_{\text{eff}}$ ) sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo večji pri uporabi modula za SLS kot pri uporabi modula za ULS. Pri nosilnosti ( $F_{\text{max}}$ ) pa lahko opazimo, da je le pri konfiguraciji A2 stropnika 2 stekleni trak povečal nosilnost, pri konfiguracijah A2 stropnikov 3, 5 in 8 pa stekleni trak ne prispeva k večji nosilnosti oz. pride do porušitve pred doseženo silo, enako nosilnosti pripadajoče konfiguracije B. Pozitivni vpliv steklenega traku na nosilnost stropnika 2 lahko pripišemo dejstvu, da ima stropnik 2 najmanjše razmerje med ocenjeno upogibno trdnostjo in modulom elastičnosti (tabela 24).

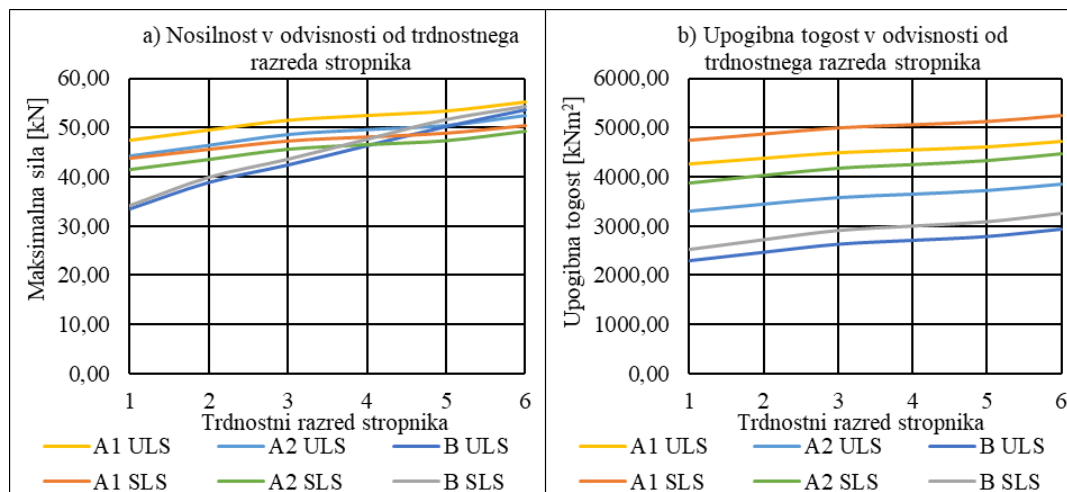
Tudi analitični izračun pa je pokazal, da ima stekleni trak pri konfiguraciji A1 (prilepljen stekleni trak) večji vpliv na upogibno togost kot stekleni trak pri konfiguraciji A2 (privit stekleni trak).

### **7.2.1 Analitični izračuni konfiguracij A1, A2 in B z lesenimi stropniki s trdnostnimi razredi C14–C24**

Dodatno k izračunom z dejanskimi mehanskimi karakteristikami stropnikov smo izvedli še izračune za stropnike enakih dimenzij, vendar s trdnostnimi razredi C14–C24, kot jih navaja standard [124]. Rezultati za konfiguracijo:

- A1 z moduli pomikov za SLS so v prilogi 12.1 (tabela 69),
- A1 z moduli pomikov za ULS so v prilogi 12.1 (tabela 70),
- A2 z moduli pomikov za SLS so v prilogi 12.1 (tabela 71),
- A2 z moduli pomikov za ULS so v prilogi 12.1 (tabela 72),
- B z moduli pomikov za SLS so v prilogi 12.1 (tabela 73),
- B z moduli pomikov za ULS so v prilogi 12.1 (tabela 74).

Maksimalne sile ( $F_{\text{max}}$ ) oz. nosilnosti in upogibne togosti ( $EI_{\text{eff}}$ ) posameznih konfiguracij v odvisnosti od trdnostnega razreda lesenih stropnikov smo v obliki diagramov zbrali tudi na sliki 90.



Slika 90: Diagram nosilnosti (a) in upogibne togosti (b) v odvisnosti od trdnostnega razreda stropnika (1 – C14, 2 – C16, 3 – C18, 4 – C20, 5 – C22, 6 – C24) za različne konfiguracije (z moduli pomikov za SLS in ULS)

Na sliki 90 a lahko vidimo, da ima konfiguracija A2 pri trdnostnih razredih lesenih stropnikov C14, C16, C18 in C20 večjo nosilnost kot konfiguracija B. Konfiguracija A1 z moduli pomika za ULS ima pri vseh trdnostnih razredih lesenih stropnikov večjo nosilnost kot konfiguracija B. Drugače je s konfiguracijo A1 z moduli pomika za SLS, ki ima pri trdnostnih razredih lesenih stropnikov C22 in C24 manjšo nosilnost kot konfiguracija B. Na sliki 90 b pa vidimo, da se vpliv steklenega traku na upogibno togost zmanjšuje z višanjem trdnostnih razredov lesenih stropnikov.

Rezultate na sliki 90 je potrebno razumeti tudi v smislu, ali upoštevanje različnih modulov pomika vpliva na morebitno prekrivanje rezultatov različnih konfiguracij. Na primer, če je togost konfiguracij B z moduli pomika za SLS večja od togosti konfiguracij A1 ali A2 z moduli pomika za ULS. Do tega ni prišlo, kar kaže na učinkovitost steklenega traku in dokazuje razliko med konfiguracijami glede upogibne togosti. Drugače pa je pri nosilnosti. Tam je prišlo do križanja krivulj. Vidimo tudi, da je pri konfiguracijah A1 in A2 večja nosilnost dosežena z moduli pomika za ULS, pri konfiguraciji B pa smo večjo nosilnost dosegli z moduli pomika za SLS. Prav tako pa je npr. nosilnost konfiguracije A2 z moduli pomika za ULS večja kot pa je nosilnost konfiguracije A1 z moduli pomika za SLS. Omenjeno dokazuje pomembnost togosti priključnih ravnin.

### 7.3 Parametrična analiza z analitičnimi izračuni nosilnosti in togosti sovprežnih nosilcev CLT-stropnik-steklo

Da bi prikazali učinkovitost obravnavanega novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov, smo izvedli parametrično analizo z analitičnimi izračuni nosilnosti in togosti sovprežnih nosilcev CLT-stropnik-steklo. S spreminjanjem različnih parametrov smo izvedli dimenzioniranje v skladu s standardi [136], [73], [56] in predstandardom za steklene konstrukcije [21]. Izračunali smo maksimalne koristne obtežbe ( $q_{max}$ ) za mejno stanje nosilnosti (ULS) ter mejno stanje uporabnosti (SLS). Za obe mejni stanji smo upoštevali stanje pred leženjem (ini) in po leženju (fin) lesa. Za mejno stanje nosilnosti smo izračunali

maksimalne koristne obtežbe glede na različne kriterije. Najmanjšo izmed teh vrednosti smo upoštevali kot dejansko maksimalno možno koristno obtežbo, za katero smo izračunali izkoriščenosti različnih trdnosti oz. nosilnosti. Za mejno stanje uporabnosti – trenutni pomik je bila upoštevana omejitev razpon/300, za končni pomik pa razpon/250. Za statični sistem smo izbrali prostoležeči nosilec z enakomerno zvezno obtežbo. Dimenzioniranje smo izvedli s projektnimi trdnostmi oz. nosilnostmi ( $X_{d,i}$ ):

$$X_{d,i} = k_{mod,i} \cdot X_{k,i} / \gamma_{M,i} \quad (70)$$

kjer je  $k_{mod,i}$  modifikacijski faktor za upoštevanje trajanja obtežbe,  $X_{k,i}$  karakteristična trdnost oz. nosilnost in  $\gamma_{M,i}$  faktor varnosti. Upoštevali smo kombinacijske faktorje za kategorijo uporabe C3 s predpisano koristno obtežbo  $5 \text{ kN/m}^2$ , dodatno k lastni teži smo upoštevali še stalno obtežbo  $1 \text{ kN/m}^2$ . Pri kategoriji C3 gre za površine brez ovir za gibanje ljudi (npr. muzeji, razstavišča, dostopni prostori v javnih in upravnih stavbah ipd.). Pogosto se namreč starejši objekti obnavljajo z namenom, da bodo dobili novo funkcijo. Na primer, obnovljeni prostori dvorca na Zgornji Polskavi bodo namenjeni prostorom krajevne skupnosti, muzeju, knjižnici. Jasno je, da bi ob upoštevanju obtežb za kategorije uporabe A (bivalni prostori) ali B (pisarne) dobili nekoliko drugačne rezultate za stanje po izvršenem lezenju lesa, saj imajo kombinacijski faktorji za upoštevanje trajanja obtežbe za ti dve kategoriji nižje vrednosti. Kategorijo C3 smo izbrali z namenom, da bodo rezultati študije tudi širše uporabni, saj izbrana kategorija pokriva praktično vse podkategorije C (površine, kjer se zbirajo ljudje). Obravnavane osnovne konfiguracije so bile enake preizkušenim konfiguracijam na slikah 45 in 46, s tem, da smo pri parametrični analizi upoštevali, da je dolžina steklenega traku enaka razponu stropnika.

Tabela 41: Vhodni podatki za parametrično analizo

Stalna obtežba stropa (dodatno k lastni teži nosilne konstrukcije)	G	1,00	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Predpisana koristna obtežba za kategorijo namembnosti C3	Q	5,00	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Delni varnostni faktor za stalne obtežbe	$\gamma_G$	1,35	/
Delni varnostni faktor za spreminjajoče obtežbe	$\gamma_Q$	1,50	/
Modifikacijski faktor zaradi vpliva trajanja obremenitve in vlažnosti lesa – leseni stropnik	$k_{mod,les}$	0,80	/
Modifikacijski faktor zaradi vpliva trajanja obremenitve in vlažnosti lesa – CLT plošča	$k_{mod,CLT}$	0,80	/
Faktor razpok	$k_{cr}$	0,67	/
Faktor za navidezno stalno vrednost spreminjajoče se obtežbe	$\psi_2$	0,60	/
Deformacijski faktor – leseni stropnik	$k_{def,les}$	0,80	/
Deformacijski faktor – CLT plošča	$k_{def,CLT}$	0,80	/
Delni faktor varnosti za masivne lesene elemente – leseni stropnik	$\gamma_{M,les}$	1,30	/
Delni faktor varnosti za lepljene lamelirane lesene elemente – CLT plošča	$\gamma_{M,CLT}$	1,25	/
Delni faktor varnosti za vezna sredstva – lesni vijaki	$\gamma_{M,vijak}$	1,30	/

Kaljeno steklo smo dimenzionirali v skladu s predstandardom [21] z enačbo:

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v \cdot (f_{b,k} \cdot f_{g,k})}{\gamma_{M,v}} \quad (71)$$

kjer je  $k_{\text{mod}}$  modifikacijski faktor za upoštevanje trajanja obtežbe za navadno steklo,  $k_{\text{sp}}$  faktor za upoštevanje površinske obdelave navadnega stekla,  $f_{g,k}$  karakteristična upogibna trdnost navadnega stekla,  $\gamma_{M,A}$  faktor varnosti za navadno steklo,  $k_v$  faktor načina kaljenja stekla,  $f_{b,k}$  karakteristična upogibna trdnost kaljenega stekla,  $\gamma_{M,v}$  faktor varnosti kaljenega stekla.

Modifikacijski faktor za stekleni trak ( $k_{\text{mod}}$ ) smo izračunali z enačbo:

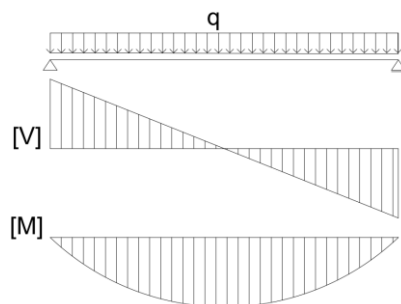
$$k_{\text{mod}} = 0,663 \cdot t^{-\frac{1}{16}} \quad (72)$$

kjer je  $t$  čas trajanja obtežbe v urah. Za trajanje obremenitve koristne obtežbe smo upoštevali šest mesecev. Vrednosti za dimenzioniranje stekla in projektna upogibna trdnost stekla ( $f_{g,d}$ ) so podane v tabeli 42.

Tabela 42: Vrednosti za dimenzioniranje stekla

t [h]	$k_{\text{sp}}$	$f_{g,k}$ [MPa]	$\gamma_{M,A}$	$k_v$	$f_{b,k}$ [MPa]	$\gamma_{M,v}$	$f_{g,d}$ [MPa]
4320	1	45	1,8	1	120	1,2	72,3

Enakomerna zvezna obtežba prostoležečega nosilca povzroča takšno razporeditev notranjih statičnih količin, pri kateri mesto maksimalnih strižnih sil in mesto maksimalnega upogibnega momenta ne sovpadata (slika 91). Mesta maksimalne napetosti v steklenem traku ob uporabi točkovnega stika (konfiguracija A2) zato ne moremo enostavno določiti. Posledično smo preverili napetosti v steklenem traku v bližini vseh točkovnih stikov. Mesto najbolj kritičnega točkovnega stika (največje napetosti v steklenem traku) smo označili z  $X_{\text{con.s.ULS.critic}}$ , najbolj kritično območje znotraj stika pa s  $KO_{\text{con.s.ULS.critic}}$  (glej podpoglavje 5.2), silo v točkovnem stiku (sila veznega sredstva), v okolici katerega se pojavi maksimalna napetost v steklenem traku, pa smo označili s  $F_{\text{con.s.ULS.critic}}$ . Vijake v točkovnem stiku smo dimenzionirali glede na maksimalno strižno silo.



Slika 91: Notranje statične količine (V – prečne sile, M – upogibni momenti) v prostoležečem nosilcu ob enakomerni zvezni obtežbi

### 7.3.1 Parameter 1: Trdnostni razred stropnikov

Za osnovni trdnostni razred stropnika smo izbrali trdnostni razred C14, ki je najnižji trdnostni razred lesa iglavcev, v parametrični študiji vpliva trdnosti lesa pa smo upoštevali vseh dvanajst trdnostnih razredov iglavcev (tabela 43). Najnižji indeks (1) označuje trdnostni razred C14, najvišji indeks (12) pa trdnostni razred C50. Parameter smo spreminjali pri konfiguracijah A1, A2 in B.



Tabela 43: Upoštevanji trdnostni razredi lesa (za leseni stropnik)

	Simbol	Enota	Trdnostni razredi lesa											
			C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Karakteristična upogibna trdnost	$f_{m,k}$	[MPa]	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Karakteristična natezna trdnost vzporedno z vlakni	$f_{t,0,k}$	[MPa]	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Karakteristična tlačna trdnost vzporedno z vlakni	$f_{c,0,k}$	[MPa]	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Karakteristična strižna trdnost	$f_{v,k}$	[MPa]	1,7	1,8	2	2,2	2,4	2,5	2,8	3	3,4	3,8	3,8	3,8
Srednja vrednost modula elastičnosti	$E_{mean}$	[GPa]	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Srednja vrednost strižnega modula	$G_{mean}$	[GPa]	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1
Srednja gostota	$\rho_m$	[kg/m <sup>3</sup> ]	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Karakteristična gostota	$\rho_k$	[kg/m <sup>3</sup> ]	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	560

### 7.3.2 Parameter 2: Tip oz. debelina CLT plošče

Za osnovni računski primer ojačitve je bila izbrana CLT plošča debeline 60 mm (indeks CLT plošče 2, tabela 44) in širine 90 cm (medsebojna oddaljenost stropnikov lesenega stropa). Za parametrično študijo vpliva debeline CLT plošče so bile upoštrevane tudi večje debeline plošč. Geometrije vseh upoštevanih CLT plošč so v tabeli 44 in vsaki CLT plošči je pripisan indeks. Indeks 1 označuje primer, ko CLT plošča ni upoštevana oz. je njena debelina enaka nič. Črki L in C označujeta debeline vzdolžnih (L) oz. prečnih slojev (C) CLT plošče. Prvi in zadnji sloj sta vedno orientirana v smeri stropnikov, na tak način namreč najbolj ojačamo obstoječi stropnik. V kolikor bi CLT ploščo orientirali pravokotno na smer stropnikov, bi leseni stropnik nekoliko manj ojačali, a bi povečali upogibno togost lesenega stropa v prečni smeri. Slednje bi lahko imelo pozitivnejši vpliv na vibracije lesenega stropa in bi izboljšalo delovanje lesenega stropa v smislu toge diafragme, a to ni bil predmet naše študije. Za CLT plošče smo upoštevali lastnosti trdnostnega razreda lesa C24 (tabela 22). Parameter smo spreminjali pri konfiguracijah A1, A2 in B.

Tabela 44: Geometrija CLT plošč za računski primer

Indeks CLT plošče	Debelina plošče [mm]	Št. slojev	L [mm]	C [mm]	L [mm]	C [mm]	L [mm]
1	/	/	/	/	/	/	/
2	60	3	20	20	20	/	/
3	80	3	20	40	20	/	/
4	90	3	30	30	30	/	/
5	100	3	30	40	30	/	/
6	120	3	40	40	40	/	/
7	100	5	20	20	20	20	20
8	120	5	30	20	20	20	30

### 7.3.3 Parameter 3: Razmik med vijaki CLT plošče

Razmik med lesnimi vijaki CLT plošče smo spreminjali od 7,2 cm do 49,2 cm. Spodnja meja je določena z zahtevo po minimalnem razmiku lesnih vijakov, ki znaša dvanajstkratnik nazivnega premera lesnih vijakov. Zgornja meja je določena na podlagi predhodnega izračuna, ki je pokazal, da večji razmiki niso smiselni, saj z njimi dosegamo le še zelo nizke nosilnosti. Za osnovni računski primer ojačitve je bil izbran razmik 10 cm. Parameter smo spreminjali pri konfiguracijah A1, A2 in B.

### 7.3.4 Parameter 4: Tip vijakov CLT plošče

Tipi vijakov (oz. dimenzije) so podani v tabeli 45. Za osnovni računski primer ojačitve smo izbrali vijak s premerom 6 mm in dolžino 200 mm (tip vijaka 6, tabela 45). Parameter smo spreminjali pri konfiguracijah A1, A2 in B.

Tabela 45: Dimenzije oz. tipi lesnih vijakov CLT plošče

	Tip vijaka CLT plošče														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nazivni premer [mm]	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Premer jedra [mm]	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Dolžina vijaka [mm]	100,0	120,0	140,0	160,0	180,0	200,0	200,0	220,0	240,0	260,0	280,0	300,0	350,0	400,0	450,0
Dolžina navoja [mm]	85,0	105,0	125,0	145,0	165,0	185,0	185,0	195,0	215,0	235,0	255,0	285,0	325,0	375,0	425,0

### 7.3.5 Parameter 5: Strižni modul adheziva

Strižni modul adheziva smo spreminjali med  $2,82 \cdot 10^{-8}$  MPa in 2820 MPa. Za osnovni računski primer ojačitve smo upoštevali strižni modul adheziva v velikosti 2820 MPa, kar je tudi bil strižni modul za eksperimente uporabljenega adheziva. Parameter smo spreminjali pri konfiguraciji A1.

### 7.3.6 Parameter 6: Debelina steklenega traku

Debelino steklenega traku smo spreminjali od 0 mm do 22 mm. Za osnovni računski primer ojačitve smo upoštevali debelino steklenega traku 10 mm. Parameter smo spreminjali pri konfiguraciji A1 in C. Konfiguracija C je v osnovi samo leseni stropnik, a smo vseeno izvedli tudi izračune z različnimi debelinami steklenega traku, da bi tako presodili morebitno uporabnost steklenega traku za lesene stropnike oz. nosilce, kjer ojačitev s CLT ploščo ne pride v poštev.

### 7.3.7 Parameter 7: Širina steklenega traku

Širino steklenega traku smo spreminjali od 10 cm do 90 cm. Spodnja meja je poljubno izbrana oz. predstavlja najnižjo še smiselno širino steklenega traku. Zgornja meja pa predstavlja medosni razmik med lesenimi stropniki in je tudi praktično največja možna širina, saj bi se pri

večjih vrednosti trakovi že prekrivali. Za osnovni računski primer ojačitve smo upoštevali širino steklenega traku 16 cm. Parameter smo spreminjali pri konfiguraciji A1.

### 7.3.8 Parameter 8: Razmik med točkovnimi stiki steklenega traku

Razmik med točkovnimi stiki steklenega traku smo spreminjali od 10 cm do 52 cm. Spodnja meja je poljubno izbrana oz. predstavlja najnižjo še smiselno vrednost. Zgornja meja je določena na podlagi predhodnega izračuna, ki je pokazal, da večji razmiki niso smiselni, saj z njimi dosegamo le še zelo nizke nosilnosti. Za osnovni računski primer ojačitve smo upoštevali razmik med točkovnimi stiki 15 cm. Parameter smo spreminjali pri konfiguraciji A2.

### 7.3.9 Parameter 9: Odmik točkovnih stikov steklenega traku od sredine razpona

Odmik točkovnih stikov steklenega traku od sredine razpona smo spreminjali od 7,5 cm do 67,5 cm. Za osnovni računski primer ojačitve smo upoštevali odmik točkovnih stikov steklenega traku od sredine 7,5 cm. Pri spreminjanju odmika smo upoštevali, da se spreminja tudi efektivni razmik med točkovnimi stiki. Efektivni razmik ( $s_{s,con.ef}$ ) smo izračunali z enačbo:

$$s_{s,con.ef} = 0,75 \cdot s_{s,con} + 0,25 \cdot \left( \text{odmik} + \frac{s_{s,con}}{2} \right) \quad (73)$$

Efektivni razmik smo upoštevali pri izračunu koeficienta togosti priključne ravnine steklenega traku ( $\gamma_{s,v}$ ). Parameter smo spreminjali pri konfiguraciji A2.

### 7.3.10 Rezultati parametrične analize

Rezultati parametrične analize so podani v dveh delih. Na sliki 92 so rezultati maksimalnih koristnih obtežb za:

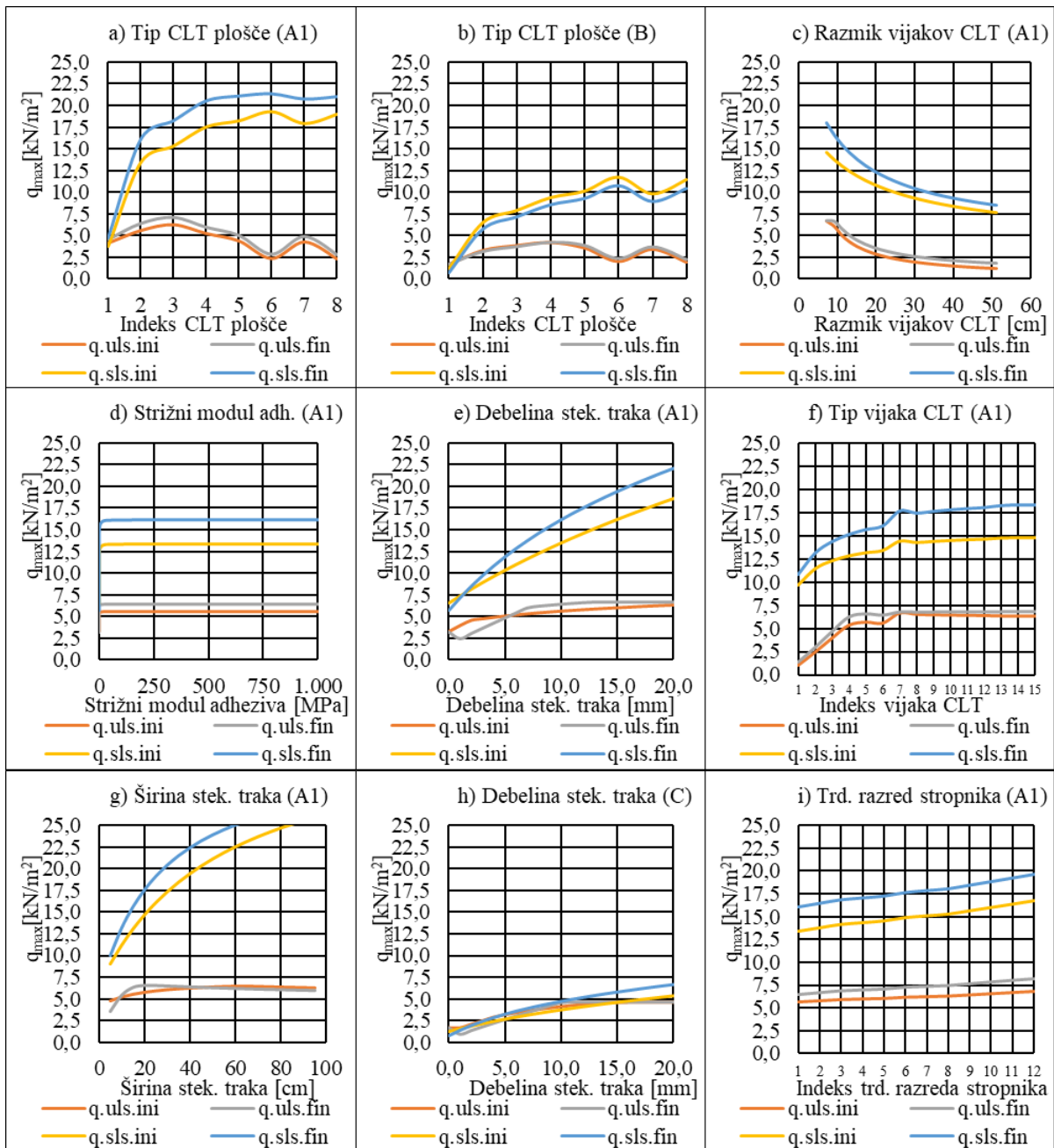
- Parameter 2: tip oz. debelina CLT plošče konfiguracije A1 (slika 92 a),
- Parameter 2: tip oz. debelina CLT plošče konfiguracije B (slika 92 b),
- Parameter 3: razmik med vijaki CLT plošče konfiguracije A1 (slika 92 c),
- Parameter 5: strižni modul adheziva konfiguracije A1 (slika 92 d),
- Parameter 6: debelina steklenega traku konfiguracije A1 (slika 92 e),
- Parameter 4: tip vijakov CLT plošče konfiguracije A1 (slika 92 f),
- Parameter 7: širina steklenega traku konfiguracije A1 (slika 92 g),
- Parameter 6: debelina steklenega traku konfiguracije C (slika 92 h),
- Parameter 1: trdnostni razred stropnikov konfiguracije A1 (slika 92 i).

Na sliki 93 pa so rezultati maksimalnih koristnih obtežb za:

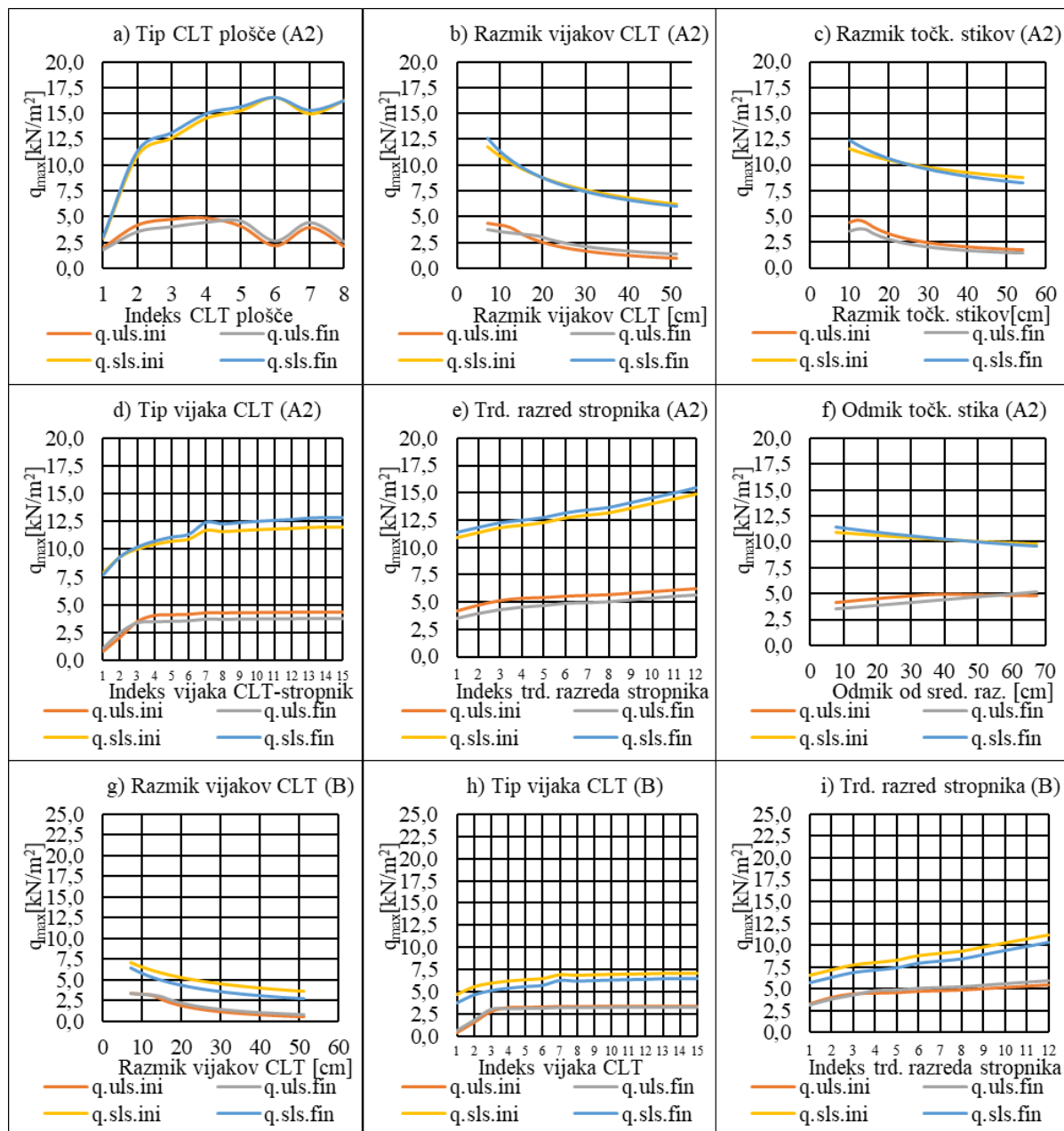
- Parameter 2: tip oz. debelina CLT plošče konfiguracije A2 (slika 93 a),
- Parameter 3: razmik med vijaki CLT plošče konfiguracije A2 (slika 93 b),
- Parameter 8: razmik med točkovnimi stiki steklenega traku konfiguracije A2 (slika 93 c),
- Parameter 4: tip vijakov CLT plošče konfiguracije A2 (slika 93 d),

- Parameter 1: trdnostni razred stropnikov konfiguracije A2 (slika 93 e),
- Parameter 9: odklik točkovnih stikov steklenega traku od sredine razpona konfiguracije A2 (slika 93 f),
- Parameter 3: razmik med vijaki CLT plošče konfiguracije B (slika 93 g),
- Parameter 4: tip vijakov CLT plošče konfiguracije B (slika 93 h),
- Parameter 1: trdnostni razred stropnikov konfiguracije B (slika 93 i).

Podrobni rezultati za vse parametre in konfiguracije so v prilogi 12.2.



Slika 92: Diagrami maksimalnih koristnih obtežb (nosilnosti) v odvisnosti od različnih parametrov 1



Slika 93: Diagrami maksimalnih koristnih obtežb (nosilnosti) v odvisnosti od različnih parametrov 2

Na sliki 92 a vidimo, da je pri konfiguraciji A1 za parameter 2 najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa ( $q.uls.ini$ ) in da višanje tipa oz. debeline CLT plošče pri konfiguraciji A1 povišuje nosilnost le do tipa 3 oz. debeline 80 mm. Do vključno tipa CLT plošče 3 oz. debeline 80 mm je nosilnost omejena z nosilnostjo vijakov v točkovnem stiku steklo-les, od tipa CLT plošče 4 oz. od debeline 90 mm pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče. Dolžina izbranih vijakov je 200 mm, tako da je sidrna dolžina v lesenem stropniku pri najdebelejši upoštevani CLT plošči (debelina 120 mm) le še približno 30 mm. Z uporabo daljših lesnih vijakov bi tudi z debelejšimi CLT ploščami povečevali nosilnost konfiguracije A1. Poudariti je treba tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa ( $q.sls.ini$ ) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa ( $q.sls.fin$ ), kar lahko obrazložimo s tem, da stekleni trak oz. lepljeni stik steklenega traku in lesenega stropnika ne izgublja togosti zaradi lezenja lesa.

Na sliki 92 b vidimo, da je pri konfiguraciji B za parameter 2 in za CLT plošče do tipa 4 oz. debeline 90 mm najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin), za CLT plošče od tipa 5 naprej (debelina 100 mm) pa je najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini). Višanje tipa oz. večanje debeline CLT plošče pri konfiguraciji B povišuje nosilnost le do tipa 4 (debelina 90 mm). Do vključno tipa CLT plošče 4 oz. debeline 90 mm je nosilnost omejena s trdnostjo lesenega stropnika na spodnjem robu, od tipa CLT plošče 5 oz. od debeline 100 mm pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče. Pri konfiguraciji B bi z uporabo daljših lesnih vijakov tudi z debelejšimi CLT ploščami lahko povečevali nosilnost konfiguracije. Poudariti je treba tudi, da je mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin) bolj kritično kot mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini), kar je ravno nasprotno kot pri konfiguraciji A1 (slika 92 a).

Na sliki 92 c vidimo, da je pri konfiguraciji A1 za parameter 3 (razmik med vijaki CLT plošče) najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini) in da z večanjem razmika med vijaki CLT plošče pri konfiguraciji A1 nosilnost pada za vsa obravnavana mejna stanja. Le za razmik 7,2 cm je nosilnost omejena z nosilnostjo vijakov v točkovnih stikih steklo-les, za večje razmike pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče. Poudariti je treba tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot pa mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 92 d vidimo, da je pri konfiguraciji A1 za parameter 5 (strižni modul adheziva) najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini). Prav tako vidimo, da za strižni modul adheziva, večji od 2,8 MPa, ni več spreminjanja nosilnosti. Količnik med dejanskim strižnim modulom adheziva (2800 MPa) in »mejo vpliva« strižnega modula adheziva (2,8 MPa) je torej enak približno 1000, kar pomeni da je tudi vpliv morebitnega lezenja epoksidnega lepila minimalen. Epoksidna lepila imajo namreč relativno majhne vrednosti koeficientov lezenja [86] (v primerjavi z npr. silikonskimi lepili). Dodaten razlog za majhen vpliv strižnega modula adheziva pa je tudi majhna debelina adhezivnega sloja (1 mm), ki rezultira v majhnih strižnih deformacijah oz. pomikih. Poudariti je treba tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin). Za strižne module adheziva, manjše od 2,8 MPa, je nosilnost omejena s trdnostjo lesenega stropnika na spodnjem robu, za strižne module adheziva, večje od 2,8 MPa, pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče.

Na sliki 92 e vidimo, da je pri konfiguraciji A1 za parameter 6 (debelina steklenega traku) in za debeline steklenega traku 5 mm najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin), za debeline steklenega traku, večje od 5 mm, pa je najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini). Nosilnost konfiguracije A1 se z večanjem debeline steklenega traku spreminja po vedno manjših korakih (med debelinama steklenega traku 20 mm in 22 mm je razlika v nosilnosti le 0,11 kN/m<sup>2</sup>). Do vključno debeline steklenega traku 5 mm je nosilnost omejena s trdnostjo traku, za večje debeline steklenega traku pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče. Vidimo tudi, da je za debeline steklenega traku, večje od 2 mm, mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 92 f vidimo, da je pri konfiguraciji A1 za parameter 4 (tip vijakov CLT plošče) najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini) in da višanje indeksa vijaka CLT plošče (dolžine oz. debeline vijaka) pri konfiguraciji A1 povečuje nosilnost le do tipa 4 (lesni vijak s premerom 6 mm in dolžino 160 mm), potem pa je nosilnost praktično konstantna (do manjšega skoka pride še med tipoma 6 in 7, kjer gre za spremembo premera vijaka s 6 mm na 8 mm). Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 92 g vidimo, da je pri konfiguraciji A1 za parameter 7 (širina steklenega traku) in za širine steklenega traku do 50 cm najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini), za širine steklenega traku, večje od 50 cm ali manjše od 10 cm, pa je najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin). Nosilnost konfiguracije A1 se s širinami steklenega traku, večjimi od 40 cm, praktično ne spreminja več. Do širine steklenega traku 50 cm je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče, za večje širine steklenega traku pa je nosilnost omejena s strižno trdnostjo lesenega stropnika, kar je tudi razlog, da se nosilnost ne povečuje več, saj na strižno trdnost lesenega stropnika s steklenim trakom ne vplivamo. Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 92 h vidimo, da je pri konfiguraciji C za parameter 6 (debelina steklenega traku) večinoma najbolj kritično mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini), a je nosilnost posameznih mejnih stanj po velikosti zelo blizu. Pri mejnem stanju ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini) je do debeline steklenega traku 4 mm nosilnost omejena s trdnostjo steklenega traku, za debeline od 6 mm do 14 mm je nosilnost omejena z nosilnostjo lesenega stropnika na zgornjem robu, za debeline, večje od 14 mm, pa je nosilnost omejena s strižno trdnostjo lesenega stropnika in se z večanjem debeline steklenega traku praktično ne spreminja več. Pri mejnem stanju ULS po lezenju lesa (q.uls.fin) je do debeline steklenega traku 10 mm nosilnost omejena s trdnostjo traku, za debeline, večje od 12 mm, pa je nosilnost omejena s strižno trdnostjo lesenega stropnika. Le za debelini steklenega traku 10 mm in 12 mm je mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini) bolj kritično (rezultira v manjši nosilnosti) kot mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin).

Na sliki 92 i vidimo, da je pri konfiguraciji A1 za parameter 1 (trdnostni razred stropnikov) najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini). Nosilnost je omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče in se z višanjem trdnostnega razreda lesenega stropnika veča, vendar je naklon krivulje na sliki 92 i za mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini) zelo majhen (med trdnostnima razredoma C14 in C50 je razlika v nosilnosti le  $1,23 \text{ kN/m}^2$ ). To pomeni, da bi leseni stropi s stropniki različnih trdnostnih razredov, če bi jih ojačali tako, da bi tvorili konfiguracije A1, imeli približno enako nosilnost. V tem pogledu gre torej za univerzalno uporaben pristop. Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 93 a vidimo, da je pri konfiguraciji A2 za parameter 2 najbolj kritično mejno stanje za CLT plošče do tipa 4 (oz. do debeline 90 mm) ULS po lezenju lesa (q.uls.fin), za tipe CLT plošče od 5 naprej (od debeline 100 mm naprej) pa je najbolj kritično mejno stanje ULS pred

lezenjem lesa (q.uls.ini). Višanje tipa oz. večanje debeline CLT plošče pri konfiguraciji A2 povečuje nosilnost le do tipa 4 oz. debeline 90 mm. Do vključno tipa CLT plošče 4 oz. debeline 90 mm je nosilnost omejena z nosilnostjo lesenega stropnika na spodnjem robu, od tipa CLT plošče 5 oz. od debeline 100 mm pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče. Poudariti je treba tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin), kar lahko obrazložimo s tem, da je vpliv lezenja lesa na togost točkovnega stika (stik aluminij-les) manjši kot pa npr. vpliv lezenja lesa na stik CLT plošče in lesenega stropnika (stik les-les).

Na sliki 93 b vidimo, da je pri konfiguraciji A2 za parameter 3 in za razmike do 13,2 cm najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin), za razmike, večje od 13,2 cm, pa je najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini). Z večanjem razmika med vijaki CLT plošče pri konfiguraciji A2 nosilnost pada za vsa obravnavana mejna stanja. Za razmike do 13,2 cm je nosilnost omejena z nosilnostjo vijakov v točkovnih stikih steklo-les, za večje razmike pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče. Za razmike do 19,2 cm je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin), za razmike, večje od 19,2 cm, pa je bolj kritično mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 93 c vidimo, da je pri konfiguraciji A2 za parameter 8 (razmik med točkovnimi stiki steklo-les) najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin). Z večanjem razmika med vijaki CLT plošče pri konfiguraciji A2 nosilnost pada za vsa obravnavana mejna stanja. Za razmik 10 cm je nosilnost omejena s trdnostjo steklenega traku, za večje razmike pa je nosilnost omejena z nosilnostjo vijakov v točkovnih stikih steklo-les. Za razmike do 28 cm je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin), za razmike, večje od 28 cm, pa je bolj kritično mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 93 d vidimo, da je pri konfiguraciji A2 za parameter 4 (tip vijakov CLT plošče) najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin) in da višanje indeksa vijaka CLT plošče (večanje dolžine oz. debeline vijaka) pri konfiguraciji A2 povečuje nosilnost le do tipa 3 (lesni vijak s premerom 6 mm in dolžino 140 mm), potem pa je nosilnost praktično konstantna. Za vijake z indeksom, nižjim od 3, je nosilnost omejena z nosilnostjo vijakov CLT plošče, za vijake z indeksom, višjim od 3, pa je nosilnost omejena z nosilnostjo vijakov v točkovnih stikih steklo-les. Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 93 e vidimo, da je pri konfiguraciji A2 za parameter 1 (trdnostni razred stropnikov) najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin). Nosilnost je za trdnostne razrede do C20 (indeks 4) omejena z nosilnostjo lesnih vijakov v točkovnih stikih steklo-les, za višje trdnostne razrede pa je nosilnost omejena s trdnostjo steklenega traku. Nosilnost se z višanjem trdnostnega razreda lesenega stropnika veča, vendar je naklon krivulje na sliki 92 e za mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin) majhen (med trdnostnima razredoma C14 in C50 je razlika v nosilnosti  $2,08 \text{ kN/m}^2$ ). Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).



Na sliki 93 f vidimo, da je pri konfiguraciji A2 za parameter 9 (odmik točkovnih stikov steklenega traku od sredine razpona) najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin). Nosilnost je za vse odmike omejena z nosilnostjo lesnih vijakov v točkovnih stikih steklo-les. Nosilnost se z večanjem odmika veča do približno 60 cm, ko se tudi izenači nosilnost za mejni stanji ULS (pred lezenjem lesa in potem). Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini) bolj kritično kot mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin).

Na sliki 93 g vidimo, da je pri konfiguraciji B za parameter 3 (razmik med vijaki CLT plošče) najbolj kritično mejno stanje ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini) in da z večanjem razmika med vijaki CLT plošče pri konfiguraciji B nosilnost pada za vsa obravnavana mejna stanja. Le za razmik 7,2 cm je nosilnost omejena s trdnostjo stropnika na spodnjem robu, za večje razmike pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče. Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin) bolj kritično kot mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini).

Na sliki 93 h vidimo, da je pri konfiguraciji B za parameter 4 (tip vijakov CLT plošče) najbolj kritično mejno stanje ULS po lezenju lesa (q.uls.fin) in da višanje indeksa vijaka CLT plošče (dolžine oz. debeline vijaka) pri konfiguraciji B povečuje nosilnost le do tipa 3 (lesni vijak s premerom 6 mm in dolžino 140 mm), potem pa je nosilnost praktično konstantna. Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin) bolj kritično kot mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini).

Na sliki 93 i vidimo, da je pri konfiguraciji B za parameter 1 (trdnostni razred stropnikov) najbolj kritično mejno stanje za trdnostne razrede do C18 (indeks 3) ULS po lezenju lesa (q.uls.fin), za trdnostne razrede od C20 (indeks 4) naprej pa ULS pred lezenjem lesa (q.uls.ini). Za trdnostne razrede do C18 (indeks 3) je nosilnost omejena s trdnostjo lesenega stropnika na spodnjem robu, za trdnostne razrede od C20 (indeks 4) naprej pa je nosilnost omejena z nosilnostjo lesnih vijakov CLT plošče in se z višanjem trdnostnega razreda lesenega stropnika veča. Med trdnostnima razredoma C14 in C50 je razlika v nosilnosti 2,2 kN/m<sup>2</sup>. Opazimo tudi, da je mejno stanje SLS po lezenju lesa (q.sls.fin) bolj kritično kot mejno stanje SLS pred lezenjem lesa (q.sls.ini).

V tabeli 46 so podane nosilnosti konfiguracij z osnovnimi parametri, v tabeli 47 pa nosilnosti za najmanjšo oz. prvo vrednost posameznega parametra ( $q_{\min.\text{par.}}$ ), največjo oz. zadnjo vrednost posameznega parametra ( $q_{\max.\text{par.}}$ ), najmanjša nosilnost glede na vse vrednosti posameznega parametra ( $q_{\min}$ ) in pripadajoča vrednost parametra ( $\text{par.}q_{\min}$ ), največja nosilnost glede na vse vrednosti posameznega parametra ( $q_{\max}$ ) in pripadajoča vrednost parametra ( $\text{par.}q_{\max}$ ), razlika med maksimalno in minimalno nosilnostjo za posamezne parametre ( $\Delta_{q_{\min-\max}}$ ), ter procentualna razlika med najmanjšo in največjo nosilnostjo  $\Delta_{q\%}$ . Količini  $\Delta_{q_{\min-\max}}$  in  $\Delta_{q\%}$  lahko razumemo kot merilo vpliva posameznega parametra na nosilnost.

Tabela 46: Nosilnosti posameznih konfiguracij z osnovnimi parametri

Konf.	A1	A2	B	C
q [kN/m <sup>2</sup> ]	5,61	3,53	3,19	0,72

Tabela 47: Ekstremne nosilnosti posameznih konfiguracij za posamezne parametre

Konf.	Parameter	q <sub>min.par.</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	q <sub>max.par.</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	q <sub>min</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	q <sub>max</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	par.q <sub>min</sub>	par.q <sub>max</sub>	Δ <sub>q<sub>min-max</sub></sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	Δ <sub>q%</sub> [%]
A1	Indeks CLT plošče	3,73	2,32	2,32	6,28	8	3	3,96	170,69
	Razmik med vijaki CLT plošče	6,72	1,18	1,18	6,72	51,20	7,20	5,55	469,49
	Strižni modul adheziva [MPa]	3,15	5,61	3,15	5,61	0,00	2821,43	2,46	78,10
	Indeks vijaka CLT plošče	0,98	6,38	0,98	6,72	1	7	5,74	585,71
	Debelina steklenega traku [mm]	3,19	6,42	2,43	6,42	1,00	22,00	3,99	164,20
	Indeks trd. razreda stropnika	5,61	6,84	5,61	6,84	1	12	1,23	21,93
	Širina steklenega traku [cm]	5,26	5,99	5,26	6,33	10,00	45,00	1,07	20,34
A2	Indeks CLT plošče	1,81	2,16	1,81	4,43	1	4	2,62	144,75
	Raz. med vijaki CLT [cm]	3,71	0,94	0,94	3,71	51,2	7,2	2,78	294,68
	Raz. med točk. stiki [cm]	3,58	1,47	1,47	3,78	54,00	12,00	2,31	157,14
	Indeks vijaka CLT plošče	0,77	3,75	0,77	3,75	1	14	2,97	387,01
	Indeks trd. razreda stropnika	3,53	5,61	3,53	5,61	1	12	2,08	58,92
	Odmik točkovnega stika [cm]	3,53	4,80	3,53	4,80	7,50	67,50	1,26	35,98
B	Indeks CLT plošče	0,72	1,92	0,72	4,19	1	4	3,47	481,94
	Raz. med vijaki CLT [cm]	3,29	0,55	0,55	3,29	51,20	7,20	2,74	498,18
	Indeks vijaka CLT plošče	0,45	3,31	0,45	3,31	1	14	2,86	635,56
	Indeks trd. razreda stropnika	3,19	5,39	3,19	5,39	1	12	2,20	68,97
C	Debelina steklenega traku [mm]	0,72	4,62	0,72	4,62	0,00	22,00	3,90	541,67

V tabeli 46 vidimo, da ima za osnovne parametre največjo nosilnost konfiguracija A1, sledi konfiguracija A2 in nato konfiguracija B, najmanjšo nosilnost pa ima pričakovano konfiguracija C (samo stropnik). Razlika med konfiguracijama A2 in B je sicer zelo majhna.

V tabeli 47 vidimo, da smo največjo nosilnost za konfiguracijo A1 izračunali s spreminjanjem trdnostnega razreda stropnikov oz. z najvišjim trdnostnim razredom stropnikov C50. Zanimivo je, da smo po velikosti zelo podobno nosilnost izračunali tudi s spreminjanjem razmika med vijaki CLT plošče in s spreminjanjem tipa vijaka CLT plošče. Tudi pri absolutni in procentualni razliki med maksimalno in minimalno nosilnostjo smo največjo vrednost izračunali za indeks vijaka CLT plošče, kar kaže, da imajo vijaki za zvezo CLT plošče in stropnika največji vpliv na nosilnost konfiguracije A1. Najmanjši vpliv na nosilnost konfiguracije A1 ima očitno širina steklenega traku, le nekoliko večji vpliv pa ima trdnostni razred stropnikov. To pomeni, da lahko nosilnost konfiguracije A1 napovemo relativno natančno tudi brez poznavanja natančnih mehanskih karakteristik stropnika.

V tabeli 47 vidimo, da smo največjo nosilnost za konfiguracijo A2 izračunali s spreminjanjem trdnostnega razreda stropnikov oz. z najvišjim trdnostnim razredom stropnikov C50. Zanimivo je, da smo drugo najvišjo nosilnost izračunali tudi s spreminjanjem odmika točkovnega stika od sredine razpona, to pa je parameter, ki ga lahko v praksi, za razliko od trdnostnega razreda

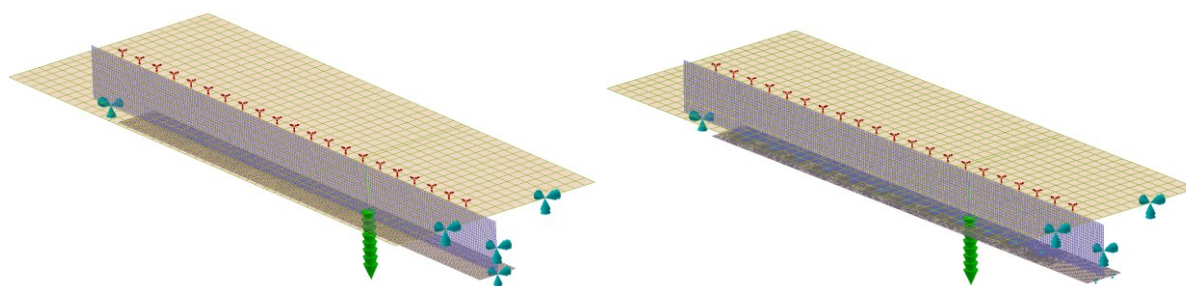
stropnikov, tudi dejansko spreminjamo. S povečanjem odmika točkovnega stika od sredine razpona bi na zelo enostaven način povečali tudi razliko napram nosilnosti konfiguracije B, ki je bila za osnovne vrednosti parametrov relativno majhna (tabela 46). Pri absolutni in relativni razliki med maksimalno in minimalno nosilnostjo smo največjo vrednost izračunali za indeks vijaka CLT plošče, kar kaže, da imajo vijaki za zvezo CLT plošče in stropnika največji vpliv na nosilnost konfiguracije A2. Najmanjši vpliv na nosilnost konfiguracije A2 ima odklik točkovnega stika od sredine razpona, ki pa, kot poprej omenjeno, ni zanemarljiv.

V tabeli 47 vidimo, da smo največjo nosilnost za konfiguracijo B izračunali s spreminjanjem trdnostnega razreda stropnikov oz. z najvišjim trdnostnim razredom stropnikov C50. Drugo največjo nosilnost smo izračunali s spreminjanjem indeksa CLT plošče oz. debeline CLT plošče, to pa je parameter, ki ga lahko v praksi, za razliko od trdnostnega razreda stropnikov, tudi dejansko spreminjamo. Indeks CLT plošče oz. debelina CLT plošče je bil tudi parameter, za katerega smo izračunali največjo absolutno vrednost razlike med maksimalno in minimalno nosilnostjo. Največjo procentualno razliko med maksimalno in minimalno nosilnostjo pa smo izračunali za indeks vijaka CLT plošče. Najmanjši vpliv na nosilnost konfiguracije B ima trdnostni razred stropnika, ki pa, kot poprej omenjeno, ni zanemarljiv.

Zanimivi so tudi rezultati konfiguracije C (v osnovi samo leseni stropnik), pri kateri smo spreminjali debelino prilepljenega steklenega traku oz. smo dodajali različno debele steklene trakove. Očitno lahko nosilnost stropnika povečamo že samo z dodajanjem steklenega traku, saj smo npr. s trakom debeline 22 mm presegli osnovno nosilnost konfiguracije B (stropnik ojačan s CLT ploščo) za kar  $0,6 \text{ kN/m}^2$ . Dodana CLT plošča oz. konfiguracija ima seveda več prednosti, ko gre za lesene strope, ki jih želimo celovito obnoviti oz. izboljšati (požarna varnost, zvočna izolativnost, vibracije ipd.), a je lahko ojačitev samo s steklenim trakom relevantna tudi za druge lesene konstrukcijske elemente.

## 8 NUMERIČNO MODELIRANJE OBNAŠANJA OJAČANIH STROPNIH ELEMENTOV

Za numerični izračun preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov po metodi končnih elementov smo uporabili program Inventor Nastran 2020 [114]. Opravili smo numerične izračune vseh stropnikov in konfiguracij za mejni stanji SLS in ULS. Uporabljeni so bili ploskovni končni elementi tipa »CTRIA6« (šest vozlišč) in »CQUAD8« (osem vozlišč). Gre za končne elemente s parabolničnim redom interpolacije. Najprej smo oblikovali 3D model (upoštevali smo nominalne dimenzije prereza stropnika oz. 16 cm × 20 cm), potem pa je bilo na njem uporabljeno tako imenovano prosto mreženje (razlog za različne ploskovne elemente). Grafični prikaz numeričnega modela konfiguracij A1 in A2 je na sliki 94 (modri stožci predstavljajo podpore, zelene puščice pa obtežbo). Za mrežo končnih elementov na lesenem stropniku in steklenem traku smo definirali velikost 10 mm. Na lepljenih ploskvah stekla pri točkovnem stiku smo za mrežo končnih elementov definirali velikost 2 mm. Za mrežo končnih elementov CLT plošče smo definirali velikost 50 mm. Za konfiguraciji B in C smo enostavno izbrisali stekleni trak in CLT ploščo.



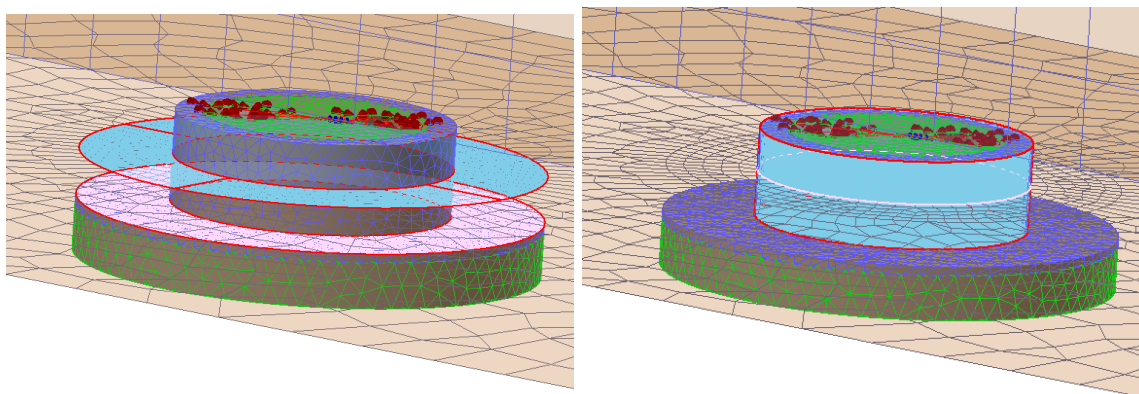
Slika 94: Grafični prikaz numeričnega modela v programu Inventor Nastran 2020 (levo: konfiguracija A1, desno: konfiguracija A2)

Vezna sredstva med CLT ploščo in lesenim stropnikom smo modelirali z vzmetmi, ki so imele koeficiente togosti enake modulom pomika, izračunanem z analitičnim izračunom. Kot pri analitičnem izračunu smo tudi z numeričnim izračunom upoštevali module pomika ( $K_{CLT}$ ) za mejni stanji SLS in ULS. Za numerični izračun za SLS smo uporabili module pomika iz tabele 38, za numerični izračun za ULS pa module pomika iz tabele 39. Vzmeti so bile modelirane z enakimi razmiki, kot so jih imeli vijaki pri upogibnih preizkusih.

CLT plošča je bila modelirana samo z enim slojem ploskovnih končnih elementov, ki pa so bili definirani kot laminat (končni element »PCOMP«). Za laminat so bili definirani trije sloji. Za material za CLT ploščo smo definirali linearno ortotropni materialni zakon, tako da so se sloji laminata razlikovali le po orientaciji. Spodnji in zgornji sloj sta imela lastnosti lesa vzporedno z vlakni, srednji sloj pa lastnosti lesa pravokotno na vlakna. Uporabili smo vrednosti iz tabele 22. Za modul elastičnosti pravokotno na vlakna smo upoštevali eno tridesetino modula elastičnosti vzporedno z vlakni. Za Poissonov količnik smo upoštevali vrednost 0,48 (vrednost smo po povzeli po [91]).

Za stekleni trak smo definirali izotropni linearno elastični materialni zakon, za modul elastičnosti smo upoštevali vrednost 70 GPa, za Poissonov količnik pa 0,23 (v skladu s

predstandardom [21]). Stekljeni trak je na stropnike pritrjen z lepljenjem ali s točkovnim stikom. Za konfiguracije A1 adheziva nismo posebej modelirali, saj je izbrani adheziv zelo tog in zagotavlja popolnoma tog stik (kot je prikazal že izvedeni analitični izračun). Pri manj togih adhezivih ali pri drugačnih (večjih) debelinah adhezivov je potrebno to predpostavko posebej preveriti. Z modeliranjem različnih adhezivov s prostorskimi končnimi elementi, v kontekstu leseno-steklenih konstrukcij oz. stenskih elementov, so se sicer ukvarjali npr. v [137]. V [138] so lepljeni stik steklo-les modelirali v vzmetni oz. linijskimi končnimi elementi. Za konfiguracijo A2 smo točkovne stike modelirali enako kot v podpoglavju 5.1.9 (s prostorskimi tetrahedralnimi elementi). Edina razlika je bila v tem, da smo stekleni trak sedaj modelirali s ploskovnimi elementi. Kontakte med adhezivom in steklom smo zato definirali kot kontakte tipa »offset bonded«, ki poveže tako translacijske kot rotacijske prostostne stopnje (slika 95). Za kontakte med zunanjo površino steklenega traku in adheziva (slika 95 levo) smo definirali tudi odmik zlepljenih ploskev v velikosti 5 mm (polovica debeline steklenega traku). Med aluminijastim vstavkom in stropnikom pa smo modelirali vzmeti, ki so imele koeficiente togosti enake modulom pomika, izračunanim z analitičnim izračunom. Kot pri analitičnem izračunu smo tudi pri numeričnem upoštevali module pomika ( $K_S$ ) za mejni stanji SLS in ULS. Za numerični izračun za SLS smo uporabili module pomika iz tabele 38, za numerični izračun za ULS pa module pomika iz tabele 39.



Slika 95: Lepljene ploskve pri točkovnem stiku (levo: kontakt med zunanjo površino steklenega traku in adhezivom na površini traku, desno: kontakt med robom luknje v steklenem traku in adhezivom v luknji v traku)

Material za leseni stropnik smo definirali z linearno elastičnim ortotropnim materialnim zakonom. Za stropnike smo upoštevali mehanske lastnosti iz tabele 24. Dodatno smo za modul elastičnosti pravokotno na vlakna upoštevali eno tridesetino modula elastičnosti vzporedno z vlakni. Za Poissonov količnik smo upoštevali vrednost 0,48 (vrednost smo povzeli po [91]). Upoštevana je bila simetrija preizkušanca, posledično je bila modelirana samo polovica preizkušanca. Na sredini razpona smo uporabili robne pogoje simetrije. Kot obremenitev smo na tretjini razpona definirali silo 50 kN. Rezultati zaradi pristopa s simetrijo predstavljajo rezultate za skupno obremenitev 100 kN. Velikost sile smo izbrali arbitrarno, saj gre za linearno elastični izračun in rezultate lahko normiramo na poljubno silo.

Z izračunanimi napetostmi oz. silami v veznih sredstvih smo izvedli kontrolo nosilnosti. Preverjali smo samo normalne napetosti na spodnjem robu lesenega stropnika, maksimalne

glavne napetosti v steklenem traku in sile v veznih sredstvih, saj so se slednje tudi pri analitičnem izračunu v podpoglavju 7.2 izkazale za merodajne. Enako kot v podpoglavju 7.2 smo izračunali izkoriščenost karakterističnih trdnosti oz. nosilnosti. Z največjo izkoriščenostjo smo delili obremenitev v numeričnem modelu (100 kN) in tako izračunali nosilnost posamezne konfiguracije ( $F_{pre}$ ). Rezultati z moduli pomikov za SLS so v tabeli 48, rezultati z moduli pomikov za ULS pa v tabeli 49.

Tabela 48: Rezultati numeričnih izračunov preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomikov za SLS) pri sili 100 kN

SLS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$u$ [mm]	37,40	51,00	38,40	48,49	45,88	62,71	137,80	41,23	53,40	54,94	38,74	53,93	46,73	64,78
$\Delta_{CLT}$ [mm]	1,48	1,73	1,47	1,66	1,68	1,96		1,55	1,77	1,80	1,52	1,78	1,70	1,99
$\Delta_s$ [mm]			1,48		1,83			1,60					1,85	
$\sigma_{s,zg}$ [MPa]	115,34		76,05		92,53			82,33			119,24		95,70	
$\sigma_{s,sp}$ [MPa]	123,40		88,72		107,01			95,70			127,31		110,35	
$\sigma_{s,max}$ [MPa]			153,23		185,09			165,30					191,40	
$\sigma_{les,zg}$ [MPa]	-20,40	-23,00	-21,80	-24,50	-14,90	-17,00	-71,50	-19,10	-21,60	-20,30	-18,80	-21,10	-14,00	-16,00
$\sigma_{les,sp}$ [MPa]	23,00	41,50	29,10	42,50	22,20	37,70	71,50	26,30	40,60	40,00	21,50	40,30	21,20	37,00
$\sigma_{CLT,zg}$ [MPa]	-10,15	-12,66	-10,16	-12,18	-11,54	-14,67		-10,71	-13,10	-13,39	-10,46	-13,20	-11,69	-15,00
$\sigma_{CLT,sr}$ [MPa]	-0,22	-0,26	-0,22	-0,25	-0,24	-0,29		-0,23	-0,26	-0,27	-0,23	-0,26	-0,24	-0,29
$\sigma_{CLT,sp}$ [MPa]	-3,43	-3,21	-3,24	-3,20	-3,46	-3,10		-3,35	-3,22	-3,24	-3,53	-3,23	-3,49	-3,05
$F_{con,s}$ [kN]			16,73		20,55			18,17					19,86	
$F_{screw,CLT}$ [kN]	17,39	20,28	17,30	19,64	19,58	22,83		18,21	20,88	21,29	17,93	21,02	21,30	23,22
$I_{z_{les,sp}}$	0,88	1,76	1,36	2,10	1,07	1,94	3,14	1,02	1,66	1,65	0,82	1,71	0,80	1,49
$I_{z_s}$	1,03		1,28		1,54			1,38			1,06		1,60	
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,42	1,65	1,41	1,60	1,59	1,86		1,48	1,70	1,73	1,46	1,71	1,73	1,88
$I_{z_{con,s}}$			1,74		2,07			1,85					1,88	
$(EI)_{eff}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4324,03	3170,96	4211,43	3335,09	3524,82	2578,84	1173,58	3922,36	3028,44	2943,55	4174,46	2998,68	3460,71	2496,43
$F_{pre}$ [kN]	70,51	56,85	57,36	47,67	48,33	51,64	31,86	54,17	58,85	57,88	68,61	58,40	53,08	53,06

Tabela 49: Rezultati numeričnih izračunov preizkušenih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomikov za ULS) pri sili 100 kN

ULS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$u$ [mm]	39,94	54,67	42,55	51,85	51,33	67,32	137,80	45,75	57,23	58,90	41,41	57,80	52,27	69,51
$\Delta_{CLT}$ [mm]	1,92	2,26	1,94	2,17	2,25	2,59		2,06	2,33	2,36	1,98	2,34	2,28	2,63
$\Delta_s$ [mm]			1,92		2,39			2,08					2,41	
$\sigma_{s,zg}$ [MPa]	119,11		67,08		83,17			73,17			123,02		86,44	
$\sigma_{s,sp}$ [MPa]	128,16		80,98		99,31			87,92			132,13		102,77	
$\sigma_{s,max}$ [MPa]			140,20		172,20			152,30					178,70	
$\sigma_{les,zg}$ [MPa]	-23,60	-26,50	-24,60	-28,00	-17,60	-20,10	-71,50	-21,90	-24,30	-23,80	-21,80	-24,40	-16,40	-18,90
$\sigma_{les,sp}$ [MPa]	24,20	43,50	32,10	44,40	24,90	39,30	71,50	29,30	42,30	41,80	22,60	42,10	23,80	38,50
$\sigma_{CLT,zg}$ [MPa]	-9,83	-12,40	-10,12	-11,89	-11,72	-14,56		-10,74	-12,87	-13,19	-10,17	-12,98	-11,89	-14,92
$\sigma_{CLT,sr}$ [MPa]	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23	-0,23	-0,27		-0,21	-0,24	-0,25	-0,21	-0,24	-0,23	-0,27
$\sigma_{CLT,sp}$ [MPa]	-2,55	-2,17	-2,34	-2,18	-2,51	-2,02		-2,42	-2,17	-2,19	-2,65	-2,18	-2,54	-1,97
$F_{con,s}$ [kN]			14,79		18,43			16,15					19,18	
$F_{screw,CLT}$ [kN]	15,91	18,69	16,10	18,03	18,57	21,36		17,06	19,31	19,76	16,48	19,47	18,86	21,77
$I_{z_{les,sp}}$	0,90	1,81	1,50	2,16	1,19	1,98	3,14	1,12	1,71	1,70	0,84	1,76	0,89	1,52
$I_{z_s}$	1,07		1,17		1,44			1,27			1,10		1,49	
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,30	1,52	1,31	1,47	1,51	1,74		1,39	1,57	1,60	1,34	1,58	1,53	1,77
$I_{z_{con,s}}$			1,54		1,86			1,64					1,82	
$(EI)_{eff}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4049,04	2958,09	3800,68	3118,97	3150,57	2402,24	1173,58	3534,84	2825,77	2745,65	3905,31	2797,90	3093,91	2326,72
$F_{pre}$ [kN]	77,09	55,11	64,90	46,37	53,88	50,40	31,86	60,93	58,48	58,88	74,66	56,82	54,96	56,57

V veznih sredstvih bližje podpori so se pojavile največje strižne sile, največja glavna napetost v steklenem traku pa se je pojavila med tretjino in polovico razpona v okolici točkovnega stika na področju 1001 (glej podpoglavje 5.2).

Tako rezultati z moduli pomika za SLS (tabela 48) in ULS (tabela 49) za konfiguracijo A1 kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih najprej do porušitve vijake zveze CLT-stropnik. Drugo največjo izkoriščenost smo izračunali za upogibno trdnost steklenega traku, tretjo pa za trdnost stropnika na spodnjem robu prereza.

Rezultati z moduli pomika za SLS (tabela 48) in ULS (tabela 49) za konfiguracijo A2 kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih najprej do porušitve vijakov v točkovnih stikih steklo-les. Drugo največjo izkoriščenost smo izračunali za nosilnost vijake zveze CLT-stropnik, tretjo pa za nosilnost steklenega traku (razen za stropnik 2, pri katerem smo tretjo največjo izkoriščenost izračunali za trdnost stropnika na spodnjem robu).

Rezultati z moduli pomika za SLS (tabela 48) za konfiguracijo B kažejo, da pride pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih stropnikov 1–3 najprej do porušitve lesenega stropnika na

spodnjem robu, pri stropnikih 5, 6, 8 pa do porušitve vijajčne zveze CLT-stropnik; pri stropniku 7 se porušitvi lesenega stropnika na spodnjem robu in vijajčne zveze CLT-stropnik zgodita pri enaki sili. Rezultati z moduli pomika za ULS (tabela 49) za konfiguracijo B pa kažejo, da pride pri štirtočkovnih upogibnih preizkusih najprej do porušitve lesenega stropnika na spodnjem robu, razen pri stropniku 8, pri katerem pride najprej do porušitve vijajčne zveze CLT-stropnik.

V tabeli 50 smo izračunali razlike med konfiguracijami B in A1 oz. med B in A2. Razlike so bile izračunane glede na konfiguracijo B in tako prikazujejo vpliv steklenega traku na nosilnost in togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo.

Tabela 50: Primerjava med konfiguracijami posameznih stropnikov oz. vpliv stekla na upogibno togost in nosilnost stropnika – numerični izračun

		S 1. B - S 1. A1	S 2. B - S 2. A2	S 3. B - S 3. A2	S 5. B - S 5. A2	S 7. B - S 7. A1	S 8. B - S 8. A2
SLS	$\Delta_{EI_{eff}}[\%]$	36,36	26,28	36,68	29,52	39,21	38,63
	$\Delta_{F_{max}}[\%]$	24,02	20,33	-6,40	-7,95	17,48	0,04
ULS	$\Delta_{EI_{eff}}[\%]$	36,88	21,86	31,15	25,09	39,58	32,97
	$\Delta_{F_{max}}[\%]$	39,86	39,96	6,92	4,19	31,39	-2,85

V tabeli 50 vidimo, da je za konfiguraciji A1 vpliv steklenega traku k upogibni togosti ( $EI_{eff}$ ) sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo neodvisen od uporabe modula za SLS ali ULS. Drugače pa je pri nosilnosti ( $F_{max}$ ), saj vidimo, da pri uporabi modula pomika za SLS stekleni trak manj prispeva k večji nosilnosti kot pri uporabi modula pomika za ULS.

V tabeli 50 vidimo tudi, da je za konfiguracije A2 vpliv steklenega traku k upogibni togosti ( $EI_{eff}$ ) sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo večji pri uporabi modula za SLS kot pri uporabi modula za ULS. Pri nosilnosti ( $F_{max}$ ) pa lahko opazimo, da je pri uporabi modula pomika za SLS pri konfiguraciji A2 stropnika 2 stekleni trak povečal nosilnost, pri konfiguraciji A2 stropnika 8 stekleni trak ni prispeval k večji nosilnosti oz. pride do porušitve pri približno enaki sili, kot je nosilnost pripadajoče konfiguracije B, pri konfiguraciji A2 stropnikov 3 in 5 pa stekleni trak ni prispeval k večji nosilnosti oz. pride do porušitve pri manjši sili, kot je nosilnost pripadajoče konfiguracije B. Pri uporabi modula pomika za ULS pri konfiguraciji A2 stropnikov 2, 3 in 5 je stekleni trak povečal nosilnost, pri konfiguraciji A2 stropnika 8 pa stekleni trak ni prispeval k večji nosilnosti oz. pride do porušitve pri manjši sili, kot je nosilnost pripadajoče konfiguracije B. Izrazito pozitiven vpliv steklenega traku na nosilnost konfiguracije A2 stropnika 2 lahko pripišemo dejstvu, da ima stropnik 2 najmanjše razmerje med ocenjeno upogibno trdnostjo in modulom elastičnosti (tabela 24).

Tudi numerični izračun je pokazal, da ima stekleni trak pri konfiguraciji A1 (prilepljen stekleni trak) večji vpliv na upogibno togost kot stekleni trak pri konfiguraciji A2 (privit stekleni trak).

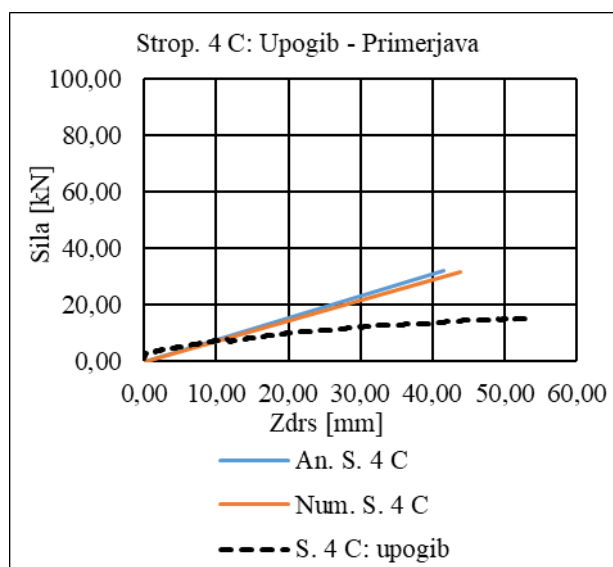


## 9 PRIMERJAVA REZULTATOV EKSPERIMENTOV TER ANALITIČNIH IN NUMERIČNIH IZRAČUNOV

Zaradi nazornejše primerjave smo rezultate štiritočkovnih upogibnih preizkusov, analitičnih izračunov in numeričnih izračunov vnesli v diagrame krivulj sil v odvisnosti od upogibov (slike 96–108).

### 9.1 Skupina 1 – Konfiguracija C

#### 9.1.1 Stropnik 4

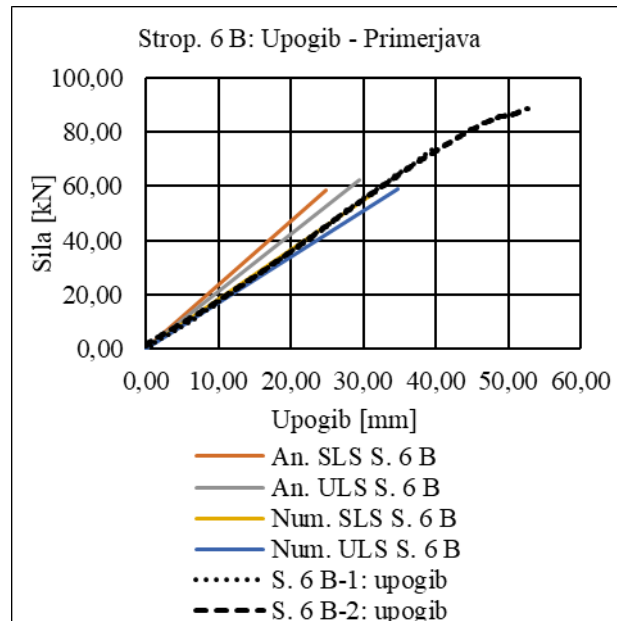


Slika 96: Primerjava rezultatov za stropnik 4, konfiguracija C; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije C stropnika 4 (slika 96 a) sledi, da smo z numeričnim izračunom dosegli nekoliko boljše ujemanje upogibne togosti kot pa z analitičnim izračunom. Z obema izračunoma smo precenili nosilnost stropnika, vendar sta bili nosilnosti skoraj enaki. Obe izračunani upogibni togosti sta večji od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Konfiguracija C predstavlja samo stropnik, tako da je razlog za odstopanje rezultatov lahko le posledica poškodovanosti stropnika (glej podpoglavje 6.4.1).

## 9.2 Skupina 2 – Konfiguracija B

### 9.2.1 Stropnik 6

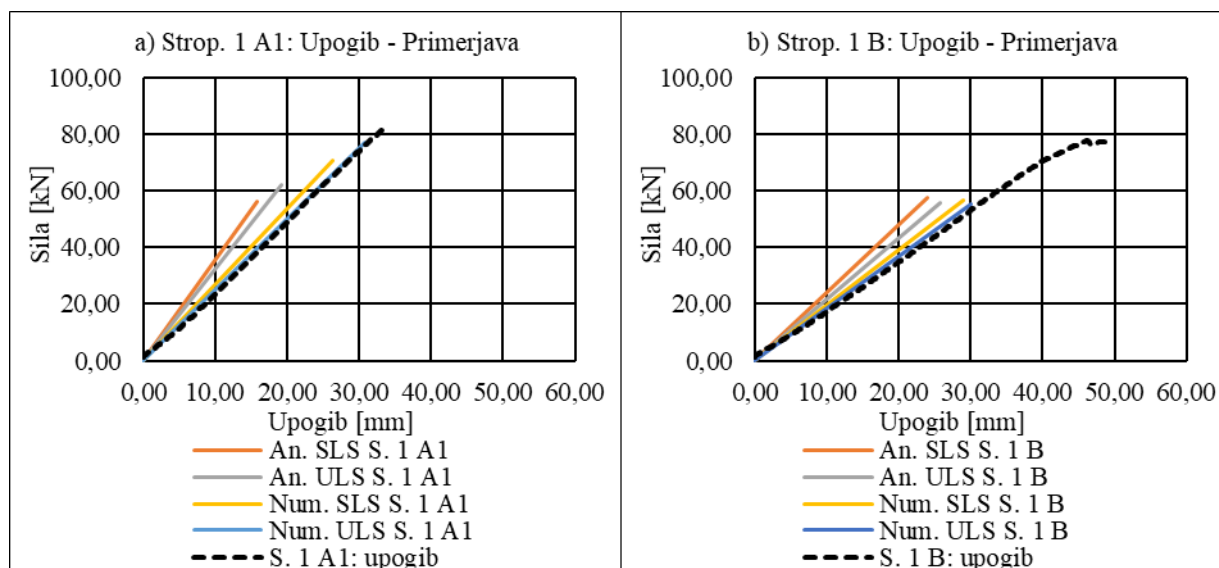


Slika 97: Primerjava rezultatov za stropnik 6, konfiguracija B; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije B (B-1 prvi preizkus, B-2 ponovljeni preizkus) stropnika 6 (slika 97 b) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Vse izračunane vrednosti nosilnosti so manjše od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Z izjemo upogibne togosti numeričnega izračuna z moduli pomika za ULS so vse izračunane upogibne togosti večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

## 9.3 Skupina 3 – Konfiguracija A1

### 9.3.1 Stropnik 1

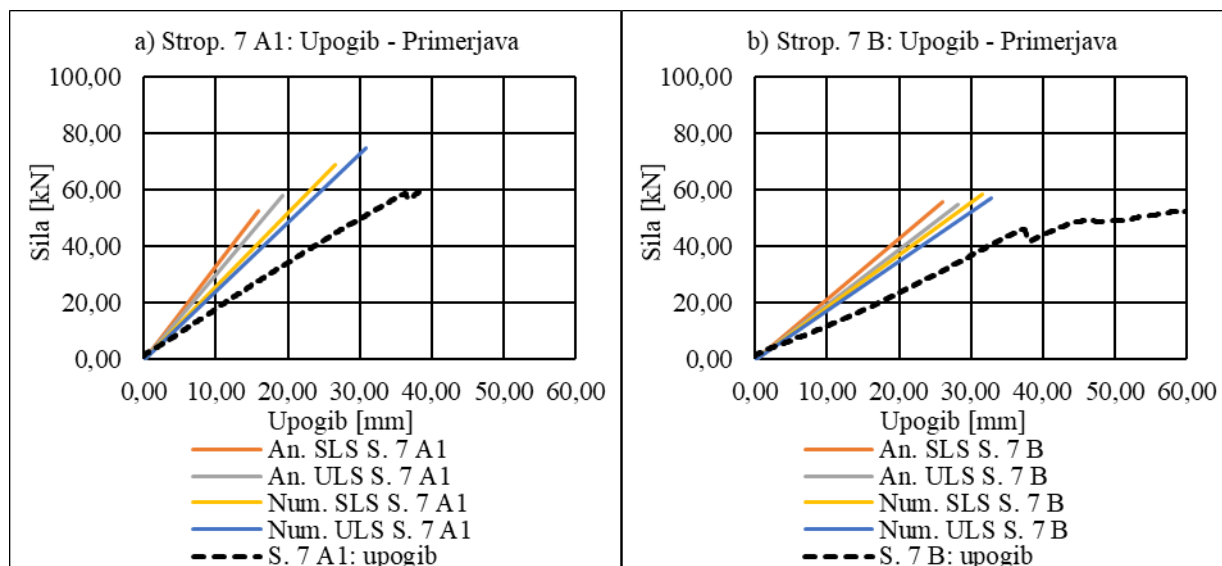


Slika 98: Primerjava rezultatov za stropnik 1: a) konfiguracija A1 (CLT+stropnik+prilepljeno steklo), b) konfiguracija B (CLT+stropnik); črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije A1 stropnika 1 (slika 98 a) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti in nosilnosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS. Najslabše ujemanje upogibne togosti in nosilnosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost in manjšo nosilnost). V vseh izračunih je bila upogibna togost precejšena.

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije B stropnika 1 (slika 98 b) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost in manjšo nosilnost). V vseh izračunih je bila nosilnost podcenjena.

### 9.3.2 Stropnik 7



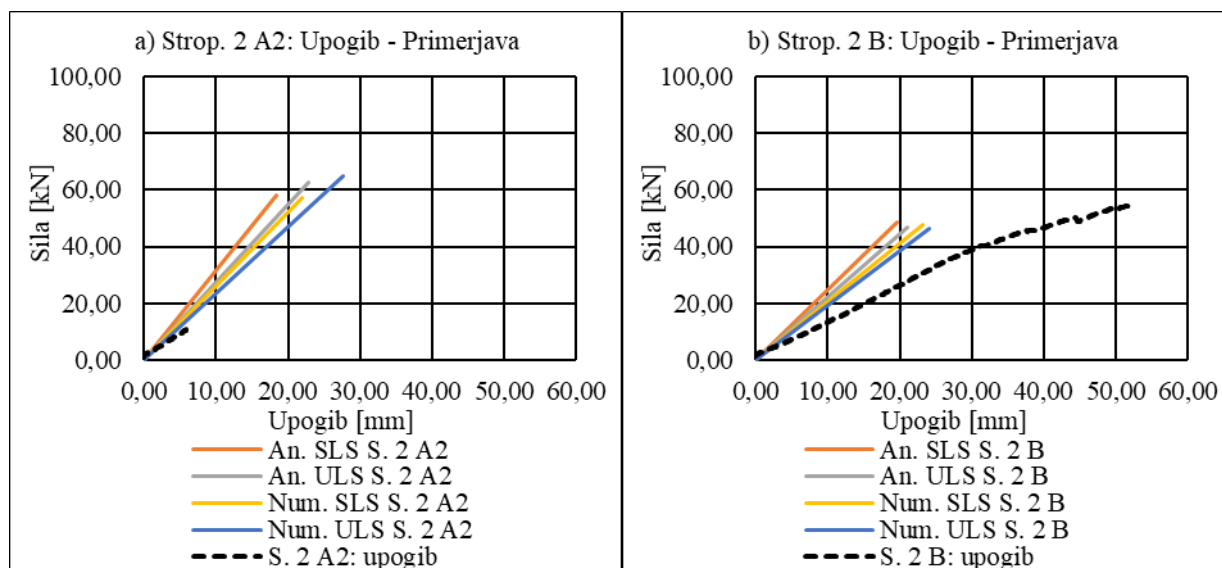
Slika 99: Primerjava rezultatov za stropnik 7: a) konfiguracija A1, b) konfiguracija B; črtna črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije A1 stropnika 7 (slika 99 a) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Najboljše ujemanje nosilnosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejnost stanje ULS. V numeričnih izračunih je bila nosilnost precenjena, v analitičnih izračunih pa je bila nosilnost podcenjena. Vse izračunane upogibne togosti so večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije B stropnika 7 (slika 99 b) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS, a je bilo ujemanje relativno slabo. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Vse izračunane vrednosti nosilnosti so bile večje od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom, a so bile tudi vse izračunane vrednosti nosilnosti zelo blizu vrednosti nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Vse izračunane upogibne togosti so večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

## 9.4 Skupina 4 – Konfiguracija A2

### 9.4.1 Stropnik 2

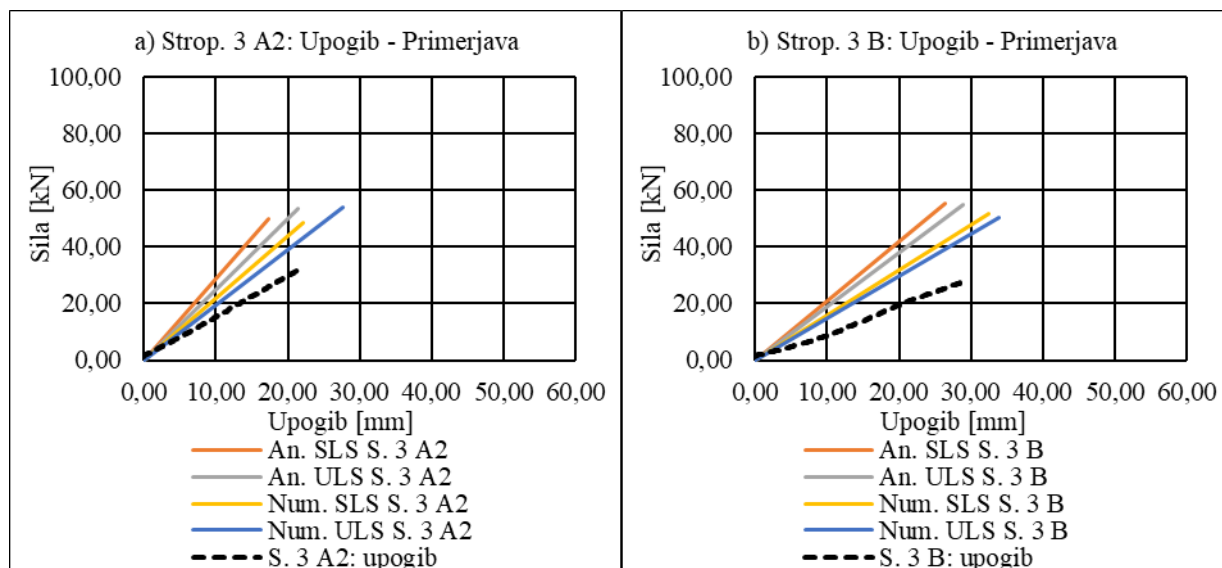


Slika 100: Primerjava rezultatov za stropnik 2: a) konfiguracija A2 (CLT+stropnik+privito steklo), b) konfiguracija B (CLT+stropnik); črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije A2 stropnika 2 (slika 100 a) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Konfiguracija A2 stropnika 2 se je sicer med upogibnim preizkusom porušila pri zelo majhni sili, kar je verjetno posledica nenatančnosti pri izdelavi ali napake v steklenem traku. Vse izračunane vrednosti nosilnosti so večje od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Prav tako so vse izračunane upogibne togosti večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije B stropnika 2 (slika 100 b) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS, a je bilo ujemanje vseeno relativno slabo. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Vse izračunane vrednosti nosilnosti so manjše od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Vse izračunane upogibne togosti pa so večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

### 9.4.2 Stropnik 3

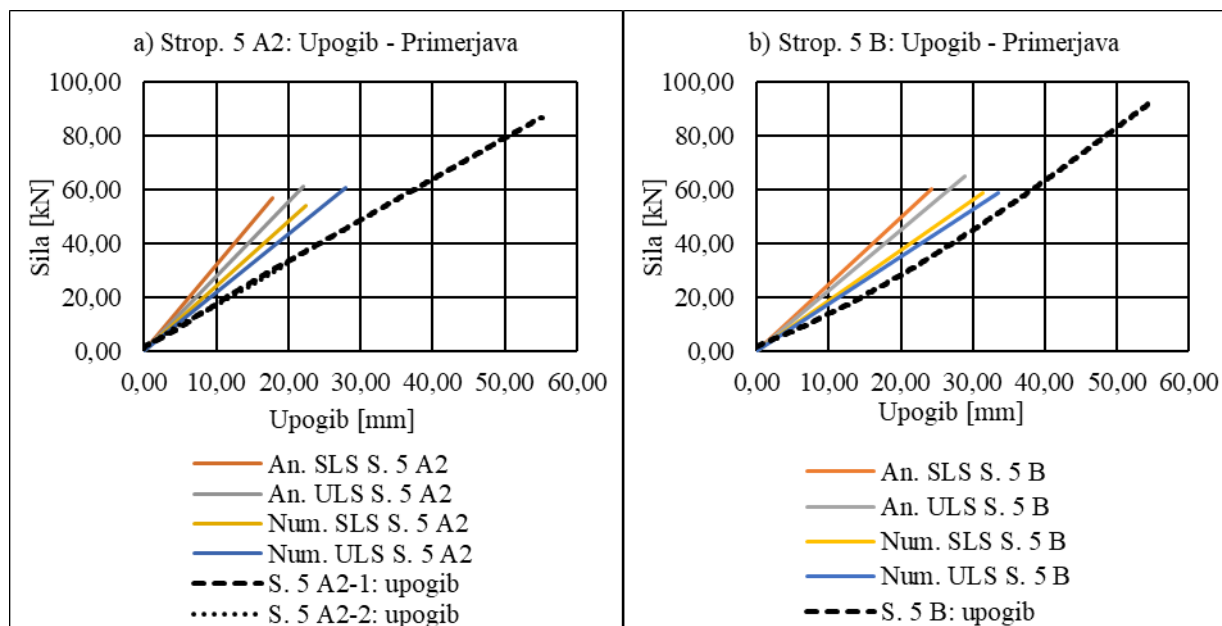


Slika 101: Primerjava rezultatov za stropnik 3: a) konfiguracija A2 (CLT+stropnik+privito steklo), b) konfiguracija B (CLT+stropnik); črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije A2 stropnika 3 (slika 101 a) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Vse izračunane vrednosti nosilnosti so večje od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Prav tako so vse izračunane upogibne togosti večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije B stropnika 3 (slika 101 b) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS, a je bilo ujemanje relativno slabo. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Vse izračunane vrednosti nosilnosti so večje od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Prav tako so vse izračunane upogibne togosti večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

### 9.4.3 Stropnik 5



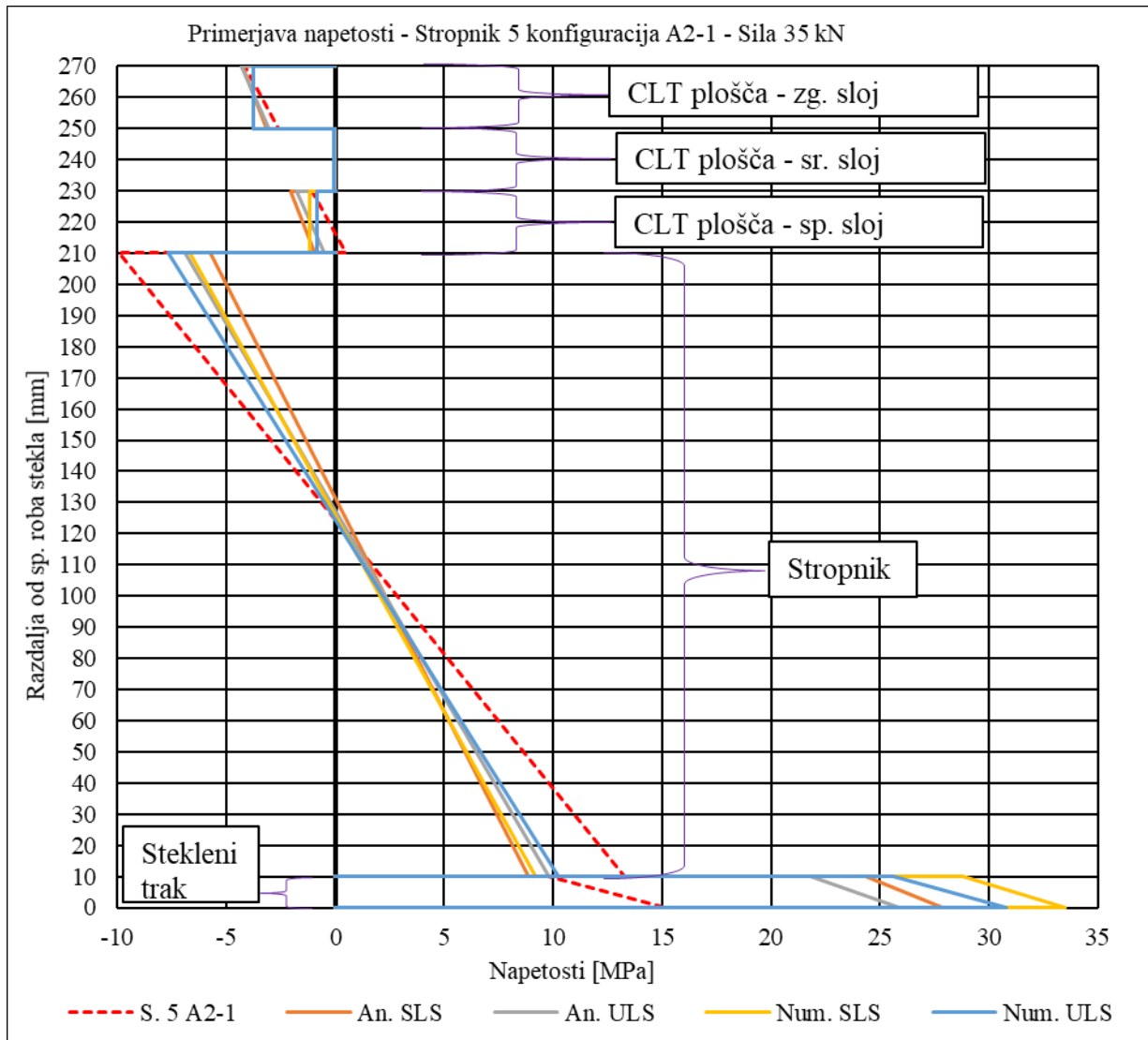
Slika 102: Primerjava rezultatov za stropnik 5: a) konfiguracija A2, b) konfiguracija B; črtna črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije A2 (A2-1 prvi preizkus, A2-2 ponovljeni preizkus iste konfiguracije) stropnika 5 (slika 102 a) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Prvi preizkus konfiguracije A2 stropnika 5 (S. 5 A2-1) ni rezultiral v poružitvi, tako da ga pri primerjavi nosilnosti ni smiselno upoštevati. Vse izračunane nosilnosti so večje od nosilnosti, ki smo jo dosegli s ponovljenim upogibnim preizkusom konfiguracije A2 stropnika 5 (S. 5 A2-2). Tudi vse izračunane upogibne togosti so večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije B stropnika 5 (slika 102 b) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Vse izračunane vrednosti nosilnosti so manjše od nosilnosti (oz. od maksimalne sile, saj stropnika 5 nismo uspeli porušiti), ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Vse izračunane upogibne togosti so večje od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

Na stropniku 5 smo merili tudi deformacije, na podlagi katerih smo ocenili napetosti v prerezu na sredini razpona pri različnih konfiguracijah in tako dobili možnost primerjati tudi eksperimentalne ter analitično in numerično izračunane napetosti. Primerjavo smo izvedli za dve različni sili, in sicer za silo 35 kN, pri kateri imamo primerjavo za tri konfiguracije (A2-1, A2-2 in B), ter za silo 85 kN, pri kateri imamo primerjavo za dve konfiguraciji A2-1 in B.

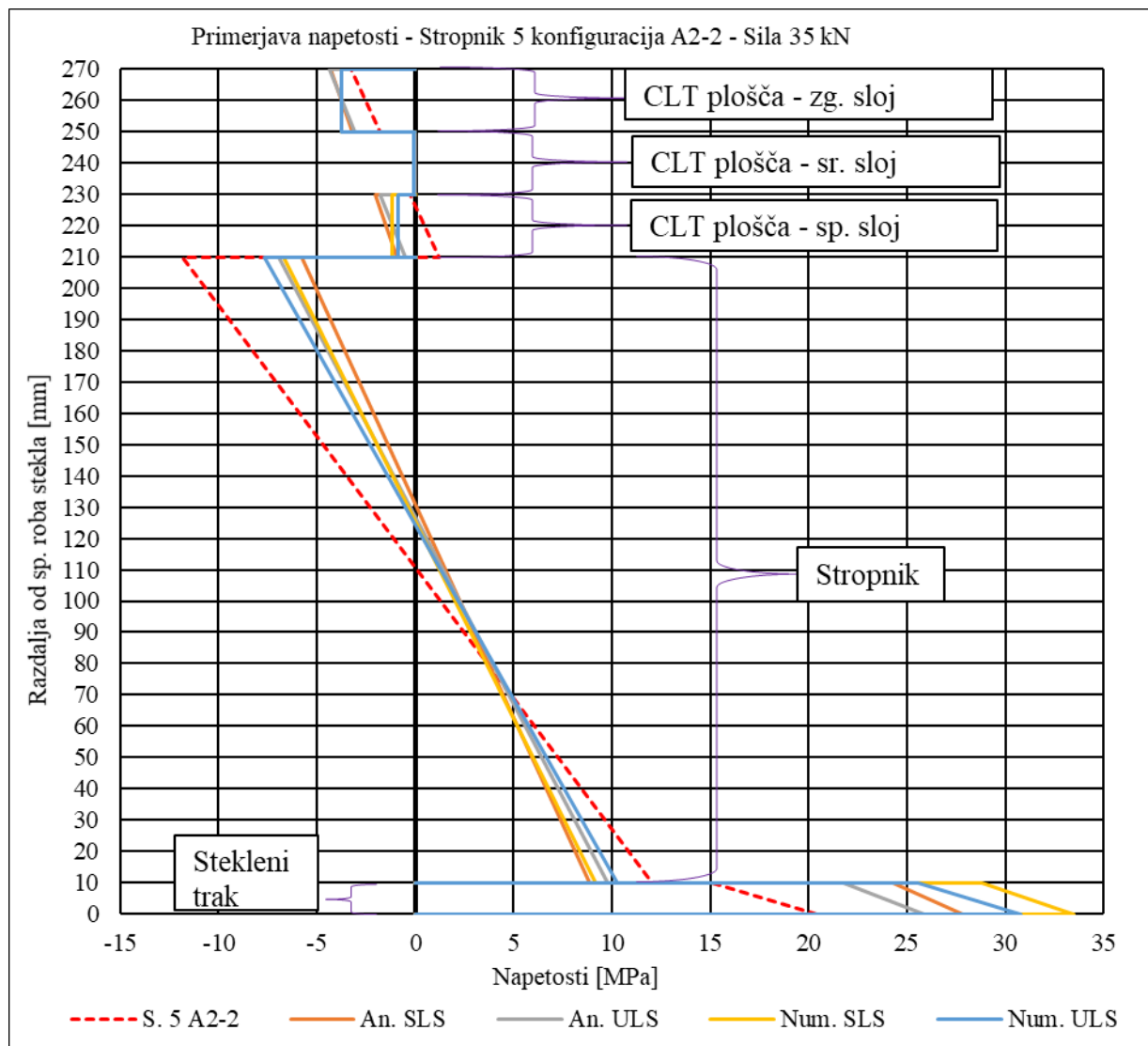
Zaradi nazornejše primerjave smo rezultate upogibnih preizkusov, analitičnih izračunov in numeričnih izračunov vnesli v diagrame napetosti v prerezu na sredini razpona (slike 103-107).



Slika 103: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-1; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti

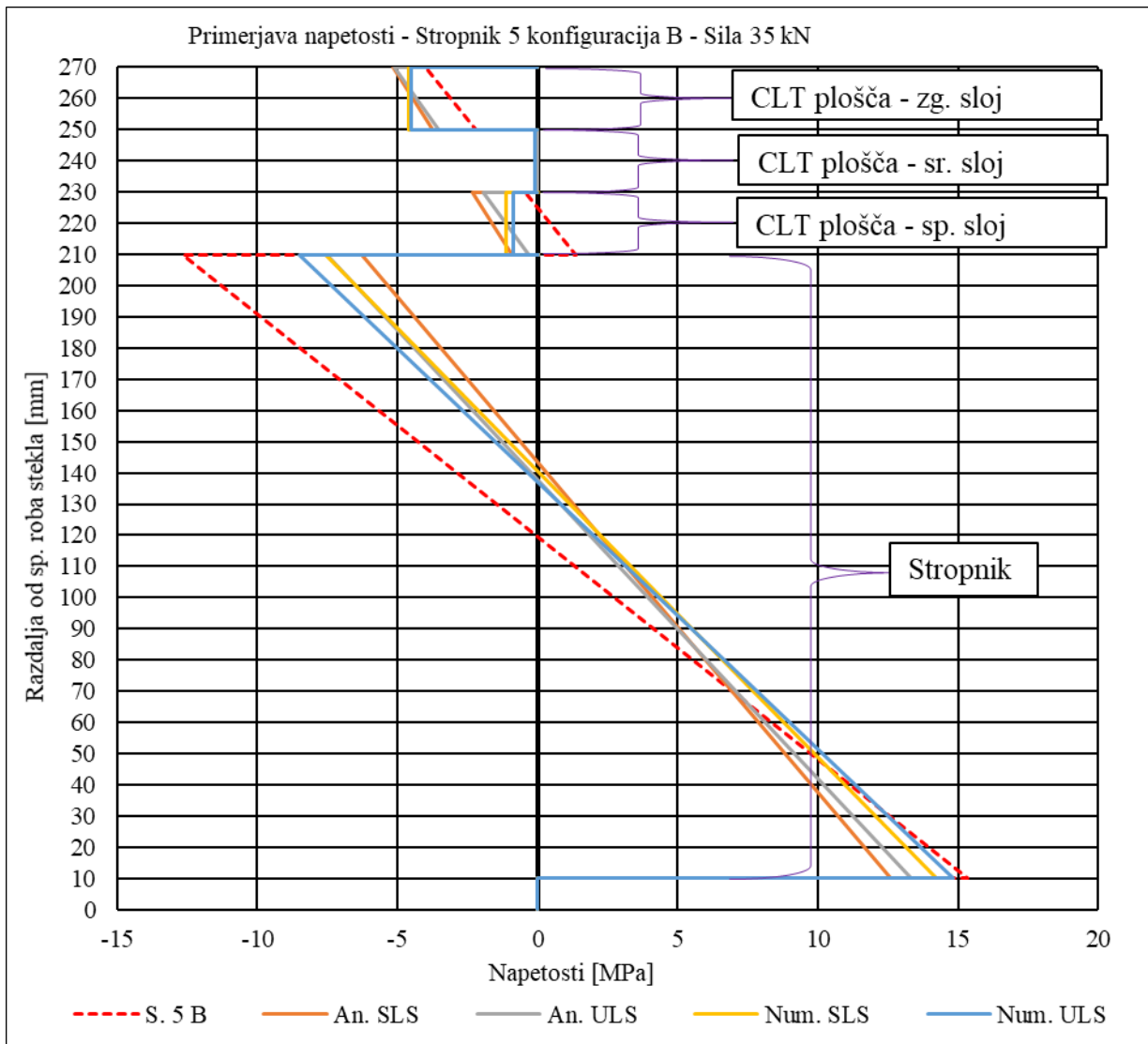
Na sliki 103 (primerjava za konfiguracijo A2-1 pri sili 35 kN) vidimo, da smo z izračuni precenili vpliv steklenega traku. Eksperimentalno določene napetosti v steklenem traku so manjše od izračunanih. Analitično izračunane napetosti so bile sicer manjše od numerično izračunanih. Slabša učinkovitost oz. šibko sovprežno delovanje steklenega traku je bila posledica premalo privitih lesenih vijakov v točkovnih stikih steklo-les in je povzročila, da je leseni stropnik prevzel večji delež obremenitve kot smo izračunali (eksperimentalno določene napetosti v lesenem stropniku so večje od izračunanih). Napetosti na zgornjem robu CLT plošče se sicer dobro ujemajo, na spodnjem robu pa smo izračunali tlačne napetosti, z eksperimentom pa določili natezne napetosti. Omenjeno kaže, da smo z izračuni precenili tudi togost priključne ravnine med CLT ploščo in lesnim stropnikom.





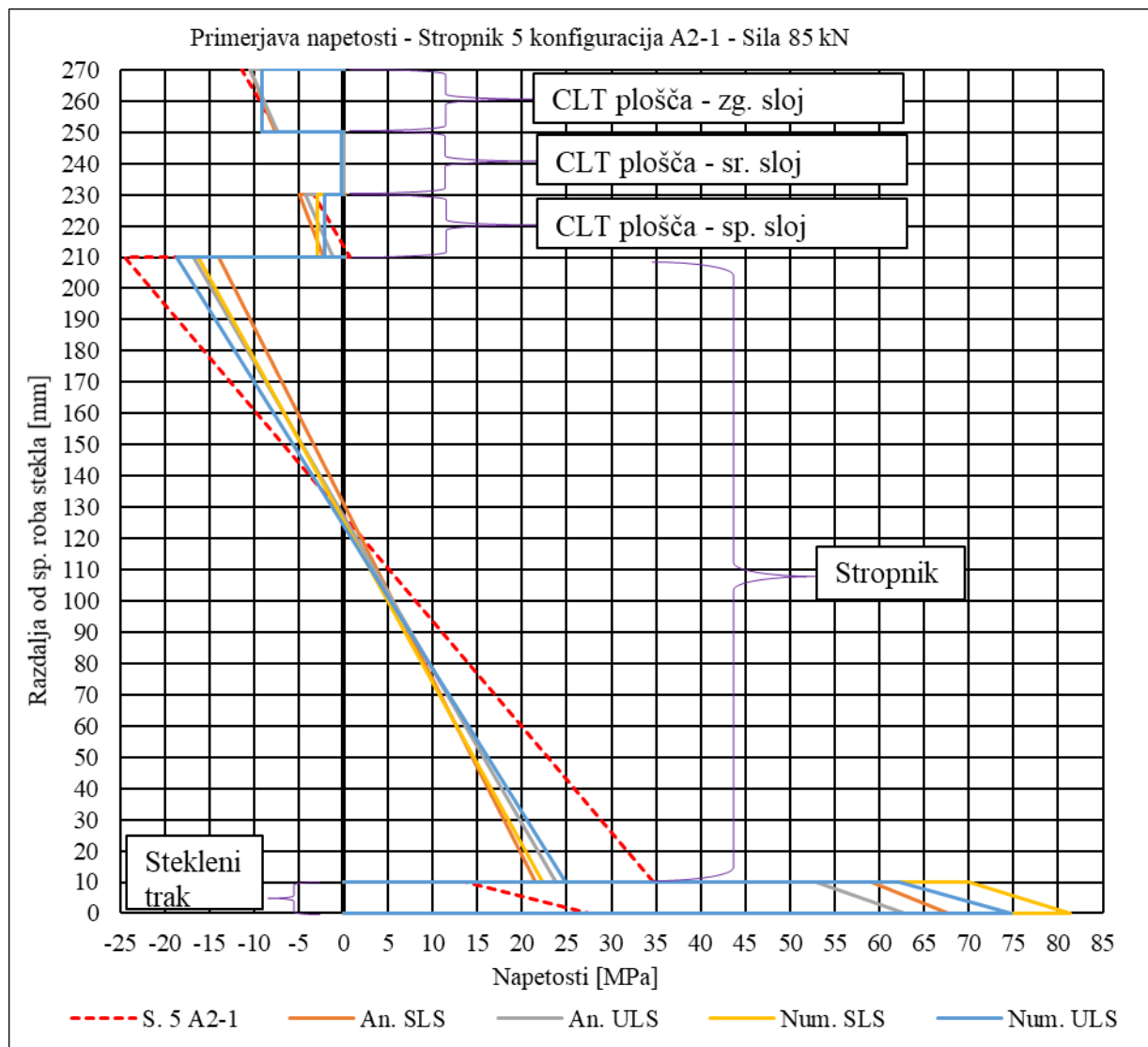
Slika 104: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-2; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti

Na sliki 104 je primerjava za konfiguracijo A2-2 pri sili 35 kN, ki se je od konfiguracije A2-1 razlikovala po tem, da smo lesne vijake v točkovnih stikih steklo-les dodatno privili in lesni vijak v skrajnem točkovnem stiku celo pretrgali. Vidimo, da smo z izračuni ponovno precenili vpliv steklenega traku, vendar pa je dodatno privitje vendarle imelo želen učinek in razlika med eksperimentalno določenimi in izračunanimi napetostmi ni bila tako velika, kot pri konfiguraciji A2-1. Analitično izračunane napetosti so bile sicer manjše od numerično izračunanih. Ponovno pa je leseni stropnik očitno prevzel večji delež obremenitve, kot smo izračunali (eksperimentalno določene napetosti v lesenem stropniku so večje od izračunanih), kar pa je tokrat bila tudi posledica slabše učinkovitosti CLT plošče. Napetosti na zgornjem robu CLT plošče so bile opazno nižje od izračunanih. Na spodnjem robu smo izračunali tlačne napetosti, z eksperimentom pa določili natezne napetosti. Omenjeno kaže, da smo z izračuni precenili tudi togost priključne ravnine med CLT ploščo in lesenim stropnikom.



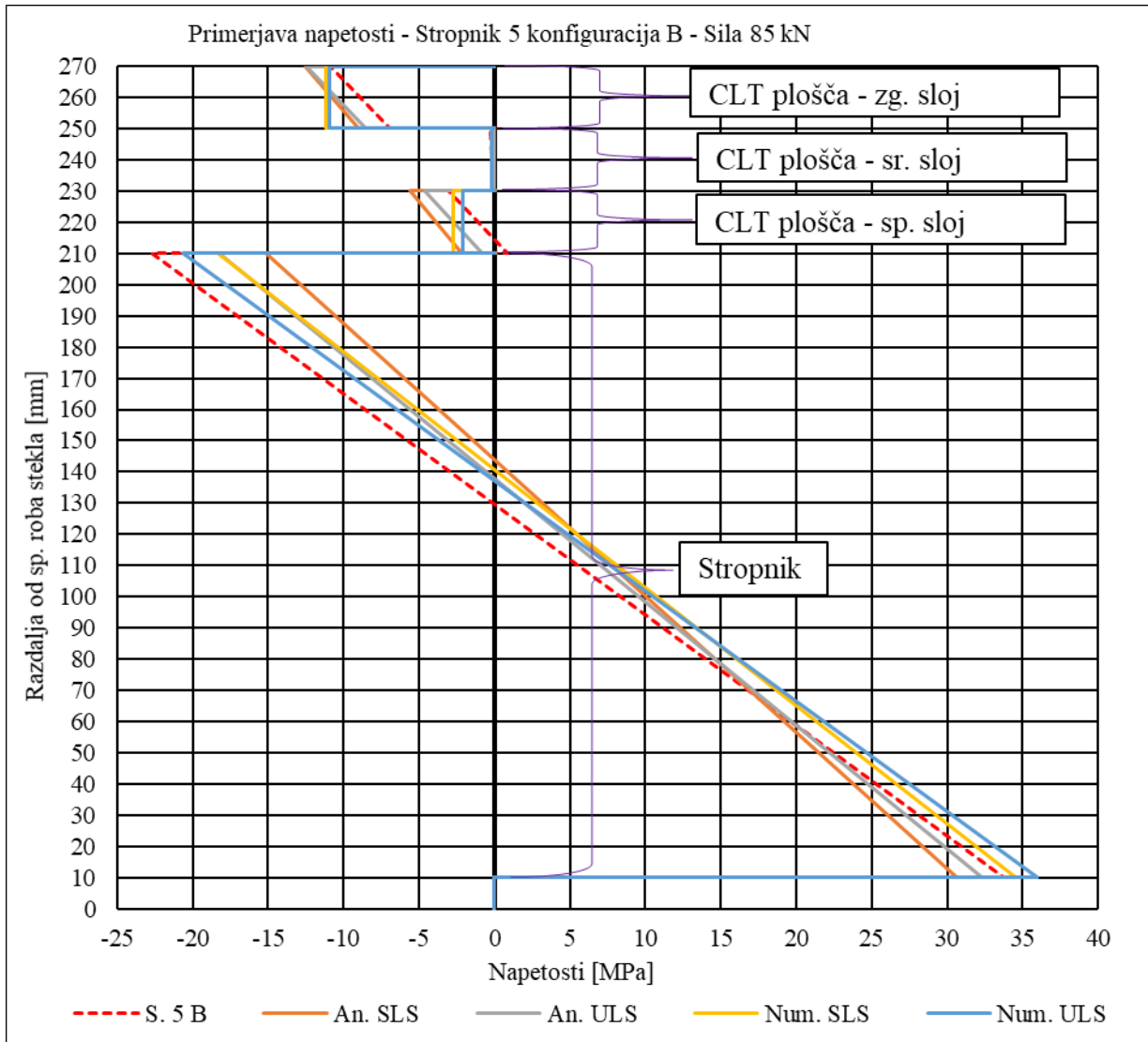
Slika 105: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo B; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti

Na sliki 105 je primerjava za konfiguracijo B pri sili 35 kN, ki se je od konfiguracije A2-2 razlikovala po tem, da ni imela steklene traku, saj je ta počil pri preizkusu konfiguracije A2-2. Vidimo, da smo z izračuni ponovno precenili vpliv CLT plošče. Ponovno je leseni stropnik očitno prevzel večji delež obremenitve kot smo izračunali (eksperimentalno določene napetosti na zgornjem robu lesenega stropnika so večje oz. negativnejše od izračunanih), kar je bila posledica slabše učinkovitosti CLT plošče, so se pa napetosti boljše ujemale na spodnjem robu lesenega stropnika.



Slika 106: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo A2-1; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti

Na sliki 106 (primerjava za konfiguracijo A2-1 pri sili 85 kN) ponovno vidimo, da smo z izračuni precenili vpliv steklenega traku. Eksperimentalno določene napetosti v steklenem traku so dosti manjše od izračunanih. Analitično izračunane napetosti so bile sicer manjše od numerično izračunanih. Še enkrat trdimo, da je slabša učinkovitost oz. šibko sovprežno delovanje steklenega traku bila posledica premalo privitih lesnih vijakov v točkovnih stikih steklo-les in je povzročila, da je leseni stropnik prevzel večji delež obremenitve, kot smo izračunali (eksperimentalno določene napetosti v lesenem stropniku so večje od izračunanih). Napetosti na zgornjem robu CLT plošče se ponovno dobro ujemajo, na spodnjem robu pa smo izračunali tlačne napetosti, z eksperimentom pa določili natezne napetosti. Omenjeno kaže, da smo z izračuni precenili tudi togost priključne ravnine med CLT ploščo in lesenim stropnikom.



Slika 107: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo B; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti

Na sliki 107 (primerjava za konfiguracijo B pri sili 85 kN) vidimo dobro ujemanje eksperimentalno določenih in izračunanih napetosti. Na spodnjem robu lesenega stropnika so bile numerično izračunane napetosti večje od eksperimentalno določenih, analitično izračunane napetosti pa nekoliko manjše. Na zgornjem robu stropnika so bile izračunane napetosti ponovno manjše od eksperimentalno določenih. Izračunane napetosti v CLT plošči so bile bolj negativne (tlačne) kot pa smo jih eksperimentalno določili. Vendarle pa je ujemanje rezultatov pri konfiguraciji B pri sili 85 kN najboljše v primerjavi z ostalimi konfiguracijami oz. silami, kar je posledica tega, da je pri tej relativno visoki sili bila aktivacija lesnih vijakov najuspešnejša.

Podroben izpis eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti je podan v tabelah 51-54.

Tabela 51: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguraciji A2-1 in A2-2 ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti

	Eksp. S. 5 A2-1	Eksp. S. 5 A2-2	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	-4,17	-3,23	-4,28	-4,33	-3,75	-3,76
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$ [MPa]	0,50	1,19	-0,94	-0,49	-1,17	-0,85
$\sigma_{\text{les.zg}}$ [MPa]	-9,94	-11,81	-5,75	-6,93	-6,69	-7,67
$\sigma_{\text{les.sp}}$ [MPa]	13,26	12,07	8,84	9,80	9,21	10,26
$\sigma_{\text{s.zg}}$ [MPa]	9,78	15,12	24,33	21,80	28,82	25,61
$\sigma_{\text{s.sp}}$ [MPa]	15,15	20,44	27,88	25,87	33,50	30,77

Tabela 52: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo B ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti

	Eksp. S. 5 B	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	-4,01	-5,15	-5,11	-4,59	-4,50
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$ [MPa]	1,36	-0,89	-0,33	-1,13	-0,85
$\sigma_{\text{les.zg}}$ [MPa]	-12,67	-6,25	-7,53	-7,56	-8,51
$\sigma_{\text{les.sp}}$ [MPa]	15,34	12,61	13,31	14,21	14,81

Tabela 53: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo A2-1 ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti

	Eksp. S. 5 A2-1	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	-11,36	-10,40	-10,51	-9,10	-9,13
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$ [MPa]	0,72	-2,28	-1,19	-2,85	-2,06
$\sigma_{\text{les.zg}}$ [MPa]	-24,50	-13,97	-16,82	-16,24	-18,62
$\sigma_{\text{les.sp}}$ [MPa]	34,77	21,47	23,79	22,36	24,91
$\sigma_{\text{s.zg}}$ [MPa]	13,71	59,09	52,94	69,98	62,19
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	27,51	67,71	62,83	81,35	74,73

Tabela 54: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo B ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti

	Eksp. S. 5 B	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	-10,82	-12,50	-12,41	-11,14	-10,94
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$ [MPa]	0,82	-2,17	-0,80	-2,74	-2,06
$\sigma_{\text{les.zg}}$ [MPa]	-22,69	-15,18	-18,28	-18,36	-20,66
$\sigma_{\text{les.sp}}$ [MPa]	33,71	30,61	32,34	34,51	35,96

Podatke iz tabel 51-54 smo uporabili za izračun odstopanja izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih. Odstopanja (v odstotkih) so podana v tabelah 55-59.

Tabela 55: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-1 (v %)

	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$	-2,72	-3,81	10,10	9,85
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$	-286,63	-197,51	-333,41	-268,61
$\sigma_{\text{les.zg}}$	42,11	30,32	32,74	22,88
$\sigma_{\text{les.sp}}$	-33,32	-26,12	-30,58	-22,67
$\sigma_{\text{s.zg}}$	148,81	122,89	194,66	161,88
$\sigma_{\text{s.sp}}$	84,00	70,73	121,06	103,09

V tabeli 55 vidimo, da so za konfiguracijo A2-1 pri sili 35 kN odstopanja izračunanih napetosti na zgornjem robu CLT plošče bila manjša ali enaka 10 %, pri vseh ostalih točkah prereza pa so bila odstopanja dosti večja. Odstopanja so z uporabo modulov pomika za SLS večja, kot pa z uporabo modulov pomika za ULS, kar kaže na precenjene togosti priključnih ravnin oz. da slabša ohranjenost delov stropnikov negativno vpliva tudi na togost priključnih ravnin.

Tabela 56: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-2 (v %)

	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$	-32,45	-33,86	-15,92	-16,24
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$	-178,96	-141,25	-198,75	-171,33
$\sigma_{\text{les.zg}}$	51,29	41,37	43,41	35,11
$\sigma_{\text{les.sp}}$	-26,76	-18,85	-23,75	-15,05
$\sigma_{\text{s.zg}}$	60,94	44,17	90,59	69,39
$\sigma_{\text{s.sp}}$	36,37	26,54	63,84	50,52

V tabeli 56 vidimo, da so za konfiguracijo A2-2 pri sili 35 kN odstopanja izračunanih napetosti na spodnjem robu lesenega stropnika najmanjša, z izjemo numeričnega izračuna z moduli pomika za SLS, kjer je najmanjše odstopanje na zgornjem robu CLT plošče. Z dodatnim privitjem steklenih trakov pa smo v primerjavi s konfiguracijo A2-1 opazno zmanjšali odstopanje napetosti v steklenem traku, tudi v povprečju pa so bila odstopanja po dodatnem privitju manjša za vse dele prereza. Odstopanja so z uporabo modulov pomika za SLS večja,

kot pa z uporabo modulov pomika za ULS, kar kaže na precenjene togosti priključnih ravnin oz. da slabša ohranjenost delov stropnikov negativno vpliva tudi na togost priključnih ravnin.

Tabela 57: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo B (v %)

	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$	-28,50	-27,57	-14,44	-12,43
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$	-165,55	-124,19	-182,81	-162,23
$\sigma_{\text{les.zg}}$	50,67	40,58	40,34	32,88
$\sigma_{\text{les.sp}}$	-17,80	-13,18	-7,34	-3,46

V tabeli 57 vidimo, da so za konfiguracijo B pri sili 35 kN odstopanja izračunanih napetosti na spodnjem robu lesenega stropnika najmanjša, kar je pomembno, saj je nosilnost konfiguracije B omejena ravno z nosilnostjo na upogibno-natezne napetosti. Odstopanja so z uporabo modulov pomika za SLS večja, kot pa z uporabo modulov pomika za ULS, kar kaže na precenjene togosti priključnih ravnin oz. da slabša ohranjenost delov stropnikov negativno vpliva tudi na togost priključnih ravnin.

Tabela 58: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo A2-1 (v %)

	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$	8,47	7,49	19,89	19,67
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$	-415,08	-264,62	-494,06	-384,66
$\sigma_{\text{les.zg}}$	42,96	31,34	33,72	24,01
$\sigma_{\text{les.sp}}$	-38,24	-31,57	-35,70	-28,37
$\sigma_{\text{s.zg}}$	331,08	286,17	410,50	353,71
$\sigma_{\text{s.sp}}$	146,09	128,35	195,65	171,62

V tabeli 58 vidimo, da so za konfiguracijo A2-1 pri sili 85 kN odstopanja izračunanih napetosti na zgornjem robu CLT plošče bila v primerjavi z ostalimi točkami prereza najmanjša (manjša od 20 %). Odstopanja so z uporabo modulov pomika za SLS večja, kot pa z uporabo modulov pomika za ULS, kar kaže na precenjene togosti priključnih ravnin oz. da slabša ohranjenost delov stropnikov negativno vpliva tudi na togost priključnih ravnin.

Tabela 59: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo B (v %)

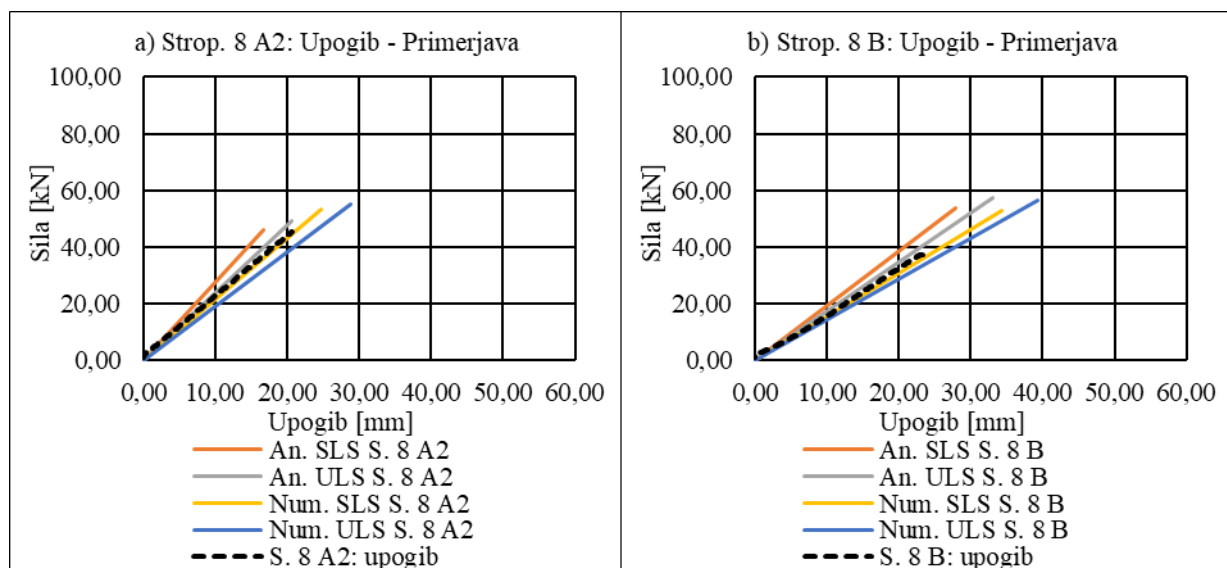
	An. SLS	An. ULS	Num. SLS	Num. ULS
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$	-15,56	-14,72	-2,92	-1,11
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$	-365,22	-197,88	-435,07	-351,82
$\sigma_{\text{les.zg}}$	33,11	19,43	19,10	8,99
$\sigma_{\text{les.sp}}$	-9,20	-4,09	2,36	6,65

V tabeli 59 vidimo, da so za konfiguracijo B pri sili 85 kN odstopanja izračunanih napetosti na spodnjem robu lesenega stropnika ponovno najmanjša, kar je pomembno, saj je nosilnost konfiguracije B omejena ravno z nosilnostjo na upogibno-natezne napetosti. Numerični

izračun je natezne napetosti na spodnjem robu lesenega stropnika celo precenil, medtem ko jih je analitični izračun podcenil, a so odstopanja obeh izračunov z moduloma za SLS in ULS manjša od 10 %, na podlagi česar lahko sklepamo, da pri konfiguraciji B togost priključne ravnine CLT-stropnik nima tolikšnega vpliva na napetosti na spodnjem robu lesenega stropnika, kot ga ima pri ostalih konfiguracijah. Odstopanja so z uporabo modulov pomika za SLS večja, kot pa z uporabo modulov pomika za ULS, kar kaže na precenjene togosti priključnih ravnin oz. da slabša ohranjenost delov stropnikov negativno vpliva tudi na togost priključnih ravnin. Z izjemo spodnjega roba CLT plošče so bila odstopanja napetosti na vseh točkah manjša ali enaka 33 %, kar je že primerljivo s študijo [139], kjer so prav tako z gama metodo izračunali napetosti v prerezu leseno-betonskega nosilca in jih primerjali z eksperimentalno določenimi napetostmi ter dosegli odstopanja manjša ali enaka 25,5 %.

Največja odstopanja smo pri vseh konfiguracijah opazili na spodnjem robu CLT plošče. Vsi izračuni so rezultirali v tlačnih napetostih, na podlagi deformacij pri upogibnem preizkusu pa smo tam vedno določili natezne napetosti. Absolutno gre sicer za majhna odstopanja, tako da so visoka odstotna odstopanja varljiva oz. imajo zelo majhen vpliv na točnost rezultatov v smislu ravnotežja sil in momentov na ravni prereza (kot smo prikazali v podpoglavju 6.7.3).

#### 9.4.4 Stropnik 8



Slika 108: Primerjava rezultatov za stropnik 8: a) konfiguracija A2, b) konfiguracija B; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije A2 stropnika 8 (slika 108 a) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Najboljše ujemanje nosilnosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS. Vse izračunane vrednosti nosilnosti so večje od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom, a so si zelo podobne. Obe analitično izračunani upogibni togosti sta večji od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim



preizkusom, obe numerično izračunani upogibni togosti pa sta manjši od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

Iz primerjave krivulj sile v odvisnosti od upogiba konfiguracije B stropnika 8 (slika 108 b) sledi, da smo najboljše ujemanje upogibne togosti dosegli z numeričnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS, ujemanje vseh izračunov je bilo relativno dobro. Najslabše ujemanje upogibne togosti smo dosegli z analitičnim izračunom z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (izračunali smo večjo upogibno togost). Vse izračunane vrednosti nosilnosti so večje od nosilnosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom. Obe analitično izračunani upogibni togosti sta večji od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom, obe numerično izračunani upogibni togosti pa sta manjši od upogibne togosti, ki smo jo dosegli z upogibnim preizkusom.

## 9.5 Skupna primerjava

Podrobni rezultati primerjave so v tabeli 60. Primerjava je bila izvedena tako, da rezultati upogibnih preizkusov predstavljajo osnovo, glede na katero smo izračunali odstopanje rezultatov ( $\Delta$ ) analitičnih in numeričnih izračunov. Primerjali smo efektivne upogibne togosti ( $EI_{\text{eff}}$ ) in nosilnosti oz. maksimalne sile, dosežene z upogibnimi preizkusi ( $F_{\text{PRE}}$ ). Primerjali smo tudi količini  $K_{\text{TPR},s}$  in  $K_{\text{TPR},\text{CLT}}$ , ki služita kot merili togosti priključnih ravnin steklenega traku in CLT plošče. Definirali smo ju kot razmerje med obremenitvijo (silo v hidravličnem cilindru) in zdrsom steklenega traku oz. CLT plošče. Primerjave  $K_{\text{TPR},s}$  za numerični izračun konfiguracije A1 nismo izvedli, saj smo numerični izračun izvedli z upoštevanjem popolnoma togega stika med steklenim trakom in lesenim stropnikom.

Tabela 60: Primerjava rezultatov eksperimentov ter analitičnih in numeričnih izračunov

Konf.	Analitični izr. SLS				Analitični izr. ULS				Numerični izr. SLS				Numerični izr. ULS			
	$\Delta(EI)_{\text{eff}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},\text{CLT}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},s}$ [%]	$\Delta F_{\text{PRE}}$ [%]	$\Delta(EI)_{\text{eff}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},\text{CLT}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},s}$ [%]	$\Delta F_{\text{PRE}}$ [%]	$\Delta(EI)_{\text{eff}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},\text{CLT}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},s}$ [%]	$\Delta F_{\text{PRE}}$ [%]	$\Delta(EI)_{\text{eff}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},\text{CLT}}$ [%]	$\Delta K_{\text{TPR},s}$ [%]	$\Delta F_{\text{PRE}}$ [%]
S 1. A1	48,22	-1,76	11333,88	-31,89	34,13	-27,57	12545,71	-24,67	10,70	-8,06		-14,67	3,66	-29,21		-6,71
S 1. B	44,36	-0,04		-25,78	30,50	-27,04		-28,33	17,86	-2,06		-26,99	9,95	-25,15		-29,21
S 2. A2	97,89	124,78	-48,30	445,18	73,04	63,93	-62,09	487,81	63,80	107,91	-60,35	438,12	47,82	57,30	-69,42	508,80
S 2. B	99,95	60,78		-11,86	80,92	18,62		-14,96	66,74	48,16		-13,79	55,94	13,61		-16,15
S 3. A2	103,74	165,53	168,91	55,14	76,05	87,87	94,31	66,04	54,20	136,68	111,90	50,43	37,83	76,61	62,22	67,70
S 3. B	143,17	230,59		103,44	119,79	137,01		101,10	85,09	196,49		89,57	72,42	124,22		85,01
S 4. C	76,84			108,97	76,84			108,97	66,39			108,21	66,39			108,21
S 5. A2-1	92,01	70,17	237,15	-34,26	67,51	22,65	145,87	-29,28	45,55	54,82	159,05	-37,66	31,17	16,50	99,14	-29,88
S 5. A2-2	112,37	173,78	128,62	61,72	85,27	97,32	66,73	73,97	60,99	149,09	75,66	53,37	45,08	87,44	35,04	72,50
S 5. B	90,10	164,80		-34,65	71,94	93,36		-29,41	43,80	140,80		-35,93	34,17	83,56		-36,34
S 6. B-1	31,30	-0,06		-20,82	18,73	-27,99		-15,50	2,11	-1,96		-21,42	-4,75	-25,40		-20,06
S 6. B-2	38,12	-15,13		-34,32	24,89	-38,85		-29,91	7,41	-16,74		-34,82	0,19	-36,65		-33,69
S 7. A1	98,46	171,06	-65,37	-12,03	79,17	98,35	-61,95	-3,34	54,74	138,15		14,92	44,76	82,81		25,05
S 7. B	103,72	225,05		-2,77	84,07	135,55		-4,65	76,29	200,63		1,87	64,49	129,00		-0,89
S 8. A2	29,44	7,64	103,63	1,07	11,36	-23,73	46,77	7,83	0,26	-3,64	56,75	16,53	-10,36	-28,13	19,85	20,66
S 8. B	22,21	-4,21		44,36	10,64	-31,34		54,77	-1,54	-14,11		42,94	-8,23	-35,12		52,41

V tabeli 60 vidimo, da v povprečju rezultati analitičnega in numeričnega izračuna zelo odstopajo od rezultatov upogibnih preizkusov. Glavni razlog za to je poškodovanost

stropnikov, zaradi česar so bili ti tudi odstranjeni iz dvorca na Zgornji Polskavi. Le z uporabo neporušnih metod (kot je npr. akustična tomografija) bi lahko določili zdrave dele prereзов stropnikov, posledično pa bi z izračuni dosegli natančnejše rezultate (glej prilogo 12.3).

Upogibne togosti smo z odstopanjem (glede na eksperimente), manjšim od približno 10 %, izračunali z:

- analitičnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje ULS za konfiguraciji A2 in B stropnika 8,
- numeričnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje SLS za konfiguracijo A1 stropnika 1, za konfiguraciji B-1 in B-2 stropnika 6, za konfiguraciji A2 in B stropnika 8,
- numeričnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje ULS za konfiguraciji A1 in B stropnika 1, za konfiguraciji B-1 in B-2 stropnika 6, za konfiguraciji A2 in B stropnika 8.

Upogibne togosti smo z odstopanjem, večjim od približno 100 %, izračunali z:

- analitičnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje SLS za konfiguraciji A2 in B stropnika 3, za konfiguracijo A2-2 stropnika 5, za konfiguracijo B stropnika 7,
- analitičnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje ULS za konfiguracijo B stropnika 3.

V povprečju smo najmanjše odstopanje (odstopanje 31 %) upogibne togosti dosegli z numeričnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS, največje odstopanje pa z analitičnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS (odstopanje 77 %).

Nosilnosti smo z odstopanjem, manjšim od približno 10 %, izračunali z:

- analitičnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje SLS za konfiguracijo B stropnika 7 in konfiguracijo A2 stropnika 8,
- analitičnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje ULS za konfiguraciji A1 in B stropnika 7 in konfiguracijo A2 stropnika 8,
- numeričnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje SLS za konfiguracijo B stropnika 7,
- numeričnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje ULS za konfiguracijo A1 stropnika 1 in za konfiguracijo B stropnika 7.

Nosilnosti smo z odstopanjem, večjim od približno 100 %, izračunali z:

- analitičnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje SLS za konfiguracijo A2 stropnika 2, za konfiguracijo B stropnika 3, konfiguracijo C stropnika 4,
- analitičnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje ULS za konfiguracijo A2 stropnika 2, za konfiguracijo B stropnika 3, za konfiguracijo C stropnika 4,
- numeričnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje za konfiguracijo A2 stropnika 2, za konfiguracijo C stropnika 4,
- numeričnim izračunom z moduli pomika za mejno stanje ULS za konfiguracijo A2 stropnika 2, za konfiguracijo C stropnika 4.

V povprečju smo najmanjše odstopanje (odstopanje 38 %) nosilnosti dosegli z analitičnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS, največje odstopanje pa z numeričnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS (odstopanje 48 %).

Za merilo togosti priključne ravnine CLT plošče in lesenega stropnika ( $K_{TPR,CLT}$ ) smo najmanjše odstopanje dosegli z numeričnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS (odstopanje 33 %), največje odstopanje pa z analitičnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS.

Za merilo togosti priključne ravnine steklenega traku in lesenega stropnika ( $K_{TPR,s}$ ) smo najmanjše odstopanje dosegli z numeričnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje ULS (odstopanje 29 %), največje odstopanje pa z analitičnimi izračuni z uporabo modulov pomika za mejno stanje SLS. Pri tem smo upoštevali samo konfiguracije A2 oz. točkovne stike steklo-les. Za konfiguracije A1 oz. za lepljene stike steklo-les smo tako primerjavo izvedli samo za analitična izračuna. Z analitičnima izračunoma za konfiguracijo A1 stropnika 1 smo dosegli zelo veliko odstopanje (več kot 10000 %), za konfiguracijo A1 stropnik 7 pa odstopanje okoli 65 %. Pri tem je treba poudariti, da je togost priključne ravnine prilepljenega steklenega traku tako velika, da odstopanja praktično nimajo vpliva na rezultate. To smo prikazali s spreminjanjem strižnega modula adheziva v podpoglavju 7.3.10 (glej sliko 92 d).

Najboljše ujemanje upogibne togosti, izračunane z numeričnim izračunom z uporabo modula pomikov za mejno stanje ULS, se torej ujema z najboljšim ujemanjem meril togosti priključne ravnine steklenega traku in lesenega stropnika ( $K_{TPR,s}$ ) ter togosti priključne ravnine CLT plošče in lesenega stropnika ( $K_{TPR,CLT}$ ), izračunanih z numeričnim izračunom z uporabo modula pomikov za mejno stanje ULS.

V tabeli 61 smo izvedli tudi primerjavo vpliva steklenega traku na upogibno togost ( $\Delta_{\Delta_{E_{eff}}}$ ) in nosilnost ( $\Delta_{\Delta_{F_{max}}}$ ) oz. primerjavo razlik med konfiguracijami B in A1 oz. med B in A2. Izračunane razlike namreč prikazujejo vpliv steklenega traku na nosilnost in togost sovprežnega nosilca CLT-stropnik-steklo. Primerjava je bila izvedena tako, da rezultati upogibnih preizkusov predstavljajo osnovo, glede na katero smo izračunali odstopanje rezultatov analitičnih in numeričnih izračunov.

Tabela 61: Primerjava vpliva steklenega traku na posamezne konfiguracije

		S 1. B - S 1. A1	S 2. B - S 2. A2	S 3. B - S 3. A2	S 5. B - S 5. A2	S 7. B - S 7. A1	S 8. B - S 8. A2	Povprečje
An. izr. - SLS	$\Delta_{\Delta_{EI_{eff}}}$ [%]	49,06	27,22	37,46	29,24	54,51	44,19	40,28
	$\Delta_{\Delta_{F_{max}}}$ [%]	-2,61	19,24	-10,05	-4,85	-5,78	-14,09	-3,02
An. izr. - ULS	$\Delta_{\Delta_{EI_{eff}}}$ [%]	49,21	22,95	31,41	24,65	54,38	37,02	36,60
	$\Delta_{\Delta_{F_{max}}}$ [%]	11,54	33,24	-2,61	-5,24	5,56	-14,51	4,66
Num. izr. - SLS	$\Delta_{\Delta_{EI_{eff}}}$ [%]	36,36	26,28	36,68	29,52	39,21	38,63	34,45
	$\Delta_{\Delta_{F_{max}}}$ [%]	24,02	20,33	-6,40	-7,95	17,48	0,04	7,92
Num. izr. - ULS	$\Delta_{\Delta_{EI_{eff}}}$ [%]	36,88	21,86	31,15	25,09	39,58	32,97	31,26
	$\Delta_{\Delta_{F_{max}}}$ [%]	39,86	39,96	6,92	4,19	31,39	-2,85	19,91

V tabeli 61 vidimo, da smo z analitičnimi in numeričnimi izračuni očitno precenili vpliv steklenega traku na upogibno togost. Odstopanja so največja za analitični izračun z moduli pomikov za mejno stanje SLS (v povprečju 40 %), najmanjša pa za numerični izračun z moduli pomikov za mejno stanje ULS (v povprečju 31 %). Manjša so odstopanja vpliva steklenega traku na nosilnost. Tako smo najmanjše odstopanje dosegli z analitičnimi izračuni z moduli pomikov za mejno stanje SLS (-3 %), največje odstopanje pa z numeričnimi izračuni z moduli pomikov za mejno stanje ULS (20 %). V smislu ocene vpliva steklenega traku na upogibno togost in nosilnost so rezultati analitičnega in numeričnega izračuna natančnejši kot pa npr. absolutni rezultati upogibne togosti in nosilnosti analitičnega in numeričnega izračuna.

V tabeli 62 smo izvedli še primerjavo analitičnih in numeričnih izračunov. Primerjali smo efektivne upogibne togosti ( $EI_{eff}$ ) in nosilnosti oz. maksimalne sile, dosežene z upogibnimi preizkusi ( $F_{PRE}$ ). Primerjali smo tudi količini  $K_{TPR,S}$  in  $K_{TPR,CLT}$ , ki služita kot merili togosti priključnih ravnin steklenega traku in CLT plošče. Primerjava je bila izvedena tako, da rezultati analitičnega izračuna predstavljajo osnovo, glede na katero smo izračunali odstopanje rezultatov numeričnega izračuna.

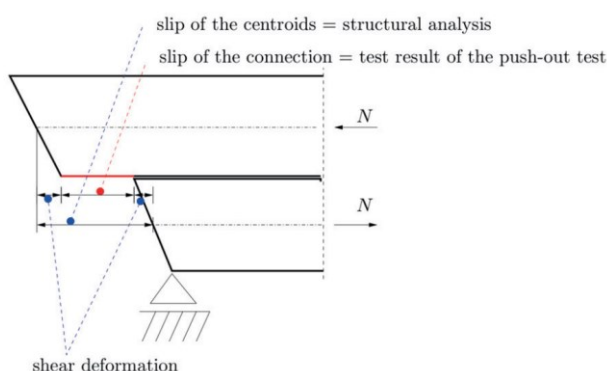
Tabela 62: Odstopanje rezultatov numeričnega izračuna od rezultatov analitičnega izračuna

		S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B	Povprečje
SLS	$\Delta_{(EI)_{eff}}$ [%]	-25,31	-18,36	-17,23	-16,61	-24,32	-23,88	-5,91	-24,20	-24,36	-22,23	-22,03	-13,46	-22,54	-19,43	-19,99
	$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]	-6,41	-2,02	-7,51	-7,85	-10,86	-10,32		-9,02	-9,06	-1,89	-12,14	-7,51	-10,48	-10,34	-8,11
	$\Delta_{K_{TPR,S}}$ [%]			-23,31		-21,20			-23,17					-23,02		-22,68
	$\Delta_{F_{PRE}}$ [%]	25,28	-1,62	-1,29	-2,19	-3,03	-6,81	-0,36	-5,17	-1,97	-0,76	30,63	4,77	15,29	-0,98	3,70
ULS	$\Delta_{(EI)_{eff}}$ [%]	-22,71	-15,75	-14,57	-13,81	-21,71	-21,55	-5,91	-21,69	-21,97	-19,78	-19,20	-10,64	-19,51	-17,06	-17,56
	$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]	-2,26	2,59	-4,05	-4,22	-5,99	-5,40		-5,01	-5,07	3,59	-7,84	-2,78	-5,76	-5,50	-3,67
	$\Delta_{K_{TPR,S}}$ [%]			-19,33		-16,52			-19,01					-18,34		-18,30
	$\Delta_{F_{PRE}}$ [%]	23,84	-1,24	3,57	-1,40	1,00	-8,00	-0,36	-0,85	-9,83	-5,39	29,38	3,94	11,91	-1,53	3,22

V tabeli 62 vidimo, da je odstopanje upogibnih togosti ob uporabi modulov pomika za mejno stanje SLS v povprečju manjše od -20 % (numerično izračunane togosti so manjše za do 20 %), za mejno stanje ULS pa je odstopanje v povprečju -18 %. Majhno je tudi odstopanje

merila togosti priključne ravnine CLT plošče in lesenega stropnika, ki je ob uporabi modulov pomika za mejno stanje SLS v povprečju približno  $-8\%$  (numerično izračunane togosti so manjše za do  $8\%$ ). Še manjše pa je odstopanje ob uporabi modulov pomika za mejno stanje ULS, kjer je odstopanje  $-4\%$ . Še največje je odstopanje merila togosti priključne ravnine privitega steklenega traku, ki je ob uporabi modulov pomika za mejno stanje SLS  $-23\%$ , za mejno stanje ULS pa  $-18\%$ . V povprečju je najmanjše odstopanje nosilnosti ob uporabi modulov pomika za mejno stanje ULS, ki je le  $3\%$ . Tudi odstopanje nosilnosti ob uporabi modulov pomika za mejno stanje SLS ni dosti večje, saj znaša  $4\%$ . Poudariti je treba, da smo glede nosilnosti za konfiguracije A1 (prilepljen stekleni trak) zasledili precej večja odstopanja od povprečnega odstopanja.

Pri vseh stropnikih je opazno, da je analitični izračun rezultiral v večjih upogibnih togostih kot pa numerični izračun. Osnovni razlog za razlike je uporabljena metoda za analitični izračun, tako imenovana gama metoda, ki temelji na predpostavki o sinusno spreminjajoči se zvezni obtežbi. V inženirski praksi in tudi znanstveni literaturi pa je gama metoda zaradi enostavnosti široko uporabljena, saj velja, da daje tudi za drugačne obtežbe zadovoljive rezultate. Naslednji razlog je v tem, da smo z numeričnim izračunom upoštevali tudi strižne deformacije stropnika, ki jih analitični izračun ne upošteva. To ima direkten vpliv na upogibe in tudi indirektnen vpliv, saj strižne deformacije stropnika povečujejo zdrse med težišči stropnika, steklenega traku in CLT plošče. V numeričnem modelu so namreč vzmeti, ki ponazarjajo vezna sredstva, povezane s skrajnimi točkami prereza lesenega stropnika in ne s težiščem, kot to upošteva analitični izračun oz. gama metoda, ki upošteva zdrse kot razlike med vzdolžnimi pomiki težišč sestavnih delov prereza. Dejanski zdrs med težišči prerezov pa je enak vsoti zdrsa veznega sredstva in pa strižnih deformaciji sestavnih elementov med kontaktno površino in težiščem posameznega sestavnega dela (glej sliko 109). V tem smislu je torej numerični izračun bil natančnejši oz. bližje realnosti. Uporabnost rezultatov preizkusov modula pomika veznih sredstev za analitične izračune je podrobneje obravnavana npr. v [140].



Slika 109: Vpliv strižnih deformacij na zdrs med težišči delov sestavljenega prereza (vir slike: [140])

Pri lesenih nosilcih se strižne deformacije pogosto zanemarijo, saj so v primerjavi z upogibnimi deformacijami za običajna razmerja med razponom nosilca in višino nosilca majhne. V [141] so prikazali, da je za gradbeni les, kjer je razmerje med modulom elastičnosti in strižnim modulom enako približno 16, za enakomerno zvezno obtežbo, statični sistem prostoležečega nosilca in razmerje med razponom in višino nosilca enako 10, razmerje med

strižnimi deformacijami in upogibnimi deformacijami (v smislu pomika nosilca na sredini razpona) enako 0,15, za razmerje med razponom in višino nosilca enako 20 pa le še 0,04. Pri naših raziskavah je razmerje med razponom in višino stropnika znašalo približno 23, obtežba pa je bila drugačna od enakomerne zvezne obtežbe. Za prostoležeči nosilec z obtežbo enako obtežbi pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu in za razmerje med modulom elastičnosti in strižnim modulom enako približno 16, smo razvili izraz za izračun razmerja med strižnimi deformacijami in upogibnimi deformacijami ( $u_v/u_u$ , v smislu pomika nosilca na sredini razpona) v odvisnosti od razmerja med razponom ( $L$ ) in višino nosilca ( $h$ ):  $u_v/u_u = 1728/115 \cdot (h/L)^2$ . Z izrazom za razmerje  $h/L = 1/23$  smo za razmerje  $u_v/u_u$  izračunali vrednost 0,03, kar kaže na zelo majhen prispevek strižnih deformacij k pomiku lesenega nosilca na sredini razpona. Vprašanje pa je, kolikšen je vpliv strižnih deformacij na nosilce s sestavljenimi prerezi. V znanstveni literaturi na temo računske analize nosilcev s sestavljenimi prerezi in podajnimi veznimi sredstvi le redko zasledimo, da bi bile poleg strižnih deformacij veznih sredstev upoštevane tudi strižne deformacije sestavnih delov prerezov. V splošnem namreč velja, da so strižne deformacije veznih sredstev večje od strižnih deformacij sestavnih delov oz. da so strižne togosti veznih sredstev (količniki modula pomika veznega sredstva in razmika med veznimi sredstvi) dosti manjše od strižnih togosti delov sestavljenih prerezov. Po principu zaporedno vezanih vzmeti pa je jasno, da je togost skupine zaporedno vezanih vzmeti odvisna predvsem od vzmeti z najnižjo togostjo, torej modula pomika veznega sredstva. Z omenjenim vprašanjem so se natančneje ukvarjali npr. v [142], kjer so na primeru dvoslojnega nosilca (med drugim) pokazali, da je za razmerje med modulom elastičnosti in strižnim modulom enako približno 16 (tipično za les), za razmerje  $L/h$  enako 10 in za količnik modula pomika veznega sredstva in razmika med veznimi sredstvi enak  $0,1 \text{ kN/cm}^2$ , vpliv strižnih deformacij zanemarljiv. V našem primeru je količnik modula pomika veznega sredstva in razmika med veznimi sredstvi bil nekoliko večji (velikostnega razreda  $10 \text{ kN/cm}^2$ ), a je bilo večje tudi razmerje med razponom in višino prereza (približno 17 za upoštevano celotno višino sestavljenega prereza). Prav tako je v našem primeru bil nosilec sestavljen iz različno visokih delov, ki so bili tudi iz različnih materialov. Rezultati omenjene študije z našimi rezultati niso direktno primerljivi, služijo pa kot dodatna možna obrazložitev odstopanja naših rezultatov analitičnega in numeričnega izračuna.

Do določene razlike med numeričnim in analitičnim izračunom pa je prišlo tudi zaradi tega, ker je upogib numeričnega izračuna na sredini razpona vseboval tudi deformacije v podporah v smeri pravokotno na vlakna, pri numeričnem modelu pa smo za modul elastičnosti lesenega stropnika pravokotno na vlakna upoštevali eno tridesetino modula elastičnosti vzporedno z vlakni. V tem pogledu je tako numerični izračun konzervativen, saj smo pri štiritočkovnih upogibnih preizkusih pod lesene stropnike na mestih podpor namestili kovinske ploščice, ki so preprečevale vtis podpor v lesene stropnike.

### 9.5.1 Poenostavljeni način za upoštevanje strižnih deformacij

Uporabljen gama metoda za analitični izračun v osnovi ni namenjena za upoštevanje strižnih deformacij delov sestavljenega prereza. V [140] je predlagano, da se pri izračunu koeficienta togosti priključne ravnine naj upošteva tudi strižna podajnost sestavnih delov prereza. Odločili smo se na poenostavljen način preveriti vpliv upoštevanja strižnih deformacij k pomiku nosilca na sredini razpona. Za primerjavo z numeričnim izračunom smo koeficient togosti priključne ravnine CLT plošče izračunali še z enačbo:

$$\gamma_{CLT} = \left( 1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{CLT} \cdot A_{CLT.neto}}{l^2 \cdot \left( \frac{s_{CLT}}{K_{CLT}} + \frac{h_l}{16 \cdot E_{les} \cdot b_l} + \frac{h_{clt.sp}}{16 \cdot E_{clt} \cdot b_{clt}} \right)^{-1}} \right)^{-1} \quad (74)$$

kjer je  $E_{CLT}$  modul elastičnosti CLT plošče,  $A_{CLT.neto}$  neto prečni prerez CLT plošče (upoštevani so samo vzdolžni sloji CLT plošče),  $s_{CLT}$  razmik med lesnimi vijaki CLT plošče v vzdolžni smeri,  $K_{CLT}$  modul pomika lesnih vijakov CLT plošče (ene vrste v prečni smeri razporejenih lesnih vijakov),  $h_l$  višina stropnika,  $E_{les}$  modul elastičnosti stropnika,  $b_{clt}$  širina CLT plošče,  $h_{clt.sp}$  debelina spodnjega sloja CLT plošče.

Efektivno strižno togost  $((GA)_{eff})$  sovprežnega prereza smo izračunali po [143] z enačbo:

$$(GA)_{eff} = \frac{\left( \frac{h_l}{2} + h_{clt.sp} + h_{clt.sr} + h_{clt.zg} \right)^2}{\frac{h_l}{2 \cdot \frac{E_{les} \cdot b_l}{16}} + \frac{h_{clt.sp}}{\frac{E_{clt} \cdot b_{clt}}{16}} + \frac{b_{clt.zg}}{2 \cdot \frac{E_{clt} \cdot b_{clt}}{16}}} \quad (75)$$

pri čemer smo izpustili strižno podajnost veznega sredstva (lesnih vijakov) ter strižno podajnost srednjega sloja CLT plošče, saj so te že upoštevane pri izračunu efektivne upogibne togosti oz. so upoštevane pri izračunu koeficienta togosti priključne ravnine same CLT plošče.

Za primerjavo z efektivno upogibno togostjo numeričnega izračuna smo definirali še navidezno upogibno togost, ki ob neskončno veliki strižni togosti rezultira v enakem pomiku na sredini razpona kot je seštevek pomika zaradi upogibnih in strižnih deformacij:

$$(EI)_{nav} = \left( \frac{23 \cdot F \cdot l^3}{1296 \cdot \left( \frac{23 \cdot F \cdot l^3}{1296 \cdot EI_{eff}} + \frac{F \cdot l}{6 \cdot \frac{5}{6} (GA)_{eff}} \right)} \right) \quad (76)$$

Dodatno smo za primerjavo za efektivno strižno togost upoštevali še samo leseni stropnik – analogno k jeklenim I-profilom, kjer se za strižno togost upošteva le stojina.

V tabeli 63 so zbrane efektivne upogibne togosti za osnovni analitični izračun, za modificiran analitični izračun z upoštevanjem efektivne strižne togosti, za modificiran analitični izračun z upoštevanjem samo strižne togosti stropnika in efektivne upogibne togosti za numerični

izračun za konfiguracije B (stropnik+CLT plošča) za stropnike 1, 2, 3, 5, 6, 7 in 8. V tabeli 64 pa so izračunana odstopanja učinkovite upogibne togosti numeričnega izračuna od ostalih rezultatov.

Tabela 63: Upogibne togosti različnih izračunov

		S. 1 B	S. 2 B	S. 3 B	S. 5 B	S. 6 B	S. 7 B	S. 8 B
Osnovni analitični izračun	$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3883,89	3999,42	3387,99	4003,63	3784,98	3465,18	3098,52
Modificiran analitični izračun z upoštevanjem samo strižne togosti stropnika	$(EI)_{\text{nav}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3534,79	3666,57	3036,91	3643,39	3421,94	3142,71	2746,11
Modificiran analitični izračun z upoštevanjem učinkovite strižne togosti	$(EI)_{\text{nav}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3544,53	3676,47	3049,06	3651,98	3431,79	3156,13	2759,22
Numerični izračun	$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3170,96	3335,09	2578,84	3028,44	2943,55	2998,68	2496,43

Tabela 64: Odstopanje učinkovite upogibne togosti numeričnega izračuna od različnih analitičnih izračunov

	S. 1 B	S. 2 B	S. 3 B	S. 5 B	S. 6 B	S. 7 B	S. 8 B
Odstopanje učinkovite upogibne togosti numeričnega izračuna od učinkovite upogibne togosti osnovnega analitičnega izračuna [%]	-18,36	-16,61	-23,88	-24,36	-22,23	-13,46	-19,43
Odstopanje učinkovite upogibne togosti numeričnega izračuna od navidezne upogibne togosti modificiranega analitičnega izračuna z upoštevanjem samo strižne togosti stropnika [%]	-10,29	-9,04	-15,08	-16,88	-13,98	-4,58	-9,09
Odstopanje učinkovite upogibne togosti numeričnega izračuna od navidezne upogibne togosti modificiranega analitičnega izračuna z upoštevanjem učinkovite strižne togosti [%]	-10,54	-9,29	-15,42	-17,07	-14,23	-4,99	-9,52

Iz primerjave je razvidno, da upoštevanje strižnih deformacij pri izračunu pomika nosilca na sredini razpona lahko vpliva na boljše ujemanje numeričnega in analitičnega izračuna. Zanimivo je, da smo z upoštevanjem učinkovite strižne togosti in z upoštevanjem samo strižne togosti stropnika dobili zelo podobne rezultate, kar potrjuje, da k strižnim deformacijam prispevajo predvsem sestavni deli prereza z večjimi višinami (v primerjavi z razponom). Poudarjamo pa, da prikazano upoštevanje strižnih deformacij ni nujno bolj blizu realnemu obnašanju naših sestavljenih nosilcev, saj je npr. v [144] prikazano kako lesni vijaki večajo strižno togost CLT plošč. Pri naših nosilcih so relativno gosto nameščeni lesni vijaki segali



čez celotno višino CLT plošč in pa relativno globoko v lesene stropnike, zato je možno, da so preprečevali večje strižne deformacije v delih, ki so jih predirali.

### 9.5.2 Primerjava rezultatov alternativnega analitičnega izračuna z upoštevanjem trdnostnih razredov glede na gostoto stropnikov

Gostota lesa je pomemben indikator kvalitete oz. mehanskih lastnosti lesa in se uporablja tudi za klasifikacijo lesa v trdnostne razrede. Gostota je namreč eden od treh kriterijev za razvrstitev lesa v trdnostne razrede z mehanskimi preizkusi po standardu [124] (poleg gostote sta kriterija še modul elastičnosti in upogibna trdnost). Gostoto stropnikov smo določili na dva načina in sicer na podlagi gostote majhnih lesenih vzorcev ter na podlagi mase celotnih stropnikov. V tabeli 65 podajamo gostote stropnikov, določene na oba načina (vrednosti veljajo za 12-odstotno vlažnost lesa). Glede na minimalno od dveh gostot posameznega stropnika, smo stropnike uvrstili še v trdnostne razrede po standardu [124] (glede na povprečno gostoto).

Tabela 65: Gostote stropnikov (določene z majhnimi vzorci in s tehtanjem stropnikov) ter pripadajoč trdnostni razred po standardu [124] (glede na povprečno gostoto)

		Stropnik							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Celi stropniki	$\rho_{\text{mean}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	463,61	<b>425,88</b>	<b>417,64</b>	412,03	<b>435,60</b>	<b>441,27</b>	<b>427,22</b>	<b>466,33</b>
Mali vzorci	$\rho_{\text{mean}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>411,32</b>	426,39	446,50	<b>404,62</b>	441,04	492,64	464,88	483,44
Trdnostni razred po standardu [124]		C22	C24	C22	C20	C27	C27	C24	C30

Kot alternativo k določitvi mehanskih lastnosti na podlagi nateznih preizkusov majhnih lesenih vzorcev, smo na podlagi povprečnih dimenzij stropnikov in mehanskih lastnosti določenih po standardu [124] ponovili analitični izračun iz podpoglavja 7.2. Rezultati z moduli pomika za mejno stanje uporabnosti so prikazani v tabeli 66, rezultati z moduli pomika za mejno stanje nosilnosti pa v tabeli 67.

Tabela 66: Rezultati alternativnih analitičnih izračunov preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za SLS)

SLS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	5208,10	3082,50	4424,81	3197,83	4538,28	3262,86	1028,66	4835,61	3588,57	3480,63	5058,39	3059,91	4699,25	3417,02
$(EI)_{\text{eff,BS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3082,50		3197,83		3262,86			3588,57			3059,91		3417,02	
$\Delta_{\text{CLT}}$ [mm]	0,70	0,90	0,74	0,96	0,74	0,96		0,75	0,95	0,95	0,71	0,93	0,73	0,95
$\Delta_s$ [mm]	0,00		0,70		0,71			0,68			0,00		0,68	
u [mm]	15,17	26,28	17,72	27,15	17,43	26,88	44,14	17,40	25,62	26,06	15,59	26,97	17,18	26,33
$F_{\text{pre}}$ [kN]	48,85	50,09	48,48	53,69	48,90	54,23	28,07	52,01	56,85	56,10	48,76	51,03	49,91	55,64
$K_s$ [kN/mm]	12,04		12,15		12,04			12,50		12,50	12,15		12,62	
$K_{\text{CLT}}$ [kN/mm]	14,00	14,00	14,03	14,03	14,00	14,00		14,13	14,13	14,13	14,03	14,03	14,16	14,16
$\gamma_s$	1,00		0,56		0,56			0,57			1,00		0,57	
$\gamma_{\text{CLT}}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42

$\sigma_{les,N}$ [MPa]	1,21	5,68	2,38	5,92	2,19	5,48	0,00	2,29	5,45	5,79	1,30	6,05	2,48	6,19
$\sigma_{les,M}$ [MPa]	7,15	12,39	9,04	13,86	8,25	12,72	20,00	9,51	14,01	14,28	7,88	13,64	9,79	15,01
$\sigma_{CLT,zg}$ [MPa]	-6,05	-8,82	-6,66	-9,25	-6,59	-9,19		-6,71	-9,04	-9,11	-6,16	-9,06	-6,58	-9,15
$\tau_{max,les}$ [MPa]	0,85	0,95	0,86	1,02	0,80	0,96	1,02	0,87	1,01	1,05	0,88	1,01	0,93	1,11
$\sigma_{CLT,sp}$ [MPa]	-1,41	-0,78	-1,23	-0,94	-1,26	-0,96		-1,38	-1,20	-1,13	-1,39	-0,81	-1,32	-1,09
$\tau_{max,CLT}$ [MPa]	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14		0,13	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14
$\sigma_{s,zg}$ [MPa]	58,48		39,74		39,79			39,80			58,43		39,83	
$\sigma_{s,sp}$ [MPa]	63,41		45,49		45,45			45,44			63,49		45,41	
$I_{z_{les,sp}}$	0,42	1,00	0,55	1,00	0,54	1,00	1,00	0,50	0,86	0,89	0,42	1,00	0,46	0,84
$I_{z_{les,strig}}$	0,35	0,40	0,34	0,41	0,33	0,40	0,47	0,31	0,36	0,38	0,35	0,40	0,31	0,37
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,27	0,40	0,30	0,42	0,30	0,41		0,30	0,41	0,41	0,28	0,41	0,30	0,41
$I_{z_{CLT,strig}}$	0,19	0,17	0,18	0,18	0,17	0,18		0,18	0,19	0,19	0,19	0,18	0,17	0,19
$I_{z_s}$	0,53		1,00		1,00			1,00			0,53		1,00	
$F_{screw,CLT}$ [kN]	-4,09	-3,84	-3,86	-4,07	-3,85	-4,06		-3,90	-4,10	-4,10	-4,09	-3,95	-3,85	-4,10
$F_{Rk,JFM}$ [kN]	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09		4,10	4,10	4,10	4,09	4,09	4,10	4,10
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,00	0,94	0,95	1,00	0,94	0,99		0,95	1,00	1,00	1,00	0,97	0,94	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F		F	F	F	F	F	F	F
$F_{con,s}$ [kN]			6,82		6,82			6,82					6,82	
$F_{con,s,Rk}$ [kN]			9,49		9,28			9,89					10,08	
$JFM_{s,ST}$			E		E			E					E	
$JFM_{s,S}$			E		E			E					E	
$I_{z_{con,s}}$			0,72		0,74			0,69					0,68	
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]			119,96		119,83			119,82					119,72	
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]			60,74		60,72			60,72					60,71	
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]			74,66		74,65			74,65					74,64	
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]			120,00		120,00			120,00					120,00	
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]			98,37		98,37			98,37					98,38	

Tabela 67: Rezultati alternativnih analitičnih izračunov preizkušenih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za ULS)

ULS	Konfiguracija													
	S 1. A1	S 1. B	S 2. A2	S 2. B	S 3. A2	S 3. B	S 4. C	S 5. A2	S 5. B	S 6. B	S 7. A1	S 7. B	S 8. A2	S 8. B
$(EI)_{eff}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4683,54	2788,20	3816,39	2889,76	3911,34	2949,16	1028,66	4190,47	3243,23	3145,95	4551,34	2765,92	4062,03	3088,84
$(EI)_{eff,BS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2788,20		2889,76		2949,16			3243,23			2765,92		3088,84	
$\Delta_{CLT}$ [mm]	1,06	1,22	1,12	1,29	1,11	1,29		1,13	1,43	1,43	1,07	1,25	1,10	1,43
$\Delta_s$ [mm]	0,00		1,04		1,05			1,01			0,00		1,00	
$u$ [mm]	18,38	28,22	21,97	29,16	21,65	28,85	44,14	21,52	30,79	31,23	18,91	28,98	21,27	31,50
$F_{pre}$ [kN]	53,22	48,66	51,83	52,10	52,36	52,61	28,07	55,75	61,75	60,75	53,20	49,56	53,41	60,17
$K_s$ [kN/mm]	8,03		8,10		8,03			8,34		8,34	8,10		8,41	
$K_{CLT}$ [kN/mm]	9,33	9,33	9,36	9,36	9,33	9,33		9,42	9,42	9,42	9,36	9,36	9,44	9,44

$\gamma_s$	1,00		0,46		0,46			0,47			1,00		0,47	
$\gamma_{CLT}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\sigma_{les,N}$ [MPa]	0,79	5,14	2,44	5,32	2,25	4,93	0,00	2,32	5,45	5,79	0,86	5,45	2,53	6,19
$\sigma_{les,M}$ [MPa]	8,67	13,31	11,21	14,88	10,25	13,66	20,00	11,77	16,84	17,11	9,56	14,65	12,12	17,95
$\sigma_{CLT,zg}$ [MPa]	-6,55	-8,66	-7,32	-9,04	-7,26	-8,98		-7,34	-9,83	-9,90	-6,68	-8,89	-7,21	-9,94
$\tau_{max,les}$ [MPa]	0,96	0,95	0,96	1,02	0,90	0,95	1,02	0,98	1,14	1,18	1,00	1,01	1,04	1,24
$\sigma_{CLT,sp}$ [MPa]	-0,93	-0,02	-0,60	-0,12	-0,63	-0,15		-0,75	-0,41	-0,34	-0,89	-0,02	-0,70	-0,30
$\tau_{max,CLT}$ [MPa]	0,14	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12		0,13	0,14	0,14	0,14	0,12	0,13	0,14
$\sigma_{s,zg}$ [MPa]	66,16		38,29		38,40			38,44			66,27		38,53	
$\sigma_{s,sp}$ [MPa]	72,13		45,42		45,43			45,43			72,40		45,43	
$I_{z_{les,sp}}$	0,46	1,00	0,64	1,00	0,64	1,00	1,00	0,58	0,96	1,00	0,46	1,00	0,54	0,94
$I_{z_{les,strig}}$	0,40	0,40	0,38	0,41	0,37	0,40	0,47	0,35	0,41	0,42	0,40	0,40	0,35	0,41
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,30	0,39	0,33	0,40	0,33	0,40		0,33	0,44	0,44	0,30	0,40	0,32	0,45
$I_{z_{CLT,strig}}$	0,19	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17		0,17	0,19	0,19	0,19	0,19	0,16	0,17
$I_{z_s}$	0,60		1,00		1,00			1,00			0,60		1,00	
$F_{screw,CLT}$ [kN]	-4,09	-3,47	-3,77	-3,66	-3,77	-3,65		-3,81	-4,10	-4,10	-4,09	-3,56	-3,76	-4,10
$F_{Rk,JFM}$ [kN]	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09		4,10	4,10	4,10	4,09	4,09	4,10	4,10
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,00	0,85	0,92	0,90	0,92	0,89		0,93	1,00	1,00	1,00	0,87	0,92	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F		F	F	F	F	F	F	F
$F_{con,s}$ [kN]			6,70		6,71			6,71					6,72	
$F_{con,s,Rk}$ [kN]			9,49		9,28			9,89					10,08	
$JFM_{s,ST}$			E		E			E					E	
$JFM_{s,S}$			E		E			E					E	
$I_{z_{con,s}}$			0,71		0,72			0,68					0,67	
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]			120,00		120,00			120,00					120,00	
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]			59,95		60,01			60,04					60,09	
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]			73,54		73,62			73,66					73,73	
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]			117,96		118,11			118,18					118,30	
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]			96,68		96,81			96,87					96,97	

V tabeli 68 so rezultati primerjave alternativnega analitičnega izračuna (z upoštevanjem trdnostnih razredov glede na gostoto stropnikov) z eksperimentalnimi rezultati. Izračunali smo odstopanje rezultatov izračuna od eksperimentalnih rezultatov.

Tabela 68: Odstopanje rezultatov alternativnega analitičnega izračuna od eksperimentalnih rezultatov

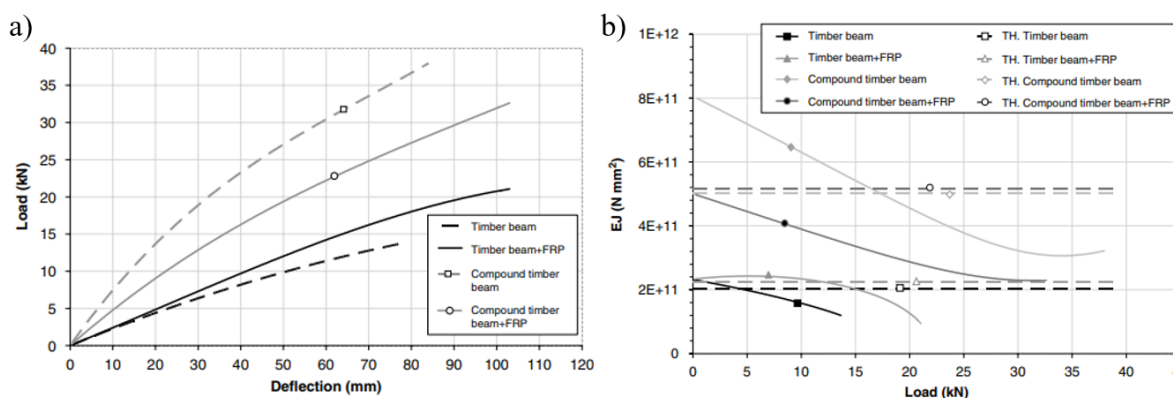
Konf.	Alter. analitični izr. SLS				Alter. analitični izr. ULS			
	$\Delta_{(EI)_{eff}}$ [%]	$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]	$\Delta_{K_{TPR,S}}$ [%]	$\Delta_{F_{PRE}}$ [%]	$\Delta_{(EI)_{eff}}$ [%]	$\Delta_{K_{TPR,CLT}}$ [%]	$\Delta_{K_{TPR,S}}$ [%]	$\Delta_{F_{PRE}}$ [%]
S 1. A1	33,34	-5,13	9823,82	-40,88	19,91	-31,39	10711,00	-35,60
S 1. B	14,57	-6,06		-35,67	3,63	-32,69		-37,51
S 2. A2	72,10	99,66	-59,45	354,76	48,43	41,67	-70,55	386,19
S 2. B	59,88	38,55		-2,91	44,48	-0,31		-5,78
S 3. A2	98,54	163,66	167,53	52,19	71,11	87,03	93,98	62,96
S 3. B	134,19	229,96		99,09	111,68	137,34		93,14
S 4. C	45,84			83,49	45,84			83,49
S 5. A2-1	79,44	65,21	215,96	-40,15	55,50	18,06	129,48	-35,84
S 5. A2-2	98,47	165,80	114,26	47,25	71,99	89,94	55,61	57,83
S 5. B	70,39	154,43		-38,12	53,99	84,37		-32,78
S 6. B-1	20,74	3,49		-23,83	9,13	-25,24		-17,52
S 6. B-2	27,01	-12,12		-36,82	14,80	-36,51		-31,58
S 7. A1	87,50	148,45	-67,85	-18,33	68,71	80,28	-64,92	-10,89
S 7. B	79,89	195,00		-10,99	62,61	111,67		-13,56
S 8. A2	36,15	11,29	113,25	9,57	17,69	-20,83	54,49	17,25
S 8. B	34,77	-0,34		49,88	21,83	-28,15		62,08

Primerjava rezultatov primerjave alternativnega analitičnega izračuna z eksperimentalnimi rezultati (tabela 68) z rezultati primerjave osnovnega analitičnega izračuna (z mehanskimi lastnostmi stropnikov določenih z nateznimi preizkusi) z eksperimentalnimi rezultati (tabela 60), razkriva, da smo z alternativnim analitičnim izračunom dosegli boljše ujemanje učinkovitih upogibnih togosti, z izjemo stropnika 8, kjer smo za obe konfiguraciji z osnovnim analitičnim izračunom dosegli boljše ujemanje učinkovitih upogibnih togosti. Tudi pri količinah  $K_{TPR,S}$  in  $K_{TPR,CLT}$ , ki služita kot merili togosti priključnih ravnin steklenega traku in CLT plošče, smo z alternativnim izračunom večinoma dosegli boljše ujemanje z eksperimentalnimi rezultati. Drugače pa je pri oceni nosilnosti, kjer smo pri večini stropnikov z osnovnim analitičnim izračunom dosegli boljše ujemanje. Boljše ujemanje učinkovite upogibne togosti alternativnega izračuna z eksperimentalnimi rezultati se sklada z dejstvom, da je gostota indikator globalnih lastnosti stropnika oz. modula elastičnosti stropnika. Boljše ujemanje nosilnosti osnovnega izračuna z eksperimentalnimi rezultati pa se sklada z dejstvom, da so natezni preizkusi majhnih vzorcev indikator lokalnih lastnosti stropnika, katerega porušitev se pravzaprav zgodi na nekem določenem mestu. Dodaten dokaz za slednjo trditev je tudi relativno dobro ujemanje (v primerjavi z ujemanjem učinkovite upogibne togosti) eksperimentalnih napetosti, izračunanih na podlagi specifičnih deformacij in na podlagi modula elastičnosti določenega z nateznimi preizkusi majhnih vzorcev, z napetostmi osnovnega analitičnega izračuna za stropnik 5 (podpoglavje 9.4.3).

Tudi rezultati alternativnega izračuna sicer precej odstopajo od eksperimentalnih rezultatov (tabela 68), tako da tudi tukaj velja zaključek glede potrebe po natančnejših, neporušnih metodah za določitev mehanskih lastnosti stropnikov in določitev zdravih delov prerezov stropnikov.

## 9.6 Primerjava z drugimi raziskavami

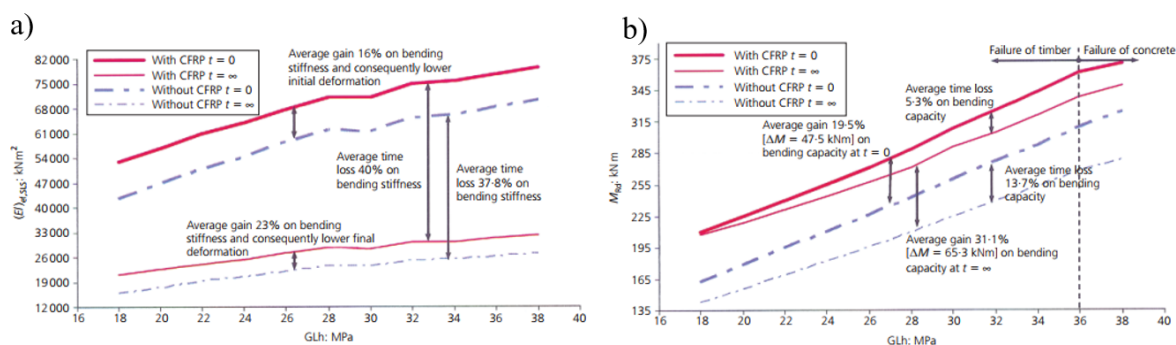
V trenutni znanstveni literaturi nismo uspeli najti primerov, kjer bi lesene stropnike oz. nosilce poskušali ojačati s CLT ploščami in z nateznimi ojačitvami (razni polimerni ali jekleni elementi), kar bi predstavljalo alternativo našemu postopku (uporabi steklenih elementov za dodatno ojačitev stropnikov že ojačanih s CLT ploščo). V [145] pa so lesene stropnike ojačali z lesenimi deskami na zgornji strani prereza (v tlačni coni upogibnega prereza), na spodnji strani prereza pa s polimernimi trakovi s karbonskimi vlakni (CFRP trakovi). Računsko so s pomočjo gama metode izračunali, da CFRP trakovi dodatno povečajo upogibno togost že z desko ojačanega stropnika (približno za 5 % – na podlagi odčitka iz diagrama), eksperimentalno pa jim tega ni uspelo dokazati (slika 110 a). Prav tako z eksperimenti niso dokazali, da CFRP trak poveča nosilnost že z desko ojačanega nosilca. Nosilci so bili testirani na razponu 3,8 m, za katerega mejni pomik  $L/300$  znaša 12,7 mm. Na intervalu do omenjenega pomika so izračunali za 21 % večjo upogibno togost, kot so jo določili eksperimentalno (slika 110 b). Eksperimentalno so pri različnih intervalih sile določili različne upogibne togosti. Tako je končna upogibna togost bila enaka 44 % začetne upogibne togosti. Preizkuse so izvedli na novih nosilcih, ki so imeli visoko vsebnost vlage, ki se je med nosilci celo razlikovala (med 16 % in 22 %), čemur so tudi pripisali na videz slabšo učinkovitost CFRP trakov. Potrebno je poudariti, da so ti rezultati bili izračunani za drugačne vhodne podatke od naših, npr. prerez stropnika je bil visok 14,5 cm in širok 11,5 cm, lesena deska je bila debela 5 cm in široka 25 cm, debelina CFRP traku je bila 0,165 mm, modul elastičnosti CFRP traku 230 GPa, natezna trdnost CFRP traku 3550 MPa.



Slika 110: Rezultati upogibnih preizkusov iz študije [145]: a) povprečne krivulje sile v odvisnosti od upogiba, b) upogibne togosti na različnih intervalih sile

Drugi relativno primerljiv postopek, ki ga lahko najdemo v obstoječi znanstveni literaturi, pa je ojačitev lesenih stropnikov z armirano-betonskimi ploščami in polimernimi elementi. V [6] so izvedli parametrično študijo vpliva različnih parametrov na nosilnost lesenih lepljenih nosilcev ojačanih z armirano-betonskimi ploščami in CFRP trakovi (polimerni trakovi s karbonskimi vlakni). Računske rezultate so validirali s tritočkovnimi upogibnimi preizkusi v [7]. Za parameter »trdnostni razred lesenega nosilca« so za ojačitev s CFRP trakom izračunali povprečno 16 % povečanje upogibne togosti (slika 111 a) in 19,5 % povečanje nosilnosti (slika 111 b) lesenega nosilca predhodno že ojačanega z armirano-betonsko ploščo. Z našimi eksperimenti smo s prilepljenim steklom upogibno togost v povprečju povečali za 51,9 % in

nosilnost za 5,1 %, s privitim steklom pa smo upogibno togost v povprečju povečali za 34,48 % medtem ko nosilnosti v povprečju nismo uspeli povečati (v povprečju je privit stekleni trak počil pri za 13,4 % nižji sili od nosilnosti stropnika ojačenega le s CLT ploščo). S parametričnim izračunom pa smo vpliv prilepljenega stekla na upogibno togost v odvisnosti od trdnostnega razreda stropnika (glej podpoglavja 12.2.8, 12.2.9, 12.2.16 v prilogi) ocenili na vrednosti od 45,1 % do 88,5 % (največji vpliv je pri najnižjem trdnostnem razredu), v povprečju torej 62,3 %. Vpliv prilepljenega stekla na nosilnost v odvisnosti od trdnostnega razreda stropnika smo ocenili na vrednosti od 26,9 % do 71,2 % (največji vpliv je pri najnižjem trdnostnem razredu), v povprečju 35,2 %. Vpliv privitega stekla na upogibno togost v odvisnosti od trdnostnega razreda stropnika pa smo ocenili na vrednosti od 29,9 % do 56,8 % (največji vpliv je pri najnižjem trdnostnem razredu), v povprečju torej 40,3 %. Vpliv privitega stekla na nosilnost v odvisnosti od trdnostnega razreda stropnika smo ocenili na vrednosti od 16,2 % do 27,8 % (največji vpliv je pri najnižjem trdnostnem razredu), v povprečju 19,0 %. Potrebno je še enkrat poudariti, da so ti rezultati bili izračunani za drugačne vhodne podatke od naših, v [6] je bil npr. upoštevan prerez stropnika z višino 45 cm in širino 20 cm, debelina CFRP traku 1,4 mm, modul elastičnosti CFRP traku 300 GPa, natezna trdnost CFRP traku 1300 MPa, razpon dolžine 8 m.



Slika 111: Rezultati parametrične študije [6]: a) vpliv trdnostnega razreda lesenih nosilcev na upogibno togost, b) vpliv trdnostnega razreda lesenih nosilcev na nosilnost

V [139] so izvedli štiritočkovne upogibne preizkuse lesenih lepljenih nosilcev ojačanih z armirano-betonskimi ploščami in polimernimi trakovi s steklenimi vlakni (GFRP trakovi). V povprečju so z GFRP trakovi povečali upogibno togost z armirano-betonsko ploščo že ojačenega lepljenega lesenega nosilca za 15,2 %. Nosilnost pa so v povprečju povečali za 8,3 %. Poudarjamo, da so bili robni pogoji drugačni od naših, npr. širina armirano-betonske plošče je bila le 35 cm, višina stropnika 31,2 cm, širina stropnika približno 8,0 cm, debelina GFRP traku 16 mm, modul elastičnosti GFRP traku 60 GPa in natezna trdnost GFRP traku 956 MPa, razpon 5 m. Skratka, prikazane primerjave ne pomenijo, da je steklo bolj ali manj učinkovito, ampak pomeni, da je glede na podobne velikostne razrede vpliva ojačitve, steklo lahko alternativa CFRP ali GFRP trakovom v primerih, ko želimo ohraniti vidljivost spodnje strani lesenih stropnikov.

V [139] so izvedli tudi primerjavo eksperimentalne in analitično izračunane upogibne togosti. Za analitični izračun so, tako kot mi, uporabili gama metodo. Primerjava upogibne togosti lesenega nosilca ojačenega z armirano-betonsko ploščo in GFRP trakom je tako pokazala, da

je analitično izračunana upogibna togost za od 47 % do 57 % večja od eksperimentalno določene upogibne togosti. Nosilnosti niso direktno primerjali, primerjali pa so napetosti v prerezu pri enaki obremenitvi. Odstopanje analitično izračunanih napetosti od eksperimentalnih je bilo tudi 25,4 %.

V naši študiji je bilo odstopanje analitično izračunanih upogibnih togosti (z moduli pomikov za SLS) od eksperimentalnih za konfiguracije A1 (CLT+stropnik+prilepljeno steklo) do 98,5 %, za konfiguracije A2 (CLT+stropnik+privito steklo) pa do 112,4 % (z izjemo stropnika 2). Odstopanje analitično izračunanih nosilnosti (z moduli pomikov za ULS) od eksperimentalnih za konfiguracije A1 (CLT+stropnik+prilepljeno steklo) je bilo do 24,67 %, za konfiguracije A2 (CLT+stropnik+privito steklo) pa do 74 % (z izjemo stropnika 2). Odstopanja naših analitičnih izračunov so tako nekoliko večja kot pa odstopanja v [145] in [139], a so vendarle podobnih velikostnih razredov, pri čemer je potrebno poudariti, da so v [145] in [139] uporabili nove lesene nosilce, katerih lastnosti so lažje natančneje določljive, kot so lastnosti stropnikov uporabljenih v naši študiji, ki so bili namenjeni za uničenje.

## 10 ZAKLJUČKI

### 10.1 Diskusija

V doktorski disertaciji je predstavljeno raziskovalno delo, katerega cilj je bil razvoj novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov. Na podlagi eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih rezultatov smo ocenili v uvodu podane hipoteze.

Potrdili smo, da prilepljen stekleni panel oz. trak v natezni coni stropa v sklopu sistemske rešitve rekonstrukcije starih lesenih stropov, ki kot prvi korak že zajema uporabo CLT plošče v tlačni coni, prispeva k povečanju nosilnosti stropa v natezni coni in k večji upogibni togosti stropa. Z eksperimenti smo pokazali, da je prispevek k upogibni togosti večji kot k nosilnosti. S strižnimi preizkusi lepljenih stikov steklo-les pri različnih okoljskih pogojih smo dokazali, da do kohezivne porušitve izbranega epoksidnega adheziva ali do izgube adhezije na steklu pride le redko, pa še takrat je nosilnost večja, kot bi jo ocenili s strižno trdnostjo lesa. Nosilnost lepljenega stika z izbranim adhezivom je torej dokazana s kontrolo strižne trdnosti v lesenem elementu.

Dokazali smo, da lahko stekleni trak namesto z lepljenjem na stropnik pritrdimo tudi z vijachenjem oz. z lesnimi vijaki. V ta namen smo razvili nov točkovni stik, ki omogoča prenos sil z lesnih vijakov na stekleni trak z zadostno nizkimi koncentracijami napetosti v steklenem traku, da lahko privit stekleni trak prispeva k večji upogibni togosti. Nov točkovni stik predstavlja popolno noviteto, ki trenutno v znanstveni literaturi nima primerjave. Z upogibnimi preizkusi smo pokazali, da tudi privit stekleni trak lahko prispeva k nosilnosti, vendar je prispevek odvisen od togosti samega stropnika (oz. modula elastičnosti). Nižji kot je modul elastičnosti stropnika, večji je prispevek steklenega traku k nosilnosti. Za točkovni stik steklo-les predstavlja štiritočkovni upogibni preizkus ekstremne pogoje obremenitve, saj na točki delovanja sile hkrati nastopi maksimalna sila v veznem sredstvu (oz. maksimalna strižna sila) in maksimalni upogibni moment. Pričakovati je, da bi se pri v praksi običajni obremenitvi, enakomerni zvezni obtežbi, pri kateri mesti maksimalnih strižnih sil in maksimalnega upogibnega momenta ne sovpadata, točkovni stik obnesel še boljše oz. bi lahko dosegli večje obremenitve.

Tako za prilepljen kot za privit stekleni trak velja, da so bili uporabljeni leseni stropniki za upogibne preizkuse zelo poškodovani. Izvedeni preizkusi torej predstavljajo tako imenovani najslabši možni scenarij (ang. »worst case scenario«), ki bi lahko nastopil v praksi.

O duktilnosti pri obravnavanem konstrukcijskem elementu, sovprežnem nosilcu CLT-stropnik-steklo, ne moremo govoriti. Krivulje sil v odvisnosti od upogibov so bile zelo blizu premicam. Tako prilepljen kot privit stekleni trak se je porušil pri relativno velikih upogibih oz. upogibih, večjih od kriterijev mejnega stanja uporabnosti SLS (ena dvestopetdesetina razpona). Pred porušitvijo je bilo tudi pri vseh stropnikih mogoče slišati pokanje. Uporabnika prostora bi torej na morebitno porušitev opozarjali veliki pomiki in značilen pokajoči zvok.



Na osnovi že poznane gama metode iz Evrokoda 5 smo razvili analitični izračun za nosilnost in togost novega točkovnega stika, s katerim lahko opišemo dejansko obnašanje novega točkovnega stika. Tudi numerično izračunana togost novega točkovnega stika je odražala dejansko obnašanje novega stika. Z numeričnim izračunom smo dosegli zadovoljivo oceno faktorjev koncentracij napetosti v steklenem traku pod različnimi obremenitvami, kar se je pokazalo pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu, za katerega smo z analitičnim izračunom in faktorji koncentracij napetosti lahko ocenili obremenitev, pri kateri se bo stekleni trak zlomil.

Pri oceni primernosti analitičnega in numeričnega izračuna upogibne togosti in nosilnosti sovprežnih nosilcev CLT-stropnik-steklo ponovno ne moremo mimo dejstva, da so bili preizkušeni stropniki iz dvorca na Zgornji Polskavi močno poškodovani, kar je bil tudi razlog, da so bili vzeti iz funkcije oz. odstranjeni. Kot je bilo prikazano pri primerjavi rezultatov izračunov in rezultatov štiritočkovnega upogibnega preizkusa, so v nekaterih primerih obstajala zelo velika rezultatska odstopanja (večja kot 100 %), kar pripisujemo omenjeni poškodovanosti stropnikov. V prid tej trditvi govori tudi dejstvo, da so bili rezultati analitičnega in numeričnega izračuna podobni v vseh primerih oz. pri vseh stropnikih. Tudi z analitičnim izračunom z uporabo vseh trdnostnih razredov iglavcev se je pokazalo, da so upogibne togosti, določene na podlagi upogibnih preizkusov, manjše kot je izračunana upogibna togost z najnižjim trdnostnim razredom iglavcev (C14). Na stropnikih so bile lokalne poškodbe, ki jih vizualno nismo mogli odkriti. To bi sicer bilo možno ob uporabi neporušnih metod, kot je npr. akustična tomografija. Na UM FGPA je bil tudi zaradi teh ugotovitev izveden nakup naprave za akustično tomografijo. Žal smo pred nakupom že zaključili s preizkusi in stropniki so že bili odstranjeni, tako da tomografije nismo uspeli izvesti. Trdimo, da bi lahko z natančnimi podatki o zdravih delih prerezov stropnikov rezultati analitičnih in numeričnih izračunov kazali boljše ujemanje z rezultati upogibnih preizkusov.

S parametrično analizo na podlagi analitičnega izračuna smo ocenili nosilnost obravnavanih konfiguracij stropnikov glede na mejno stanje nosilnosti (ULS) in uporabnosti (SLS). Za obremenitev smo upoštevali enakomerno zvezno obtežbo, ki je za prakso običajna. Izkazalo se je, da vpliv nobenega parametra na nosilnost ne izstopa. Tudi prispevek tipa oz. debeline CLT plošče, ki je sicer največji, omejuje nosilnost lesenih vijakov. Pri porušnih mehanizmih se kot kritični element najpogosteje izkažejo lesni vijaki, vendar ostali kriteriji po nosilnosti zelo malo odstopajo. Pri kontroli nosilnosti pa se je izkazalo, da upogibno-tlačna in strižna nosilnost CLT plošče nikoli nista merodajni oz. da je CLT plošča najmanj kritični del obravnavnega kompozitnega prereza.

Novi postopek je v osnovi namenjen za celovito renoviranje starih lesenih stropov, kjer želimo v največji možni meri ohraniti izgled lesene konstrukcije. V primeru stropov to pomeni ohraniti vidljivost spodnje strani lesenih stropov, saj so zgornje strani že zakrite s pohodnimi površinami. Postopek je alternativa ojačitvi lesenih stropov z debelejšimi armirano-betonskimi ploščami in debelejšimi CLT ploščami, saj omogoča uporabo tankih CLT plošč, ki skupaj s steklenimi trakovi zagotavljajo zahtevano togost in nosilnost, vendar rezultira v minimalnih spremembah višin prostorov, kar je ugodno za ohranitev stavbnega pohištva v originalnih

dimenzijah. Del postopka oz. ojačitev lesenih stropov samo s steklenimi trakovi, pa bi lahko bil uporaben za primere, ko ni omogočen ali zaželen dostop do zgornje strani lesenih stropov, a vendarle želimo povečati upogibno togost stropov. Pri lesenih stropih je namreč pogosteje merodajno mejno stanje uporabnosti, ki zajema povese in vibracije. V disertaciji smo za lesene stropnike upoštevali les iglavcev oz. navadne smreke za geometrijo pa dimenzije značilne za srednjeevropski prostor, za katerega so izsledki posledično najbolj uporabni oz. za katerega lahko pričakujemo približno enake procentualne vplive novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov. Nikakor pa to ne pomeni, da postopek ni primeren za druge vrste lesa ali za druga geografska področja oz. pomeni, da je za oceno primernosti postopka potrebno upoštevati drugačne oz. dodatne parametre.

## 10.2 Smernice za nadaljnje raziskovanje

Za razvoj novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov je bilo treba obravnavati več različnih raziskovalnih področij in možnosti za ojačitev takih stropov s steklenimi elementi. Tudi nadaljnje raziskovanje bi posledično lahko šlo v več smeri.

### Lepljeni stik steklo-les

Uporabljeni lepljeni stik-steklo les, pri katerem smo na celotno spodnjo stran stropnikov nanegli adheziv, v smislu ohranjanja vidljivosti ni ustrezen. Izbrani epoksidni adheziv namreč ni transparenten. Pokazalo pa se je, da je tak stik najbolj učinkovit tako v smislu nosilnosti kot tudi varnosti, saj pri zlomu steklo obstane na lesenem stropniku in ne pade na tla oz. ne ogroža uporabnikov prostora pod stropom. Nadaljnje raziskovalno delo bi tako lahko obsegalo uporabo tudi drugih adhezivov, ki so vsaj delno transparentni, ali stikov, pri katerih adheziv ni nanesen na celotno stično ploskev steklenega in lesenega elementa. Pri parametrični analizi vpliva strižnega modula se je namreč izkazalo, da ta za praktične vrednosti strižnih modulov različnih adhezivov nima vpliva na togost stika. Pomembni sta predvsem njegova trdnost in sposobnost adhezije na steklo in les.

### Točkovni stik

Smiselno bi bilo napraviti parametrično analizo vpliva geometrije (premer aluminijastega vstavka, premera luknje v steklu, širine steklenega elementa, položaj luknje v steklu) na razporeditev napetosti v steklenem elementu pod različnimi obremenitvami. Kot dodatni parameter bi bilo smiselno upoštevati tudi različne adhezive. V doktorski disertaciji smo se omejili samo na en adheziv (togi epoksidni adheziv). V samem stiku je zaradi dveh korakov lepljenja aluminijastega vstavka na stekleni trak mogoče uporabiti dva različna adheziva in tako morebiti vplivati na še ugodnejšo razporeditev napetosti. Na podlagi rezultatov parametrične študije bi lahko razvili enostavna pravila oz. izraze za izračun nosilnosti stekla pri tovrstnih stikih brez obsežnih numeričnih izračunov. Faktorji koncentracij napetosti v doktorski disertaciji veljajo namreč samo za stekleni trak s popolnoma enako geometrijo in adhezivom.

## Optimizacija

Pri parametrični analizi se je pokazalo, da lahko s spreminjanjem različnih parametrov zelo vplivamo na nosilnost posamezne konfiguracije ojačanega stropnika. Za posamezni parameter smo sicer izračunali maksimalno nosilnost (in pripadajočo vrednost izbranega parametra). Le z optimizacijskimi metodami, pri katerih bi za namensko funkcijo definirali nosilnost, bi lahko določili optimalno kombinacijo vrednosti različnih parametrov.

## Ojačitev lesenih konstrukcij s steklom

V doktorski disertaciji smo obravnavali samo ojačitve lesenih stropov s steklom tako, da stekleni trak deluje kot natezna pasnica upogibnega prereza. Takšna postavitvev je za stekleni element najbolj neugodna, saj je praktično celoten prerez pod nateznimi napetostmi. A glede na to, da smo tudi s to neugodno postavitvijo občutno vplivali na upogibno togost in tudi nosilnost, se postavlja vprašanje, kakšen bi bil vpliv steklenega traku, ki bi ga pričvrstili na stranske površine lesenih stropnikov. Stekleni trak bi potem deloval kot dodatna stojina. Nadalje bi lahko možnost ojačitev s steklenimi elementi preizkusili oz. raziskali tudi na drugih lesenih konstrukcijskih elementih. Glede na veliko tlačno trdnost stekla bi bilo smiselno raziskati tudi ojačitev lesenih stebrov in lesenih upogibnih elementov, pri katerih lahko stekleni element za razliko od lesenih stropov, namestimo v tlačno cono upogibnega prereza. Problematičen bi lahko bil uklon steklenih elementov, ki so razmeroma vitki. Lokalnemu uklonu steklenih elementov bi se lahko izognili z lepljenjem po celotni površini in gosto nameščenimi veznimi sredstvi. Poleg tega pa lahko steklene elemente med seboj zlepimo in dosežemo relativno velike debeline novo nastalih laminatov, ki pa so še vedno relativno transparentni.

Leseni stropi so konstrukcije oz. konstrukcijski elementi v notranjosti stavb, za katere so značilna zelo majhna temperaturna nihanja. Na lesene stropne sončna svetloba le redko seva direktno. V doktorski disertaciji se tako z vplivom temperaturnih sprememb nismo ukvarjali. Ob morebitnih raziskavah uporabe stekla za ojačitve raznih drugih lesenih elementov pa je treba vključiti tudi vpliv temperaturnih sprememb, ki lahko zaradi različnih temperaturnih raztezkov povzročijo v steklenih elementih velike skoke napetosti.

## Vibracije lesenih stropov

Pri upogibnih preizkusih se je pokazalo, da novi postopek za ojačitev starih lesenih stropov poveča predvsem upogibno togost. Smiselno bi torej bilo novi postopek raziskati še v smislu vpliva na vibracije lesenih stropov, ki so odvisne tudi od upogibne togosti stropnikov, ki sestavljajo leseni strop.

## Neporušne metode za oceno ohranjenosti in mehanskih karakteristik lesenih konstrukcij

Kot predzadnjo smer za raziskovanje podajamo uporabo neporušnih metod za oceno ohranjenosti in mehanskih karakteristik lesenih konstrukcij. Pokazalo se je namreč, da vizualno ne moremo določiti zdravih delov prerezov lesenih stropnikov, vsaj kadar so površine stropnikov močno poškodovane (npr. zaradi delovanja lesnega črva). Za natančno

dimenzioniranje je potrebno poznati tudi mehanske lastnosti stropnikov, tudi tukaj pa bi lahko uporabili rezultate akustične tomografije, vendar je potrebno raziskati in določiti praktično uporabne zveze med hitrostmi zvoka v različnih anatomskih smereh lesa, ter preveriti ujemanje s pomočjo hitrosti zvoka in gostote lesa izračunanih modulov elastičnosti z moduli elastičnosti določenih na podlagi porušnih preiskav. S porušnimi preiskavami, npr. upogibnimi preizkusi, določamo globalne lastnosti, s poznavanjem hitrosti zvoka v določenem delu lesenega elementa pa lahko sklepamo le o velikosti lokalnega modula elastičnosti. Potrebno je razviti še način za oceno globalnih mehanskih lastnosti na podlagi lokalno (s pomočjo akustične tomografije) določenih mehanskih lastnosti oz. drugih metod za določitev hitrosti zvoka v delih lesenih konstrukcij.

### **Analiza življenjskega cikla (LCA analiza)**

Zadnja smer za nadaljnje raziskovanje je analiza življenjskega cikla različnih stropnih konfiguracij (LCA analiza). Vprašanje je namreč, kakšen okoljski vpliv ima ohranitev lesenih stropov in njihova ojačitev v primerjavi z izgradnjo novih stropnih konstrukcij, npr. armirano-betonskih plošč.

## 11 LITERATURA

1. Branco JM, Descamps T, Tsakanika E (2018) Repair and Strengthening of Traditional Timber Roof and Floor Structures. In: Strengthening and Retrofitting of Existing Structures. Springer, pp 113–138
2. Gubana A (2015) State-of-the-Art Report on high reversible timber to timber strengthening interventions on wooden floors. *Construction and Building Materials* 97:25–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.035>
3. Rabold A, Bacher S, Hessinger J (2008) Holzbalkendecken in der Altbausanierung Abschlussbericht
4. Skinner J, Martins C, Bregula J, et al (2014) Concrete upgrade to improve the vibration response of timber floors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings* 167:559–568
5. Roensmaens B, Van Parys L, Carpentier O, Descamps T (2018) Refurbishment of existing timber floors with screwed CLT panels. *International Journal of Architectural Heritage* 12:622–631. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442522>
6. Tajnik M, Premrov M, Dobrila P, Bedenik B (2011) Parametric study of composite T-beam. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings* 164:345–353
7. Premrov M, Dobrila P (2012) Experimental analysis of timber–concrete composite beam strengthened with carbon fibres. *Construction and Building Materials* 37:499–506
8. Lowe E (2010) All Transparent Conservation Scheme for the Menokin Ruins. In: *Challenging Glass Conference Proceedings*. pp 109–117
9. Oikonomopoulou F, Bristogianni T, Barou L, et al (2017) Restorative glass: reversible, discreet restoration using structural glass components. *SPOOL* 4:39–43
10. Bristogianni T, Oikonomopoulou F, Barou L, et al (2018) Re3 Glass: A new generation of Recycable, Reducible and Reusable cast glass components for structural and architectural applications. *SPOOL* 5:
11. Konrad R, Bogusław Z, Arkadiusz K, et al (2019) The Strength of Wooden (Timber)-Glass Beams Combined with the Polyurethane Adhesive-DIC and Finite Element Analysis. In: Aguilar R, Torrealva D, Moreira S, et al (eds) *Structural analysis of historical constructions: an interdisciplinary approach*. Springer, Cham, Switzerland, pp 323–331
12. Biolzi L, Cattaneo S, Rosati G (2010) Progressive damage and fracture of laminated glass beams. *Construction and Building Materials* 24:577–584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.035>
13. Ouwerkerk E (2011) Glass columns: A fundamental study to slender glass columns assembled from rectangular monolithic flat glass plates under compression as a basis to design a structural glass column for a pavilion

14. Belis J, Callewaert D, Delincé D, Van Impe R (2009) Experimental failure investigation of a hybrid glass/steel beam. *Engineering Failure Analysis* 16:1163–1173. <https://doi.org/10/fs57zd>
15. Kozłowski M, Hulimka J (2014) Load-bearing capacity of hybrid timber-glass beams. *ACEE Journal* 2:61–70
16. Bedon C, Louter C (2019) Structural glass beams with embedded GFRP, CFRP or steel reinforcement rods: Comparative experimental, analytical and numerical investigations. *Journal of Building Engineering* 22:227–241. <https://doi.org/10/gfzscv>
17. Feldmann M, Kasper R, Abeln B, et al (2014) Guidance for European Structural design of glass components-support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Report EUR 26439, Joint Research Centre. Institute for the Protection and Security of the Citizen
18. Feldmann M, Kaspar R, Abeln B, et al (2014) Guidance for European structural design of glass components. Publications Office of the European Union, Luxembourg
19. Feldmann M, Di Biase P (2018) The CEN-TS “Structural Glass – Design and Construction Rules” as pre-standard for the Eurocode. *ce/papers* 2:71–80. <https://doi.org/10.1002/cepa.911>
20. Deutsches Institut für Normung (2015) DIN 18008: Glass in building - Design and constructions rules Part 1: Terms and general bases Part 2: Linearly supported glazing Part 2: Linearly supported glazing, correction of DIN 18008-2 Part 3: Point fixed glazing Part 4: Additional requirements for anti-drop device Part 5: Additional requirements for accessible glazing Part 6: Additional requirements for glazing
21. European Committee for Standardization (2017) prEN 16612; Glass in building. Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation
22. Wellershoff F, Sedlacek G (2005) Stabilization of Building Envelopes with the use of the Glazing. In: *Proceedings of glass processing days*. pp 281–283
23. Ber B, Sustersic I, Dujic B, et al (2014) Seismic shaking table testing of glass-timber buildings. In: *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*. pp 1–7
24. Ber B, Premrov M, Štrukelj A (2016) Finite element analysis of timber-glass walls. *Glass Structures & Engineering* 1:19–37
25. Blyberg L, Serrano E (2011) Timber/Glass adhesively bonded I-beams. *Glass Performance Days*, Tampere, Finland
26. Kreher K, Natterer J, Natterer J (2004) Timber-glass-composite girders for a hotel in Switzerland. *Structural Engineering International* 14:149–151
27. Kozłowski M, Dorn M, Serrano E (2015) Experimental testing of load-bearing timber-glass composite shear walls and beams. *Wood Material Science & Engineering* 10:276–286

28. Žegarac Leskovar V, Premrov M (2013) Energy-efficient timber-glass houses. Springer
29. Blyberg L, Lang M, Lundstedt K, et al (2014) Glass, timber and adhesive joints–innovative load bearing building components. *Construction and Building Materials* 55:470–478. <https://doi.org/10/f24nvg>
30. Rodacki K, Tekieli M, Furtak K (2019) Contactless optical measurement methods for glass beams and composite timber-glass I-beams. *Measurement* 134:662–672. <https://doi.org/10/gf33nn>
31. Hamm J (2000) Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas
32. Premrov M, Zlatinek M, Štrukelj A (2014) Experimental analysis of load-bearing timber-glass I-beam. *Construction of Unique Buildings and Structures* 4:11–20
33. Furtak K, Rodacki K (2018) Experimental investigations of load-bearing capacity of composite timber-glass I-beams. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18:956–964. <https://doi.org/10/ggbmxv>
34. Kozłowski M, Kadela M, Hulimka J (2016) Numerical investigation of structural behaviour of timber-glass composite beams. *Procedia engineering* 161:990–1000
35. Kozłowski M, Serrano E, Enquist B (2014) Experimental investigation on timber-glass composite I-beams. In: *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*, 6-7 February 2014, Lausanne, Switzerland,. Taylor & Francis Group
36. Ber B, Premrov M, Štrukelj A, Kuhta M (2014) Experimental investigations of timber–glass composite wall panels. *Construction and Building Materials* 66:235–246
37. Cruz P, Pequeno J (2008) Timber-Glass Composite Structural Panels: Experimental Studies & Architectural Applications. In: *Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Delft. pp 449–458
38. Winter W, Hochhauser W, Fadai A (2012) Timber-glass composite trusses and plates. *World Conference of Timber Engineering, Conference Proceedings*. Auckland
39. Fadai A, Winter W (2014) Application of timber-glass composite (TGC) structures for building construction. In: *Proceedings of Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*. pp 235–242
40. ICOMOS, International wood committee (2017) Principles for the conservation of wooden built heritage
41. Hamm J (2001) Development of timber-glass prefabricated structural elements. In: *IABSE Symposium Report. International Association for Bridge and Structural Engineering*, Lahti, pp 41–46
42. Hochhauser W, Winter W, Kreher K (2011) Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: State of the Art, Forschungsbericht, Studentische Arbeiten. Technische Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau 1:

43. Pequeno JM, Cruz PJS (2009) Timber-Glass Composite Structural Panels: Tectonics, Sustainability & Integrated Energetic System Solutions. In: Proceedings of the 11th International Conference on Architectural and Automotive Glass (Glass Performance Days), Tampere, Finland. pp 123–126
44. Dietsch P, Brandner R (2015) Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements—A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials* 97:78–89
45. Bejtka I, Blaß HJ (2002) Joints with Inclined Screws. CIB-W18. paper 35-7-4, Kyoto, Japan
46. Kevarinmäki A (2002) Joints with Inclined Screws. CIB-W18. paper 35-7-3, Kyoto, Japan
47. Tomasi R, Crosatti A, Piazza M (2010) Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. *Construction and building materials* 24:1560–1571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.007>
48. Ringhofer A, Brandner R, Schickhofer G (2014) Entwicklung einer optimierten Schraubengeometrie für hochbeanspruchte Stahl-Holz-Verbindungen. *Bautechnik* 91:31–37
49. Krenn H, Schickhofer G (2009) Joints with inclined screws and steel plates as outer members. In: Proceedings of meeting forty-two of the International Council For Research And Innovation In Building And Construction, CIB, Working Commission W18—Timber Structures. International Council For Research And Innovation In Building And Construction, Switzerland
50. Dispersyn J, Belis J (2016) Numerical research on stiff adhesive point-fixings between glass and metal under uniaxial load. *Glass Structures & Engineering* 1:115–130
51. Belis J, D'haese D, Sonck D (2016) Investigation of a friction-grip connection in laminated glass. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings* 169:432–441
52. Bedon C, Santarsiero M (2018) Laminated glass beams with thick embedded connections—Numerical analysis of full-scale specimens during cracking regime. *Composite Structures* 195:308–324
53. Baitinger M, Feldmann M (2010) Ein Bemessungskonzept für SL-belastete Anschlüsse im konstruktiven Glasbau. *Stahlbau* 79:60–69
54. Baitinger M (2010) Zur Bemessung von SL-belasteten Anschlüssen im konstruktiven Glasbau
55. Katsivalis I, Thomsen OT, Feih S, Achintha M (2018) Strength evaluation and failure prediction of bolted and adhesive glass/steel joints. *Glass Structures & Engineering* 3:183–196
56. European Committee for Standardization. (2004) EN 1995-1-1; Eurocode 5: Design of



- timber structures. General. Common rules and rules for buildings
57. Pech A, Kolbitsch A, Zach F (2007) Decken. Springer Science & Business
  58. Arnuga I (2010) Mehanska odpornost lesno-betonskega sovprežnega stropu [Mechanical resistance of a timber-concrete composite deck]. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo
  59. Mihelič B, Košir F, Ifko S, Adamič T (2002) Zgodnja industrijska arhitektura na Slovenskem. Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Ljubljana
  60. Valentinčič J (1956) Zamenjava lesa v gradbeništvu. Naša skupnost
  61. Sedej I (1967) Arhitekturna in stilna problematika kmečkih dvorcev na loškem ozemlju v 18. stoletju. Loški razgledi
  62. Cevc T (1990) H genezi kmečke hiše na Slovenskem. Traditiones
  63. Železnik A (2013) Grad Rajhenburg in njegova prenova. Kronika: casopis za slovensko krajevno zgodovino 61:
  64. Lavrič A (2007) Ljubljanska škofija v vizitacijah 17. stoletja: Vizitacije kot vir za umetnostno zgodovino. Založba ZRC, ZRC SAZU, Ljubljana
  65. (1894) Lesen strop iz l. 1638. v Kranji. Kmetijske in rokodelske novice
  66. Hazler V (2004) Les v tradicionalnem stavbarstvu na Slovenskem. Les
  67. Novak V (1990) Prostorska in kulturno genetska povezanost slovenske ljudske kulture z Evropo. Traditiones
  68. Scheer C, Peter M (2009) Holz Brandschutz Handbuch. John Wiley & Sons
  69. Kolbitsch A (1989) Altbaukonstruktionen: Charakteristika Rechenwerte Sanierungsansätze. Springer, Vienna
  70. Lißner K, Rug W (2013) Holzbausanierung: Grundlagen und Praxis der sicheren Ausführung. Springer-Verlag, Berlin
  71. Furundžić B (1965) Zbirka tehničkih propisa u građevinarstvu [Collection of technical regulations in civil engineering]. Građevinska Knjiga, Beograd
  72. (1986) ISO 2103:1986 – Loads due to use and occupancy in residential and public buildings
  73. European Committee for Standardization. (2002) EN 1991-1-1; Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings
  74. Branco JM, Kekeliak M, Lourenço PB (2014) In-plane stiffness of traditional timber floors strengthened with CLT. In: Materials and Joints in Timber Structures. Springer, pp 725–737

75. Faggiano B, Marzo A, Formisano A, Mazzolani FM (2009) Innovative steel connections for the retrofit of timber floors in ancient buildings: a numerical investigation. *Computers & Structures* 87:1–13. <https://doi.org/10/d5xs3b>
76. Brezar V (2011) Pragmatično graditeljstvo ali sindrom 4 metrov/Pragmatic construction or a 4-meter syndrome. *Arhitektura, Raziskave* 2011:85
77. DuPont de Nemours (2008) SentryGlas® Plus elastic properties (SGP5000), Doc. Ref. SGP030718\_1. DuPont de Nemours., Michigan, USA
78. (2012) ISO 527-1:2012 – Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles
79. Banea MD, da Silva LFM, Campilho RD (2015) The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive. *The Journal of Adhesion* 91:331–346. <https://doi.org/10/gf35xp>
80. Campilho R, da Silva LF (2015) Joint Design in Natural Fiber Composites. In: *Natural Fiber Composites*. CRC Press, pp 291–330
81. Cruz P, Pequeno J (2008) Structural timber-glass adhesive bonding. *Proceedings of Challenging Glass*, pg 205–214
82. Blyberg L, Serrano E, Enquist B, Sterley M (2012) Adhesive joints for structural timber/glass applications: Experimental testing and evaluation methods. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 35:76–87
83. Vallee T, Grunwald C, Milchert L, Fecht S (2016) Design and dimensioning of a complex timber-glass hybrid structure: the IFAM pedestrian bridge. *Glass Structures & Engineering* 1:3–18
84. European Committee for Standardization (2009) EN 1465:2009 Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies
85. Buyuktasgin HAA, Yatagan MS, Soyoz GE, et al (2019) Experimental investigation of the durability of load bearing timber-glass composites under the effects of accelerated aging. *Journal of Green Building* 14:45–59. <https://doi.org/10/gf4jcf>
86. Nicklisch F (2016) Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen [Application of high-modulus adhesives in load-bearing timber-glass-composite elements]. PhD Thesis, Technische Universität Dresden
87. (2001) ISO 11003-2:2001 – Adhesives – Determination of shear behaviour of structural adhesives – Part 2: Tensile test method using thick adherends
88. Serrano E (2004) A numerical study of the shear-strength-predicting capabilities of test specimens for wood–adhesive bonds. *International journal of adhesion and adhesives* 24:23–35
89. European Committee for Standardization. (2010) EN 384:2010, Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density

90. Lavers GM (1983) The strength properties of timber. Building Research Establishment. HMSO: London
91. Dahl KB, Malo KA (2009) Linear shear properties of spruce softwood. *Wood science and technology* 43:499–525
92. Silvestru VA, Drass M, Enghardt O, Schneider J (2018) Performance of a structural acrylic adhesive for linear glass-metal connections under shear and tensile loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 85:322–336
93. MAPEI (2016) Adesilex PG1 Adesilex PG2 Two-component thixotropic epoxy adhesives for structural bonding 364/380-3-2016 (GB)
94. Cerny M (2017) Testing of Composites for Strengthening of RC Structures. In: *Proceedings of the End of Action Conference (COST Action TU1207 Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction)*. COST, Budapest, Hungary
95. International A (2012) ASTM D5379/D5379M-12-Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. ASTM International West Conshohocken
96. European Committee for Standardization (2002) 13183-1:2002, Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method
97. Charles RJ (1958) Static fatigue of glass. II. *Journal of Applied Physics* 29:1554–1560
98. Kretschmann D (2010) Mechanical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 5 Centennial ed General technical report FPL; GTR-190* Madison, WI: US Dept of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p 51-546 190:5.1-5.46
99. Juvandes LFP, Costeira Silva P, Moreira J, et al (2008) Thermal limits for external bonding repair method on structural surfaces exposed to the environment. In: *Advanced composite materials in bridges and structures : 5th international conference : Winnipeg, Manitoba, Canada : September 22-24, 2008*. Canadian Society for Civil Engineering = Société canadienne de génie civil ; Printed by ISIS Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba, Canada
100. DeIasi R, Whiteside JB (1978) Effect of moisture on epoxy resins and composites. In: *Advanced Composite Materials—Environmental Effects*. ASTM International
101. Kelley FN, Bueche F (1961) Viscosity and glass temperature relations for polymer-diluent systems. *Journal of Polymer Science* 50:549–556. <https://doi.org/10/fsspx4>
102. Ghiassi B, Marcari G, Oliveira DV, Lourenço PB (2013) Water degrading effects on the bond behavior in FRP-strengthened masonry. *Composites Part B: Engineering* 54:11–19. <https://doi.org/10/f48zbs>
103. Frigione M, Lettieri M, Mecchi AM (2006) Environmental effects on epoxy adhesives employed for restoration of historical buildings. *Journal of materials in civil engineering* 18:715–722. <https://doi.org/10/bzwdc9>

104. Kajorncheappunngam S, Gupta RK, GangaRao HV (2002) Effect of aging environment on degradation of glass-reinforced epoxy. *Journal of composites for construction* 6:61–69. <https://doi.org/10/bn4rmw>
105. Na J, Mu W, Qin G, et al (2018) Effect of temperature on the mechanical properties of adhesively bonded basalt FRP-aluminum alloy joints in the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 85:138–148. <https://doi.org/10/gf4hj2>
106. Adams RD, Coppendale J, Mallick V, Al-Hamdan H (1992) The effect of temperature on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 12:185–190. <https://doi.org/10/cdkqzn>
107. Desch HE, Dinwoodie JM (1996) *Timber structure, properties, conversion and use..* ed. 7
108. Gerhards CC (1982) Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber* 14:4–36
109. Johansson C-J (2003) Grading of timber with respect to mechanical properties. S Thelandersson, H Larsen (Eds), *Timber Engineering*, Wiley (2003) 23–43
110. Petric B, Scukanec V (1973) Volume percentage of tissues in wood of conifers grown in Yugoslavia. *IAWA Bull Int Assoc Wood Anat*
111. Brändström J (2001) Micro-and ultrastructural aspects of Norway spruce tracheids: a review. *Iawa Journal* 22:333–353. <https://doi.org/10/gf23wn>
112. Gustafsson PJ (2003) Fracture Perpendicular to Grain - Structural Applications. S Thelandersson, H Larsen (Eds), *Timber Engineering*, Wiley (2003) 103–130
113. Mays GC, Hutchinson AR (2005) *Adhesives in civil engineering*. Cambridge University Press
114. (2019) Autodesk® Inventor® Nastran Version 2020.0.0.138. Autodesk®
115. Buckley DH (1973) Friction behavior of glass and metals in contact with glass in various environments. NASA
116. Piculin S, Nicklisch F, Brank B (2016) Numerical and experimental tests on adhesive bond behaviour in timber-glass walls. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 70:204–217
117. ETA-Danmark A/S (2017) European Technical Assessment ETA-12/0114 of 12/10/2017:SPAX self-tapping screws: Screws for use in timber constructions: Regulation (EU) No 305/2011, on the basis of: European Assessment document (EAD) no. EAD 130118-00-0603 “Screws for timber constructions”
118. EN 335 (2013) Durability of wood and wood-based products—Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. European Committee for Standardization Brussels
119. Van den Bulcke J, De Windt I, Defoirdt N, Van Acker J (2011) Non-destructive

- evaluation of wood decay. In: 42nd Annual meeting of the International Research Group on Wood Protection (IRG/WP). International Research Group on Wood Protection
120. Gligić B, Buđevac D, Marković Z, Mišković Z (2016) Aluminium alloy girders strengthened by steel elements. *Građevinar* 68:787–799
  121. Standardization) C (European C for (1991) EN 26891: Timber structures—joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics. CEN Brussels
  122. Antolinc D, Zarnic R, Cepon F, et al (2012) Laminated glass panels in combination with timber frame as a shear wall in earthquake resistant building design. In: *Challenging Glass 3—Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. pp 623–632
  123. Franke S, Franke B, Magnière N, et al (2016) Assessment of the residual load-carrying capacity of large span members in wood : Research report. Bern University of Applied Sciences
  124. European Committee for Standardization (2016) EN 338:2016; Structural timber. Strength classes
  125. Ross RJ (2010) Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p 1 v 190:
  126. Gehri E (1997) Timber as a natural composite: explanation of some peculiarities in the mechanical behaviour—case: assessment of the modulus of elasticity of timber parallel to grain. CIB-W18A/30-6-3
  127. Steffen A, Johansson C-J, Wormuth E-W (1997) Study of the relationship between flatwise and edgewise modull of elasticity of sawn timber as a means to improve mechanical strength grading technology. *Holz als Roh-und Werkstoff* 55:245–253. <https://doi.org/10/cwzq3h>
  128. Larsen HJ (2003) Design of structures based on glulam, LVL and other solid timber products. In: *Timber Engineering*. Wiley & Sons
  129. Dinwoodie JM (2000) *Timber: its nature and behaviour*. CRC Press
  130. D’Ambrisi A, Focacci F, Luciano R (2014) Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates. *Composite Structures* 108:720–728. <https://doi.org/10/ggmr3t>
  131. Franke S, Franke B, Harte AM (2015) Failure modes and reinforcement techniques for timber beams—State of the art. *Construction and Building Materials* 97:2–13. <https://doi.org/10/gfb3kg>
  132. de la Rosa García P, Escamilla AC, García MNG (2013) Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. *Composites Part B: Engineering* 55:528–536. <https://doi.org/10/f5cmvr>

133. Rescalvo FJ, Valverde-Palacios I, Suarez E, Gallego A (2017) Experimental Comparison of Different Carbon Fiber Composites in Reinforcement Layouts for Wooden Beams of Historical Buildings. *Materials* 10:1113
134. Song X, Jiang Y, Gu X, Wu Y (2017) Load-carrying capacity of lengthwise cracked wood beams retrofitted by self-tapping screws. *Journal of Structural Engineering* 143:04017021. <https://doi.org/10/f959q7>
135. Wallner-Novak M, Koppelhuber J, Pock K (2013) Brettsperrholz Bemessung–Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode (“Cross Laminated Timber Design–Construction and Design according to Eurocode”). proHolz Austria, Vienna
136. European Committee for Standardization. (2005) EN 1990; Eurocode 0: Basis of structural design
137. Ber Boštjan (2015) Vpliv zasteklitve na horizontalno nosilnost in togost lesenih okvirnih stenskih elementov: doktorska disertacija. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
138. Hochhauser W (2011) Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben. Technische Universität Wien
139. Miotto JL, Dias AA (2015) Structural efficiency of full-scale timber–concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer. *Composite Structures* 128:145–154
140. Schänzlin J, Mönch S (2017) Push-out vs. Beam: Can the Results of Experimental Stiffness of TCC-Connectors be Transferred? In: *Proceedings of the Conference of COST Action FP1402*. Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Austria
141. Thelandersson S (2017) Deformations. In: *Timber Engineering - Principles for Design*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, Germany
142. Schnabl S, Saje M, Turk G, Planinc I (2007) Analytical solution of two-layer beam taking into account interlayer slip and shear deformation. *Journal of structural engineering* 133:886–894
143. Ross LA, Gagnon S, Keith E (2013) Structural design of cross-laminated timber elements. *CLT Handbook: cross-laminated timber US edition*, FPInnovations, Pointe-Claire 5–6
144. Dietsch P, Mestek P, Winter S (2012) Analytischer Ansatz zur Erfassung von Tragfähigkeitssteigerungen infolge von Schubverstärkungen in Bauteilen aus Brettschichtholz und Brettsperrholz. *Bautechnik* 89:402–414
145. Valluzzi MR, Garbin E, Modena C (2007) Flexural strengthening of timber beams by traditional and innovative techniques. *Journal of Building Appraisal* 3:125–143
146. Bucur V (2006) *Acoustics of wood*. Springer Science & Business Media

## 12 PRILOGE

### 12.1 Rezultati analitičnega izračuna preizkušenih konfiguracij lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi iz standarda [124]

Tabela 69: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A1 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za SLS)

SLS	Trdnostni razred stropnika					
	Konf. A1	C14	C16	C18	C20	C22
$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4752,46	4876,25	4995,97	5056,90	5120,48	5238,36
$(EI)_{\text{eff.BS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2521,33	2720,89	2906,67	2996,49	3085,75	3253,59
$\Delta_{\text{CLT}}$ [mm]	0,67	0,69	0,70	0,71	0,71	0,72
$\Delta_s$ [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$u$ [mm]	14,89	15,13	15,32	15,40	15,46	15,60
$F_{\text{pre}}$ [kN]	43,75	45,61	47,32	48,16	48,95	50,51
$K_s$ [N/mm]	11384,62	11596,95	11705,31	11815,11	12038,93	12152,92
$K_{\text{CLT}}$ [N/mm]	13803,40	13870,44	13903,62	13936,58	14001,88	14034,23
$\gamma_s$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{\text{CLT}}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\sigma_{\text{les.N}}$ [MPa]	0,94	1,03	1,11	1,15	1,19	1,25
$\sigma_{\text{les.M}}$ [MPa]	4,83	5,61	6,39	6,79	7,17	7,96
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	-5,78	-5,92	-6,03	-6,08	-6,13	-6,21
$\tau_{\text{max.les}}$ [MPa]	0,68	0,73	0,77	0,79	0,81	0,86
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$ [MPa]	-1,23	-1,29	-1,34	-1,37	-1,40	-1,44
$\tau_{\text{max.CLT}}$ [MPa]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$\sigma_{s.zg}$ [MPa]	57,67	58,07	58,32	58,42	58,46	58,55
$\sigma_{s.sp}$ [MPa]	62,50	62,98	63,29	63,42	63,48	63,62
$I_{\text{les.sp}}$	0,46	0,45	0,46	0,44	0,42	0,42
$I_{\text{les.strig}}$	0,40	0,40	0,39	0,36	0,34	0,34
$I_{\text{CLT.zg}}$	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28
$I_{\text{CLT.strig}}$	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19
$I_{z_s}$	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
$F_{\text{screw.CLT}}$ [kN]	-4,07	-4,08	-4,08	-4,08	-4,09	-4,09
$F_{\text{Rk.JFM}}$ [kN]	4,07	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09
$I_{\text{screw.CLT}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\text{JFM}_{\text{CLT}}$	F	F	F	F	F	F

Tabela 70: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A1 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za ULS)

ULS	Trdnostni razred stropnika					
	Konf. A1	C14	C16	C18	C20	C22
$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4259,75	4375,77	4488,41	4546,11	4606,70	4718,76
$(EI)_{\text{eff.BS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2290,50	2465,77	2629,74	2709,57	2789,46	2939,65
$\Delta_{\text{CLT}}$ [mm]	1,01	1,03	1,05	1,06	1,07	1,08
$\Delta_s$ [mm]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$u$ [mm]	17,98	18,29	18,56	18,67	18,75	18,94
$F_{\text{pre}}$ [kN]	47,35	49,49	51,49	52,47	53,40	55,26
$K_s$ [N/mm]	7589,75	7731,30	7803,54	7876,74	8025,95	8101,95
$K_{\text{CLT}}$ [N/mm]	9202,27	9246,96	9269,08	9291,06	9334,59	9356,16

$\gamma_s$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{CLT}$	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33
$\sigma_{les.N}$ [MPa]	0,61	0,67	0,73	0,75	0,78	0,82
$\sigma_{les.M}$ [MPa]	5,84	6,79	7,74	8,22	8,69	9,66
$\sigma_{CLT.zg}$ [MPa]	-6,29	-6,43	-6,54	-6,60	-6,64	-6,73
$\tau_{max.les}$ [MPa]	0,76	0,82	0,87	0,90	0,93	0,98
$\sigma_{CLT.sp}$ [MPa]	-0,79	-0,83	-0,87	-0,88	-0,90	-0,93
$\tau_{max.CLt}$ [MPa]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$\sigma_{s.zg}$ [MPa]	64,45	65,23	65,84	66,10	66,28	66,69
$\sigma_{s.sp}$ [MPa]	70,29	71,17	71,86	72,16	72,37	72,84
$I_{les.sp}$	0,49	0,49	0,50	0,47	0,46	0,46
$I_{les.strig}$	0,45	0,46	0,44	0,41	0,39	0,39
$I_{z_{CLT.zg}}$	0,28	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30
$I_{z_{CLT.strig}}$	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19
$I_z$	0,59	0,59	0,60	0,60	0,60	0,61
$F_{screw.CLt}$ [kN]	-4,07	-4,08	-4,08	-4,08	-4,09	-4,09
$F_{Rk.JFM}$ [kN]	4,07	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09
$I_{z_{screw.CLt}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLt}$	F	F	F	F	F	F

Tabela 71: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A2 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za SLS)

SLS	Trdnostni razred stropnika					
	C14	C16	C18	C20	C22	C24
Konf. A2	C14	C16	C18	C20	C22	C24
$(EI)_{eff}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3881,69	4035,65	4178,30	4251,76	4331,31	4467,50
$(EI)_{eff.BS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2521,33	2720,89	2906,67	2996,49	3085,75	3253,59
$\Delta_{CLT}$ [mm]	0,68	0,70	0,72	0,73	0,73	0,75
$\Delta_s$ [mm]	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70
$u$ [mm]	17,33	17,47	17,65	17,69	17,66	17,79
$F_{pre}$ [kN]	41,58	43,58	45,59	46,51	47,30	49,15
$K_s$ [N/mm]	11384,62	11596,95	11705,31	11815,11	12038,93	12152,92
$K_{CLT}$ [N/mm]	13803,40	13870,44	13903,62	13936,58	14001,88	14034,23
$\gamma_s$	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,56
$\gamma_{CLT}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\sigma_{les.N}$ [MPa]	1,88	2,02	2,15	2,20	2,24	2,35
$\sigma_{les.M}$ [MPa]	5,62	6,48	7,37	7,79	8,19	9,08
$\sigma_{CLT.zg}$ [MPa]	-6,21	-6,36	-6,50	-6,56	-6,59	-6,70
$\tau_{max.les}$ [MPa]	0,66	0,71	0,75	0,78	0,80	0,85
$\sigma_{CLT.sp}$ [MPa]	-0,91	-1,01	-1,10	-1,14	-1,18	-1,26
$\tau_{max.CLt}$ [MPa]	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\sigma_{s.zg}$ [MPa]	39,81	39,78	39,75	39,74	39,75	39,73
$\sigma_{s.sp}$ [MPa]	45,43	45,45	45,48	45,49	45,48	45,50
$I_{les.sp}$	0,64	0,61	0,60	0,57	0,55	0,55
$I_{les.strig}$	0,39	0,39	0,38	0,35	0,33	0,34
$I_{z_{CLT.zg}}$	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30
$I_{z_{CLT.strig}}$	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18
$I_z$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$F_{screw.CLt}$ [kN]	-3,71	-3,75	-3,80	-3,83	-3,84	-3,88
$F_{Rk.JFM}$ [kN]	4,07	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09
$I_{z_{screw.CLt}}$	0,91	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95
$JFM_{CLt}$	F	F	F	F	F	F



$F_{con.s}$ [kN]	6,82	6,82	6,82	6,82	6,82	6,82
$F_{con.s,Rk}$ [kN]	8,25	8,67	8,87	9,08	9,28	9,49
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E
$I_{z,con.s}$	0,83	0,79	0,77	0,75	0,74	0,72
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	119,78	119,85	119,93	119,95	119,94	120,00
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	60,72	60,73	60,74	60,74	60,74	60,74
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	74,64	74,65	74,66	74,66	74,66	74,66
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	98,37	98,37	98,37	98,37	98,37	98,37

Tabela 72: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A2 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za ULS)

ULS	Trdnostni razred stropnika					
	C14	C16	C18	C20	C22	C24
Konf. A2						
$(E)_{eff}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3306,67	3450,39	3584,06	3653,16	3728,23	3856,96
$(E)_{eff,BS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2290,50	2465,77	2629,74	2709,57	2789,46	2939,65
$\Delta_{CLT}$ [mm]	1,04	1,07	1,09	1,10	1,10	1,12
$\Delta_s$ [mm]	1,11	1,09	1,08	1,07	1,05	1,04
$u$ [mm]	21,68	21,80	21,98	22,01	21,93	22,04
$F_{pre}$ [kN]	44,33	46,51	48,70	49,70	50,54	52,57
$K_s$ [N/mm]	7589,75	7731,30	7803,54	7876,74	8025,95	8101,95
$K_{CLT}$ [N/mm]	9202,27	9246,96	9269,08	9291,06	9334,59	9356,16
$\gamma_s$	0,45	0,45	0,45	0,46	0,46	0,46
$\gamma_{CLT}$	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33
$\sigma_{les,N}$ [MPa]	1,99	2,11	2,23	2,28	2,31	2,40
$\sigma_{les,M}$ [MPa]	7,04	8,09	9,17	9,69	10,17	11,24
$\sigma_{CLT,zg}$ [MPa]	-6,95	-7,08	-7,21	-7,25	-7,27	-7,36
$\tau_{max,les}$ [MPa]	0,73	0,78	0,84	0,87	0,89	0,95
$\sigma_{CLT,sp}$ [MPa]	-0,31	-0,41	-0,48	-0,52	-0,56	-0,62
$\tau_{max,CLT}$ [MPa]	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13
$\sigma_{s,zg}$ [MPa]	38,39	38,35	38,28	38,28	38,30	38,26
$\sigma_{s,sp}$ [MPa]	45,43	45,42	45,42	45,42	45,42	45,42
$I_{z,les,sp}$	0,75	0,72	0,71	0,68	0,64	0,64
$I_{z,les,drig}$	0,43	0,43	0,42	0,39	0,37	0,38
$I_{z,CLT,zg}$	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33
$I_{z,CLT,drig}$	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
$I_{z_s}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$F_{screw,CLT}$ [kN]	-3,64	-3,68	-3,73	-3,74	-3,75	-3,79
$F_{Rk,JFM}$ [kN]	4,07	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09
$I_{z,screw,CLT}$	0,89	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F
$F_{con.s}$ [kN]	6,71	6,70	6,70	6,70	6,70	6,69
$F_{con.s,Rk}$ [kN]	8,25	8,67	8,87	9,08	9,28	9,49
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E
$I_{z,con.s}$	0,81	0,77	0,76	0,74	0,72	0,71
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	60,01	59,99	59,95	59,95	59,96	59,94
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	73,61	73,58	73,53	73,53	73,55	73,52
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	118,10	118,04	117,95	117,94	117,98	117,92
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	96,80	96,75	96,68	96,67	96,70	96,65

Tabela 73: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij B lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za SLS)

SLS	Trdnostni razred stropnika					
Konf. B	C14	C16	C18	C20	C22	C24
$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2521,33	2720,89	2906,67	2996,49	3085,75	3253,59
$\Delta_{\text{CLT}}$ [mm]	0,67	0,76	0,81	0,87	0,93	0,96
u [mm]	21,94	23,74	24,27	25,71	27,06	26,98
$F_{\text{pre}}$ [kN]	34,21	39,93	43,61	47,65	51,64	54,28
$K_{\text{CLT}}$ [kN/mm]	13803,40	13870,44	13903,62	13936,58	14001,88	14034,23
$\gamma_{\text{CLT}}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\sigma_{\text{les.N}}$ [MPa]	3,93	4,50	4,81	5,20	5,58	5,75
$\sigma_{\text{les.M}}$ [MPa]	7,12	8,81	10,13	11,33	12,55	13,76
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	-6,85	-7,63	-7,99	-8,56	-9,11	-9,24
$\tau_{\text{max.les}}$ [MPa]	0,60	0,70	0,78	0,86	0,94	1,00
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$ [MPa]	-0,14	-0,36	-0,56	-0,69	-0,82	-0,98
$\tau_{\text{max.CLt}}$ [MPa]	0,09	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14
$I_{\text{les.sp}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
$I_{\text{les.strig}}$	0,35	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40
$I_{\text{CLT.zg}}$	0,31	0,34	0,36	0,38	0,41	0,42
$I_{\text{CLT.strig}}$	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
$F_{\text{screw.CLt}}$ [kN]	-2,79	-3,20	-3,42	-3,70	-3,97	-4,09
$F_{\text{Rk.JFM}}$ [kN]	4,07	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09
$I_{\text{screw.CLt}}$	0,69	0,79	0,84	0,91	0,97	1,00
$\text{JFM}_{\text{CLT}}$	F	F	F	F	F	F

Tabela 74: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij B lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za ULS)

ULS	Trdnostni razred stropnika					
Konf. B	C14	C16	C18	C20	C22	C24
$(EI)_{\text{eff}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2290,50	2465,77	2629,74	2709,57	2789,46	2939,65
$\Delta_{\text{CLT}}$ [mm]	0,92	1,04	1,10	1,18	1,26	1,31
u [mm]	23,61	25,45	26,04	27,61	29,06	29,43
$F_{\text{pre}}$ [kN]	33,44	38,81	42,34	46,25	50,13	53,49
$K_{\text{CLT}}$ [N/mm]	9202,27	9246,96	9269,08	9291,06	9334,59	9356,16
$\gamma_{\text{CLT}}$	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33
$\sigma_{\text{les.N}}$ [MPa]	3,62	4,10	4,36	4,70	5,04	5,24
$\sigma_{\text{les.M}}$ [MPa]	7,66	9,44	10,87	12,16	13,48	15,01
$\sigma_{\text{CLT.zg}}$ [MPa]	-6,83	-7,54	-7,86	-8,41	-8,92	-9,16
$\tau_{\text{max.les}}$ [MPa]	0,59	0,70	0,78	0,86	0,94	1,02
$\sigma_{\text{CLT.sp}}$ [MPa]	0,40	0,25	0,11	0,05	-0,03	-0,16
$\tau_{\text{max.CLt}}$ [MPa]	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12
$I_{\text{les.sp}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{\text{les.strig}}$	0,35	0,39	0,39	0,39	0,39	0,41
$I_{\text{CLT.zg}}$	0,30	0,34	0,35	0,38	0,40	0,41
$I_{\text{CLT.strig}}$	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
$F_{\text{screw.CLt}}$ [kN]	-2,58	-2,91	-3,10	-3,34	-3,58	-3,73
$F_{\text{Rk.JFM}}$ [kN]	4,07	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09
$I_{\text{screw.CLt}}$	0,63	0,72	0,76	0,82	0,88	0,91
$\text{JFM}_{\text{CLT}}$	F	F	F	F	F	F

## 12.2 Rezultati parametrične študije

### 12.2.1 Konfiguracija A2, parameter: indeks CLT plošče

Tabela 75: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A2							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2,05	4,19	4,74	4,85	4,08	2,22	3,96	2,16
u [mm]	18,22	11,68	11,31	10,27	8,63	5,43	8,63	5,43
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1304,01	3953,77	4527,51	5156,08	5405,59	5844,14	5304,72	5752,75
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1226,42	3374,27	3886,82	4382,96	4598,09	4951,50	4497,22	4860,10
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]		13,80	14,53	13,99	12,83	8,70	12,83	8,70
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]		9,20	9,69	9,33	8,56	5,80	8,56	5,80
$\gamma_{CLT,SLS}$		0,42	0,43	0,33	0,31	0,18	0,31	0,18
$\gamma_{CLT,ULS}$		0,32	0,33	0,24	0,23	0,13	0,23	0,13
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]		-3,85	-4,50	-3,83	-3,43	-2,19	-3,43	-2,19
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]		-0,20	0,22	0,99	1,08	1,21	1,08	1,21
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]		0,07	0,08	0,08	0,06	0,03	0,06	0,03
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-7,28	-2,83	-2,57	-2,17	-1,85	-1,29	-1,85	-1,29
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	4,81	4,92	4,93	4,64	3,88	2,32	3,88	2,32
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,58	0,74	0,76	0,73	0,61	0,35	0,61	0,35
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	21,59	22,68	22,74	21,46	17,93	10,68	17,93	10,68
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	27,64	26,55	26,49	24,87	20,80	12,48	20,80	12,48
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	66,29	63,13	62,95	59,06	49,40	29,67	49,40	29,67
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]		-2,16	-2,28	-2,27	-1,88	-1,04	-1,88	-1,04
$F_{con.s,ULS}$ [kN]	5,08	5,08	5,08	4,78	3,99	2,39	3,99	2,39
$F_{con.s,ULS,critic}$ [kN]	0,53	0,53	0,53	0,49	0,41	0,25	0,41	0,25
$I_{z_{CLT,zg}}$		0,27	0,31	0,26	0,23	0,15	0,23	0,15
$I_{z_{CLT,strig}}$		0,15	0,16	0,16	0,13	0,07	0,13	0,07
$I_{z_{les,zg}}$	0,72	0,45	0,44	0,40	0,33	0,21	0,33	0,21
$I_{z_{les,sp}}$	0,70	0,66	0,67	0,65	0,54	0,31	0,54	0,31
$I_{z_{les,strig}}$	0,56	0,71	0,72	0,70	0,58	0,34	0,58	0,34
$I_z$	0,92	0,87	0,87	0,82	0,68	0,41	0,68	0,41
$I_{z_{screw,CLT}}$		0,86	0,86	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_{con.s}}$	1,00	1,00	1,00	0,94	0,79	0,47	0,79	0,47
$X_{con.s,ULS,critic}$ [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
$KO_{con.s,ULS,critic}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$		F	F	F	F	E	F	E
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	66,29	63,13	62,95	59,06	49,40	29,67	49,40	29,67
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	31,40	30,96	30,94	29,09	24,32	14,56	24,32	14,56
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	40,26	39,95	39,93	37,56	31,40	18,79	31,40	18,79
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	58,84	58,69	58,68	55,21	46,16	27,61	46,16	27,61
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	54,32	54,22	54,21	51,01	42,65	25,51	42,65	25,51

Tabela 76: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; ULS

Konfiguracija	A2							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,81	3,53	4,01	4,43	4,55	2,65	4,41	2,57
u [mm]	23,57	15,70	15,22	14,80	14,54	9,46	14,54	9,46
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	945,74	2661,78	3039,15	3423,25	3571,69	3794,89	3503,54	3733,13
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	875,51	2209,18	2538,26	2834,37	2964,91	3166,17	2896,75	3104,42
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
$\gamma_{s,SLS}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$\gamma_{s,ULS}$	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]		7,04	7,42	7,14	6,55	4,44	6,55	4,44
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]		4,70	4,94	4,76	4,37	2,96	4,37	2,96
$\gamma_{CLT,SLS}$		0,35	0,36	0,27	0,25	0,15	0,25	0,15
$\gamma_{CLT,ULS}$		0,26	0,27	0,20	0,18	0,10	0,18	0,10
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]		-3,31	-3,89	-3,57	-3,74	-2,49	-3,74	-2,49
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]		0,01	0,40	1,12	1,38	1,51	1,38	1,51
$\tau_{\max,CLT,ULS}$ [MPa]		0,06	0,06	0,07	0,06	0,03	0,06	0,03
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-6,52	-2,90	-2,68	-2,49	-2,47	-1,76	-2,47	-1,76
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	4,05	4,14	4,15	4,15	4,04	2,48	4,04	2,48
$\tau_{\max,les,ULS}$ [MPa]	0,53	0,65	0,66	0,67	0,65	0,39	0,65	0,39
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	20,70	22,01	22,09	22,16	21,57	13,16	21,57	13,16
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	28,52	27,22	27,14	27,07	26,39	16,30	26,39	16,30
$\sigma_{s,\max,ULS}$ [MPa]	68,88	65,08	64,84	64,64	63,04	38,98	63,04	38,98
$F_{\text{screw},CLT,ULS}$ [kN]		-1,76	-1,86	-1,96	-1,88	-1,04	-1,88	-1,04
$F_{\text{con},s,ULS}$ [kN]	5,08	5,08	5,08	5,08	4,95	3,04	4,95	3,04
$F_{\text{con},s,ULS,\text{critic}}$ [kN]	0,53	0,53	0,53	0,53	0,51	0,31	0,51	0,31
$I_{z,CLT,zg}$		0,23	0,27	0,24	0,25	0,17	0,25	0,17
$I_{z,CLT,\text{strig}}$		0,12	0,13	0,14	0,13	0,07	0,13	0,07
$I_{z,les,zg}$	0,63	0,41	0,40	0,39	0,38	0,25	0,38	0,25
$I_{z,les,sp}$	0,61	0,53	0,55	0,55	0,54	0,32	0,54	0,32
$I_{z,les,\text{strig}}$	0,51	0,62	0,63	0,64	0,62	0,37	0,62	0,37
$I_{z_s}$	0,95	0,90	0,90	0,89	0,87	0,54	0,87	0,54
$I_{z,\text{screw},CLT}$		0,70	0,70	0,86	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z,\text{con},s}$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,60	0,97	0,60
$X_{\text{con},s,ULS,\text{critic}}$ [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
$KO_{\text{con},s,ULS,\text{critic}}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$		F	F	F	F	E	F	E
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	68,88	65,08	64,84	64,64	63,04	38,98	63,04	38,98
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	31,76	31,23	31,20	31,17	30,38	18,70	30,38	18,70
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	40,51	40,14	40,12	40,10	39,08	24,03	39,08	24,03
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	58,96	58,78	58,77	58,76	57,26	35,18	57,26	35,18
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	54,40	54,28	54,27	54,27	52,88	32,48	52,88	32,48

Tabela 77: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	A2							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8

	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2,90	10,92	12,63	14,55	15,28	16,57	14,97	16,28
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1304,01	3953,77	4527,51	5156,08	5405,59	5844,14	5304,72	5752,75
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1226,42	3374,27	3886,82	4382,96	4598,09	4951,50	4497,22	4860,10
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]		13,80	14,53	13,99	12,83	8,70	12,83	8,70
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]		9,20	9,69	9,33	8,56	5,80	8,56	5,80
$\gamma_{CLT,SLS}$		0,42	0,43	0,33	0,31	0,18	0,31	0,18
$\gamma_{CLT,ULS}$		0,32	0,33	0,24	0,23	0,13	0,23	0,13

Tabela 78: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	A2							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,06	11,38	13,16	15,01	15,67	16,56	15,32	16,24
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	802,27	2201,87	2510,19	2816,77	2933,61	3098,96	2877,57	3048,19
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	737,15	1807,38	2073,80	2308,32	2412,18	2569,81	2356,14	2519,03
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$\gamma_{s,SLS}$	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
$\gamma_{s,ULS}$	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]		5,31	5,59	5,38	4,94	3,35	4,94	3,35
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]		3,54	3,73	3,59	3,29	2,23	3,29	2,23
$\gamma_{CLT,SLS}$		0,33	0,34	0,25	0,23	0,13	0,23	0,13
$\gamma_{CLT,ULS}$		0,25	0,26	0,18	0,17	0,09	0,17	0,09

## 12.2.2 Konfiguracija B, parameter: indeks CLT plošče

Tabela 79: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	B							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,68	3,28	3,84	4,19	3,56	2,00	3,41	1,92
u [mm]	25,96	14,21	13,59	12,68	10,58	6,52	10,58	6,52
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	2521,33	2996,65	3484,03	3737,22	4279,08	3636,35	4187,68
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	2290,50	2732,31	3149,70	3374,53	3831,13	3273,66	3739,74
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	-2,99	13,80	14,53	13,99	12,83	8,70	12,83	8,70
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	-1,99	9,20	9,69	9,33	8,56	5,80	8,56	5,80
$\gamma_{CLT,SLS}$		0,42	0,43	0,33	0,31	0,18	0,31	0,18
$\gamma_{CLT,ULS}$		0,32	0,33	0,24	0,23	0,13	0,23	0,13
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]		-4,20	-4,92	-4,39	-3,93	-2,53	-3,93	-2,53

$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]		0,24	0,75	1,56	1,58	1,55	1,58	1,55
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]		0,07	0,07	0,08	0,06	0,03	0,06	0,03
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-8,62	-2,49	-2,17	-1,81	-1,53	-1,07	-1,53	-1,07
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	8,62	6,94	6,86	6,60	5,50	3,26	5,50	3,26
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,57	0,68	0,69	0,69	0,57	0,33	0,57	0,33
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]		-2,11	-2,22	-2,27	-1,88	-1,04	-1,88	-1,04
$I_{Z_{CLT.zg}}$		0,29	0,34	0,30	0,27	0,17	0,27	0,17
$I_{Z_{CLT.strig}}$		0,15	0,16	0,16	0,13	0,07	0,13	0,07
$I_{Z_{les.zg}}$	1,00	0,55	0,52	0,49	0,41	0,25	0,41	0,25
$I_{Z_{les.sp}}$	1,00	1,00	1,00	0,97	0,81	0,47	0,81	0,47
$I_{Z_{les.strig}}$	0,55	0,65	0,66	0,66	0,55	0,31	0,55	0,31
$I_{Z_{screw.CL.T}}$		0,84	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$		F	F	F	F	E	F	E

Tabela 80: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; ULS fin

Konfiguracija	B							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,68	3,19	3,76	4,26	3,90	2,35	3,73	2,25
u [mm]	38,42	22,27	21,33	20,58	18,10	11,51	18,10	11,51
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	504,50	1597,05	1902,94	2199,21	2356,70	2680,25	2288,54	2618,49
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	504,50	1433,63	1714,48	1966,19	2106,89	2390,67	2038,73	2328,91
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]		7,04	7,42	7,14	6,55	4,44	6,55	4,44
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]		4,70	4,94	4,76	4,37	2,96	4,37	2,96
$\gamma_{CLT.SLS}$		0,35	0,36	0,27	0,25	0,15	0,25	0,15
$\gamma_{CLT.ULS}$		0,26	0,27	0,20	0,18	0,10	0,18	0,10
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]		-4,19	-4,95	-4,62	-4,37	-2,92	-4,37	-2,92
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]		0,51	1,06	1,91	2,01	1,95	2,01	1,95
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]		0,07	0,07	0,07	0,06	0,03	0,06	0,03
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-8,62	-2,92	-2,59	-2,33	-2,07	-1,49	-2,07	-1,49
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	8,62	7,06	6,97	6,90	6,04	3,68	6,04	3,68
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,57	0,66	0,67	0,68	0,60	0,35	0,60	0,35
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]		-1,96	-2,08	-2,17	-1,88	-1,04	-1,88	-1,04
$I_{Z_{CLT.zg}}$		0,29	0,34	0,31	0,30	0,19	0,30	0,19
$I_{Z_{CLT.strig}}$		0,14	0,15	0,15	0,13	0,07	0,13	0,07
$I_{Z_{les.zg}}$	1,00	0,58	0,56	0,54	0,47	0,30	0,47	0,30
$I_{Z_{les.sp}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87	0,52	0,87	0,52
$I_{Z_{les.strig}}$	0,55	0,63	0,64	0,65	0,57	0,33	0,57	0,33
$I_{Z_{screw.CL.T}}$		0,78	0,78	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$		F	F	F	F	E	F	E

Tabela 81: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	B							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,21	6,49	7,89	9,37	10,12	11,73	9,81	11,44
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	2521,33	2996,65	3484,03	3737,22	4279,08	3636,35	4187,68

$(EI)_{\text{eff.ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	2290,50	2732,31	3149,70	3374,53	3831,13	3273,66	3739,74
$K_{\text{CLT.SLS}}$ [kN/mm]		13,80	14,53	13,99	12,83	8,70	12,83	8,70
$K_{\text{CLT.ULS}}$ [kN/mm]		9,20	9,69	9,33	8,56	5,80	8,56	5,80
$\gamma_{\text{CLT.SLS}}$		0,42	0,43	0,33	0,31	0,18	0,31	0,18
$\gamma_{\text{CLT.ULS}}$		0,32	0,33	0,24	0,23	0,13	0,23	0,13

Tabela 82: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	B							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\text{max}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,72	5,73	7,13	8,53	9,25	10,71	8,90	10,40
$u$ [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{\text{eff.SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	414,81	1284,90	1532,21	1767,61	1893,88	2151,07	1837,84	2100,30
$(EI)_{\text{eff.ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	414,81	1149,62	1375,88	1575,68	1688,88	1917,98	1632,84	1867,21
$K_{\text{CLT.SLS}}$ [kN/mm]		5,31	5,59	5,38	4,94	3,35	4,94	3,35
$K_{\text{CLT.ULS}}$ [kN/mm]		3,54	3,73	3,59	3,29	2,23	3,29	2,23
$\gamma_{\text{CLT.SLS}}$		0,33	0,34	0,25	0,23	0,13	0,23	0,13
$\gamma_{\text{CLT.ULS}}$		0,25	0,26	0,18	0,17	0,09	0,17	0,09

### 12.2.3 Konfiguracija A2, parameter: razmik med vijaki CLT plošče

Tabela 83: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A2							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,2	13,2	19,2	25,2	31,2	37,2	43,2	49,2
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{\text{max}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4,36	3,81	2,60	1,97	1,58	1,31	1,12	0,98
$u$ [mm]	11,08	11,77	10,06	9,16	8,60	8,23	7,96	7,75
$(EI)_{\text{eff.SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4241,52	3690,36	3322,18	3058,83	2861,12	2707,22	2584,03	2483,18
$(EI)_{\text{eff.ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3669,69	3118,46	2782,25	2555,79	2392,88	2270,05	2174,15	2097,18
$K_{\text{s.SLS}}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{\text{s.ULS}}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{\text{s.SLS}}$	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$\gamma_{\text{s.ULS}}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$K_{\text{CLT.SLS}}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{\text{CLT.ULS}}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{\text{CLT.SLS}}$	0,50	0,35	0,27	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13
$\gamma_{\text{CLT.ULS}}$	0,40	0,27	0,20	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09
$\sigma_{\text{CLT.zg.ULS}}$ [MPa]	-3,94	-3,62	-2,80	-2,36	-2,10	-1,92	-1,79	-1,69
$\sigma_{\text{CLT.sp.ULS}}$ [MPa]	-0,47	0,06	0,35	0,50	0,59	0,66	0,70	0,74
$\tau_{\text{max.CL.T.ULS}}$ [MPa]	0,08	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{\text{les.zg.ULS}}$ [MPa]	-2,42	-3,09	-2,91	-2,81	-2,75	-2,71	-2,69	-2,66
$\sigma_{\text{les.sp.ULS}}$ [MPa]	4,93	4,72	3,77	3,26	2,96	2,75	2,60	2,48
$\tau_{\text{max.les.ULS}}$ [MPa]	0,77	0,69	0,53	0,45	0,40	0,37	0,34	0,33
$\sigma_{\text{s.zg.ULS}}$ [MPa]	22,77	21,71	17,25	14,91	13,48	12,50	11,80	11,27
$\sigma_{\text{s.sp.ULS}}$ [MPa]	26,45	25,62	20,59	17,95	16,33	15,23	14,44	13,84
$\sigma_{\text{s.max.ULS}}$ [MPa]	62,84	60,96	49,04	42,81	38,97	36,37	34,49	33,07
$F_{\text{screw.CL.T.ULS}}$ [kN]	-1,70	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50
$F_{\text{con.s.ULS}}$ [kN]	5,08	4,88	3,90	3,39	3,07	2,86	2,71	2,59

$F_{\text{con.s.ULS,critic}}$ [kN]	0,53	0,50	0,40	0,35	0,32	0,30	0,28	0,27
$I_{\text{CLT,zg}}$	0,28	0,25	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11
$I_{\text{CLT,strig}}$	0,17	0,13	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
$I_{\text{les,zg}}$	0,43	0,45	0,39	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30
$I_{\text{les,sp}}$	0,68	0,62	0,47	0,40	0,35	0,32	0,31	0,30
$I_{\text{les,strig}}$	0,73	0,66	0,51	0,43	0,38	0,35	0,33	0,31
$I_z$	0,87	0,84	0,68	0,59	0,54	0,50	0,48	0,46
$I_{\text{screw,CLT}}$	0,68	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{\text{con.s}}$	1,00	0,96	0,77	0,67	0,61	0,56	0,53	0,51
$X_{\text{con.s.ULS,critic}}$ [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
$KO_{\text{con.s.ULS,critic}}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{\text{CLT}}$	F	F	F	F	F	F	F	F
$JFM_{\text{s,ST}}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{\text{s,S}}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{\text{s,1001}}$ [MPa]	62,84	60,96	49,04	42,81	38,97	36,37	34,49	33,07
$\sigma_{\text{s,1002}}$ [MPa]	30,92	29,80	23,87	20,76	18,85	17,56	16,62	15,91
$\sigma_{\text{s,1003}}$ [MPa]	39,92	38,43	30,76	26,74	24,26	22,59	21,38	20,46
$\sigma_{\text{s,1004}}$ [MPa]	58,67	56,43	45,13	39,21	35,57	33,10	31,32	29,97
$\sigma_{\text{s,1005}}$ [MPa]	54,21	52,13	41,69	36,22	32,85	30,57	28,92	27,68

Tabela 84: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS fin

Konfiguracija	A2							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,2	13,2	19,2	25,2	31,2	37,2	43,2	49,2
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\text{max}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,71	3,37	3,09	2,44	2,05	1,78	1,58	1,44
$u$ [mm]	14,83	16,52	17,44	16,16	15,37	14,84	14,45	14,16
$(EI)_{\text{eff,SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2890,36	2461,71	2195,69	2014,51	1883,16	1783,58	1705,47	1642,57
$(EI)_{\text{eff,ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2426,01	2029,71	1804,77	1659,79	1558,58	1483,91	1426,56	1381,12
$K_{\text{s,SLS}}$ [kN/mm]	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69
$K_{\text{s,ULS}}$ [kN/mm]	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
$\gamma_{\text{s,SLS}}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$\gamma_{\text{s,ULS}}$	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
$K_{\text{CLT,SLS}}$ [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
$K_{\text{CLT,ULS}}$ [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{\text{CLT,SLS}}$	0,43	0,29	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10
$\gamma_{\text{CLT,ULS}}$	0,33	0,21	0,16	0,13	0,10	0,09	0,08	0,07
$\sigma_{\text{CLT,zg,ULS}}$ [MPa]	-3,40	-3,22	-3,07	-2,64	-2,38	-2,20	-2,07	-1,97
$\sigma_{\text{CLT,sp,ULS}}$ [MPa]	-0,26	0,27	0,62	0,78	0,87	0,94	0,98	1,02
$\tau_{\text{max,CLT,ULS}}$ [MPa]	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{\text{les,zg,ULS}}$ [MPa]	-2,50	-3,27	-3,75	-3,65	-3,59	-3,55	-3,52	-3,50
$\sigma_{\text{les,sp,ULS}}$ [MPa]	4,15	4,13	4,07	3,60	3,30	3,10	2,96	2,85
$\tau_{\text{max,les,ULS}}$ [MPa]	0,67	0,63	0,60	0,52	0,47	0,44	0,42	0,40
$\sigma_{\text{s,zg,ULS}}$ [MPa]	22,15	21,87	21,42	18,84	17,26	16,18	15,41	14,82
$\sigma_{\text{s,sp,ULS}}$ [MPa]	27,07	27,35	27,21	24,20	22,36	21,11	20,20	19,52
$\sigma_{\text{s,max,ULS}}$ [MPa]	64,65	65,47	65,21	58,08	53,69	50,72	48,57	46,95
$F_{\text{screw,CLT,ULS}}$ [kN]	-1,41	-2,08	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50
$F_{\text{con.s,ULS}}$ [kN]	5,08	5,08	5,01	4,44	4,08	3,84	3,67	3,54
$F_{\text{con.s,ULS,critic}}$ [kN]	0,53	0,53	0,52	0,46	0,42	0,40	0,38	0,37
$I_{\text{CLT,zg}}$	0,24	0,22	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
$I_{\text{CLT,strig}}$	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04



$I_{z_{les.zg}}$	0,39	0,43	0,45	0,42	0,40	0,39	0,38	0,37
$I_{z_{les.sp}}$	0,55	0,52	0,49	0,42	0,40	0,39	0,38	0,37
$I_{z_{les.strig}}$	0,64	0,60	0,58	0,50	0,45	0,42	0,40	0,38
$I_{z_s}$	0,89	0,91	0,90	0,80	0,74	0,70	0,67	0,65
$I_{z_{screw.CLT}}$	0,56	0,83	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_{con.s}}$	1,00	1,00	0,99	0,87	0,80	0,76	0,72	0,70
$X_{con.s.ULS.critic}$ [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
$KO_{con.s.ULS.critic}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	64,65	65,47	65,21	58,08	53,69	50,72	48,57	46,95
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	31,17	31,29	30,98	27,47	25,32	23,86	22,80	22,00
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	40,10	40,18	39,74	35,22	32,43	30,55	29,19	28,16
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	58,76	58,80	58,10	51,46	47,37	44,60	42,59	41,08
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	54,27	54,29	53,64	47,50	43,72	41,16	39,31	37,91

Tabela 85: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	A2							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,2	13,2	19,2	25,2	31,2	37,2	43,2	49,2
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	11,82	10,10	8,95	8,13	7,51	7,03	6,65	6,33
$u$ [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4241,52	3690,36	3322,18	3058,83	2861,12	2707,22	2584,03	2483,18
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3669,69	3118,46	2782,25	2555,79	2392,88	2270,05	2174,15	2097,18
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,50	0,35	0,27	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,40	0,27	0,20	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09

Tabela 86: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	A2							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,2	13,2	19,2	25,2	31,2	37,2	43,2	49,2
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	12,62	10,31	8,91	7,98	7,30	6,80	6,41	6,09
$u$ [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2400,21	2030,84	1807,10	1657,04	1549,41	1468,44	1405,32	1354,73
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1990,08	1658,32	1474,18	1357,07	1276,01	1216,59	1171,16	1135,29
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$\gamma_{s,SLS}$	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
$\gamma_{s,ULS}$	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54

$\gamma_{CLT,SLS}$	0,41	0,27	0,21	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,31	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06

### 12.2.4 Konfiguracija B, parameter: razmik med vijaki CLT plošče

Tabela 87: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	B							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,2	13,2	19,2	25,2	31,2	37,2	43,2	49,2
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,36	3,04	1,99	1,44	1,10	0,87	0,71	0,58
u [mm]	13,38	14,52	12,25	11,06	10,33	9,83	9,48	9,21
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2687,95	2365,54	2142,34	1978,67	1853,52	1754,71	1674,73	1608,65
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2479,33	2123,74	1899,87	1745,96	1633,65	1548,09	1480,73	1426,32
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,50	0,35	0,27	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,40	0,27	0,20	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-4,21	-4,05	-3,14	-2,66	-2,37	-2,17	-2,03	-1,92
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	-0,03	0,49	0,69	0,80	0,86	0,91	0,94	0,96
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,08	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,06	-2,82	-2,69	-2,62	-2,58	-2,55	-2,53	-2,52
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	6,83	6,82	5,44	4,72	4,27	3,97	3,76	3,59
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,70	0,64	0,48	0,40	0,35	0,32	0,30	0,28
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-1,63	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50
$I_{Z_{CLT,zg}}$	0,29	0,28	0,22	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
$I_{Z_{CLT,strig}}$	0,16	0,13	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
$I_{Z_{les,zg}}$	0,52	0,56	0,47	0,43	0,40	0,38	0,37	0,35
$I_{Z_{les,sp}}$	1,00	0,97	0,75	0,64	0,57	0,52	0,49	0,46
$I_{Z_{les,strig}}$	0,67	0,61	0,46	0,38	0,34	0,31	0,28	0,27
$I_{Z_{screw,CLT}}$	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
JFM <sub>CLT</sub>	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 88: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS fin

Konfiguracija	B							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,2	13,2	19,2	25,2	31,2	37,2	43,2	49,2
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,29	3,09	2,29	1,74	1,40	1,17	1,01	0,88
u [mm]	20,84	23,64	21,61	19,85	18,77	18,04	17,51	17,11
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1720,81	1485,77	1333,33	1226,46	1147,37	1086,49	1038,17	998,89
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1566,64	1320,98	1176,40	1081,16	1013,68	963,37	924,42	893,36
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,43	0,29	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,33	0,21	0,16	0,13	0,10	0,09	0,08	0,07
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-4,21	-4,18	-3,51	-3,03	-2,74	-2,54	-2,39	-2,29
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,20	0,82	1,06	1,17	1,23	1,28	1,31	1,33
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,42	-3,41	-3,47	-3,40	-3,36	-3,34	-3,31	-3,30

$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	6,93	7,20	6,22	5,50	5,05	4,75	4,54	4,37
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,68	0,65	0,53	0,45	0,40	0,37	0,35	0,33
$F_{screw.CLT.ULS}$ [kN]	-1,54	-2,37	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50
$I_{Z_{CLT.zg}}$	0,29	0,29	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15
$I_{Z_{CLT.strig}}$	0,15	0,13	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
$I_{Z_{les.zg}}$	0,54	0,62	0,56	0,52	0,49	0,47	0,46	0,45
$I_{Z_{les.sp}}$	1,00	1,00	0,84	0,73	0,66	0,61	0,58	0,55
$I_{Z_{les.strig}}$	0,65	0,62	0,51	0,43	0,38	0,35	0,33	0,32
$I_{Z_{screw.CLT}}$	0,61	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 89: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	B							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,2	13,2	19,2	25,2	31,2	37,2	43,2	49,2
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	7,01	6,01	5,31	4,80	4,41	4,10	3,85	3,64
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2687,95	2365,54	2142,34	1978,67	1853,52	1754,71	1674,73	1608,65
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2479,33	2123,74	1899,87	1745,96	1633,65	1548,09	1480,73	1426,32
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,50	0,35	0,27	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,40	0,27	0,20	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09

Tabela 90: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	B							
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]							
Parameter	7,20	13,20	19,20	25,20	31,20	37,20	43,20	49,20
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	6,38	5,15	4,37	3,83	3,44	3,14	2,90	2,71
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1388,92	1192,53	1067,76	981,48	918,26	869,93	831,80	800,95
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1259,55	1057,74	941,40	865,72	812,56	773,16	742,79	718,68
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,41	0,27	0,21	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,31	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06

### 12.2.5 Konfiguracija A2, parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les

Tabela 91: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; ULS ini

Konfiguracija	A2							
	Razmik med točkovnimi stiki steklo-les [cm]							
Parameter	10	16	22	28	34	40	46	52
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4,44	3,96	3,05	2,54	2,22	2,00	1,85	1,74
u [mm]	11,56	11,30	9,79	8,96	8,46	8,13	7,91	7,77
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4147,96	3920,37	3748,68	3614,54	3506,86	3418,50	3344,69	3282,12

$(EI)_{\text{eff,ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3565,39	3342,73	3186,33	3070,43	2981,11	2910,17	2852,46	2804,60
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,68	0,57	0,49	0,43	0,38	0,34	0,31	0,29
$\gamma_{s,ULS}$	0,58	0,46	0,39	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-3,88	-3,72	-3,17	-2,87	-2,69	-2,56	-2,48	-2,42
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	-0,27	-0,18	-0,11	-0,07	-0,04	-0,02	0,00	0,01
$\tau_{\text{max,CLT,ULS}}$ [MPa]	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
$\sigma_{\text{les,zg,ULS}}$ [MPa]	-2,94	-2,72	-2,26	-2,00	-1,84	-1,74	-1,66	-1,61
$\sigma_{\text{les,sp,ULS}}$ [MPa]	4,74	4,79	4,24	3,95	3,77	3,66	3,59	3,55
$\tau_{\text{max,les,ULS}}$ [MPa]	0,77	0,71	0,59	0,53	0,49	0,46	0,44	0,43
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	26,75	21,25	15,43	12,10	9,95	8,44	7,33	6,47
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	30,59	25,00	18,68	15,08	12,76	11,14	9,95	9,05
$\sigma_{s,\text{max,ULS}}$ [MPa]	72,32	59,51	44,82	36,51	31,32	27,69	24,96	23,03
$F_{\text{screw,CLT,ULS}}$ [kN]	-2,21	-2,08	-1,75	-1,57	-1,45	-1,38	-1,33	-1,29
$F_{\text{con,s,ULS}}$ [kN]	3,99	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08
$F_{\text{con,s,ULS,critic}}$ [kN]	0,18	0,58	0,38	1,03	0,93	1,11	1,61	1,10
$I_{Z_{CLT,zg}}$	0,27	0,26	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17
$I_{Z_{CLT,strig}}$	0,16	0,15	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09
$I_{Z_{\text{les,zg}}}$	0,45	0,44	0,38	0,35	0,33	0,31	0,30	0,30
$I_{Z_{\text{les,sp}}}$	0,63	0,65	0,58	0,54	0,52	0,51	0,50	0,50
$I_{Z_{\text{les,strig}}}$	0,73	0,68	0,57	0,50	0,47	0,44	0,42	0,41
$I_{Z_s}$	1,00	0,82	0,62	0,50	0,43	0,38	0,35	0,32
$I_{Z_{\text{screw,CLT}}}$	0,88	0,83	0,70	0,63	0,58	0,55	0,53	0,51
$I_{Z_{\text{con,s}}}$	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$X_{\text{con,s,ULS,critic}}$ [m]	2,15	2,00	2,09	1,82	1,87	1,80	1,61	1,82
$KO_{\text{con,s,ULS,critic}}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	72,32	59,51	44,82	36,51	31,32	27,69	24,96	23,03
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	35,72	29,16	21,69	17,67	15,01	13,22	11,98	10,84
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	46,45	37,54	27,91	22,21	18,80	16,33	14,39	13,23
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	67,58	55,30	40,95	33,82	28,67	25,41	23,46	20,86
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	63,36	50,89	37,79	29,63	25,01	21,52	18,60	17,27

Tabela 92: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; ULS fin

Konfiguracija	A2							
	Razmik med točkovnimi stiki steklo-les [cm]							
Parameter	10	16	22	28	34	40	46	52
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\text{max}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,58	3,34	2,58	2,15	1,88	1,70	1,58	1,49
$u$ [mm]	14,79	15,26	13,50	12,54	11,97	11,61	11,38	11,24
$(EI)_{\text{eff,SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2836,01	2632,66	2486,69	2376,81	2291,11	2222,41	2166,09	2119,10
$(EI)_{\text{eff,ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2369,68	2183,47	2059,10	1970,15	1903,39	1851,42	1809,82	1775,78
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13

$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,47	0,39	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,37	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-3,18	-3,20	-2,78	-2,55	-2,41	-2,33	-2,27	-2,23
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	-0,05	0,02	0,07	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,90	-2,79	-2,35	-2,11	-1,96	-1,86	-1,79	-1,74
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	3,74	4,05	3,70	3,51	3,41	3,35	3,32	3,30
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,65	0,63	0,53	0,47	0,44	0,42	0,40	0,39
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	25,54	20,60	14,82	11,51	9,37	7,87	6,75	5,89
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	30,44	25,66	19,30	15,67	13,34	11,72	10,53	9,62
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	72,32	61,42	46,62	38,19	32,98	29,32	26,52	24,67
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-1,73	-1,69	-1,45	-1,31	-1,23	-1,17	-1,13	-1,11
$F_{con,s,ULS}$ [kN]	3,89	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08
$F_{con,s,ULS,critic}$ [kN]	0,18	0,58	0,38	1,03	0,93	1,11	1,61	1,10
$I_{z,CLT,zg}$	0,22	0,22	0,19	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15
$I_{z,CLT,strig}$	0,12	0,12	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08
$I_{z,les,zg}$	0,39	0,40	0,35	0,33	0,31	0,30	0,30	0,29
$I_{z,les,sp}$	0,47	0,53	0,49	0,47	0,46	0,45	0,45	0,45
$I_{z,les,strig}$	0,62	0,60	0,50	0,45	0,42	0,40	0,38	0,37
$I_{z,s}$	1,00	0,85	0,64	0,53	0,46	0,41	0,37	0,34
$I_{z,screw,CLT}$	0,69	0,68	0,58	0,52	0,49	0,47	0,45	0,44
$I_{z,con,s}$	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$X_{con,s,ULS,critic}$ [m]	2,15	2,00	2,09	1,82	1,87	1,80	1,61	1,82
$KO_{con,s,ULS,critic}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	72,32	61,42	46,62	38,19	32,98	29,32	26,52	24,67
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	35,11	29,42	21,94	17,90	15,24	13,44	12,19	11,07
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	45,52	37,73	28,09	22,38	18,97	16,50	14,54	13,39
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	66,06	55,39	41,04	33,90	28,75	25,49	23,53	20,94
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	61,92	50,95	37,85	29,69	25,06	21,58	18,65	17,32

Tabela 93: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; SLS ini

Konfiguracija	A2							
	Razmik med točkovnimi stiki steklo-les [cm]							
Parameter	10	16	22	28	34	40	46	52
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	11,53	10,82	10,28	9,86	9,53	9,25	9,02	8,82
$u$ [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4147,96	3920,37	3748,68	3614,54	3506,86	3418,50	3344,69	3282,12
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3565,39	3342,73	3186,33	3070,43	2981,11	2910,17	2852,46	2804,60
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,68	0,57	0,49	0,43	0,38	0,34	0,31	0,29
$\gamma_{s,ULS}$	0,58	0,46	0,39	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80

$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32

Tabela 94: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; SLS fin

Konfiguracija	A2							
	Razmik med točkovnimi stiki steklo-les [cm]							
Parameter	10	16	22	28	34	40	46	52
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	12,39	11,21	10,38	9,77	9,30	8,92	8,62	8,36
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2364,50	2175,06	2042,22	1943,91	1868,21	1808,14	1759,30	1718,81
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1952,98	1784,38	1674,33	1596,84	1539,33	1494,94	1459,66	1430,93
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$\gamma_{s,SLS}$	0,54	0,42	0,34	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18
$\gamma_{s,ULS}$	0,44	0,33	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

## 12.2.6 Konfiguracija A2, parameter: indeks vijaka CLT plošče

Tabela 95: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A2														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,77	2,10	3,52	4,09	4,15	4,19	4,34	4,32	4,34	4,35	4,37	4,37	4,39	4,40	4,40
u [mm]	5,93	8,43	11,17	12,00	11,81	11,68	11,16	11,23	11,17	11,12	11,08	11,05	10,99	10,97	10,97
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2987,2 4	3445,9 4	3670,2 2	3803,2 1	3891,2 2	3953,7 7	4203,8 4	4168,5 1	4198,8 8	4222,9 9	4242,5 9	4258,8 3	4289,4 3	4297,8 2	4297,8 2
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2496,1 1	2892,6 2	3099,4 4	3226,4 2	3312,3 1	3374,2 7	3630,0 1	3593,0 8	3624,8 2	3650,1 4	3670,8 3	3688,0 3	3720,6 0	3729,5 7	3729,5 7
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,08	8,15	10,24	11,76	12,90	13,80	18,32	17,58	18,22	18,75	19,20	19,58	20,33	20,54	20,54
$K_{CLT,ULS}$ [kN/m m]	3,38	5,43	6,83	7,84	8,60	9,20	12,22	11,72	12,14	12,50	12,80	13,05	13,55	13,70	13,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,21	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42	0,49	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,15	0,22	0,26	0,29	0,31	0,32	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-1,50	-2,42	-3,42	-3,80	-3,83	-3,85	-3,93	-3,92	-3,93	-3,94	-3,94	-3,95	-3,96	-3,96	-3,96
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,36	0,21	0,08	-0,05	-0,14	-0,20	-0,44	-0,41	-0,43	-0,46	-0,48	-0,49	-0,52	-0,53	-0,53
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,02	0,04	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-1,85	-2,36	-2,95	-3,05	-2,92	-2,83	-2,48	-2,53	-2,48	-2,45	-2,42	-2,40	-2,36	-2,35	-2,35
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	2,09	3,23	4,47	4,92	4,92	4,92	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,29	0,46	0,65	0,73	0,74	0,74	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	9,53	14,81	20,52	22,62	22,65	22,68	22,76	22,75	22,76	22,77	22,77	22,78	22,79	22,79	22,79

$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	11,49	17,61	24,22	26,60	26,57	26,55	26,46	26,48	26,47	26,46	26,45	26,45	26,44	26,43	26,43
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	27,41	41,93	57,65	63,29	63,20	63,13	62,88	62,92	62,89	62,86	62,84	62,83	62,80	62,79	62,79
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-0,61	-1,18	-1,78	-2,05	-2,12	-2,16	-2,33	-2,31	-2,33	-2,34	-2,36	-2,37	-2,39	-2,39	-2,39
$F_{con,s,ULS}$ [kN]	2,17	3,34	4,61	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08
$F_{con,s,ULS,critic}$ [kN]	0,22	0,35	0,48	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
$Iz_{CLT,zg}$	0,10	0,17	0,24	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
$Iz_{CLT,drig}$	0,04	0,08	0,13	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
$Iz_{les,zg}$	0,23	0,32	0,43	0,46	0,45	0,45	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42
$Iz_{les,sp}$	0,25	0,41	0,58	0,65	0,66	0,66	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69
$Iz_{les,drig}$	0,27	0,44	0,62	0,70	0,70	0,71	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74
$Iz_s$	0,38	0,58	0,80	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
$Iz_{screw,CLT}$	1,00	1,00	1,00	0,88	0,85	0,86	0,68	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79	0,80	0,80	0,80
$Iz_{con,s}$	0,43	0,66	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$X_{con,s,ULS,critic}$ [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
$KO_{con,s,ULS,critic}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$	E	E	E	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	27,41	41,93	57,65	63,29	63,20	63,13	62,88	62,92	62,89	62,86	62,84	62,83	62,80	62,79	62,79
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	13,28	20,44	28,18	30,99	30,97	30,96	30,93	30,93	30,93	30,93	30,92	30,92	30,92	30,92	30,92
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	17,10	26,35	36,34	39,96	39,96	39,95	39,92	39,93	39,92	39,92	39,92	39,92	39,92	39,92	39,92
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	25,08	38,67	53,36	58,70	58,69	58,69	58,68	58,68	58,68	58,68	58,67	58,67	58,67	58,67	58,67
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	23,16	35,72	49,29	54,22	54,22	54,22	54,21	54,21	54,21	54,21	54,21	54,21	54,21	54,21	54,21

Tabela 96: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS fin

Konfiguracija	A2														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,09	2,50	3,36	3,44	3,50	3,53	3,69	3,67	3,68	3,70	3,71	3,72	3,74	3,75	3,75
$u$ [mm]	10,52	14,49	16,58	16,17	15,90	15,70	14,94	15,05	14,95	14,88	14,82	14,77	14,68	14,65	14,65
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1966,50	2283,41	2446,75	2546,39	2613,50	2661,78	2859,81	2831,33	2855,80	2875,31	2891,23	2904,46	2929,48	2936,37	2936,37
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1622,43	1877,30	2016,66	2104,54	2165,02	2209,18	2396,26	2368,75	2392,38	2411,33	2426,86	2439,83	2464,47	2471,28	2471,28
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
$\gamma_{s,SLS}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$\gamma_{s,ULS}$	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	2,59	4,16	5,23	6,00	6,58	7,04	9,35	8,97	9,29	9,57	9,79	9,99	10,37	10,48	10,48
$K_{CLT,ULS}$ [kN/m]	1,73	2,77	3,48	4,00	4,39	4,70	6,23	5,98	6,20	6,38	6,53	6,66	6,92	6,99	6,99
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,17	0,24	0,29	0,32	0,34	0,35	0,42	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,45	0,45
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,12	0,18	0,21	0,23	0,25	0,26	0,32	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,35	0,35	0,35
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-1,68	-2,64	-3,22	-3,26	-3,29	-3,31	-3,39	-3,37	-3,38	-3,39	-3,40	-3,40	-3,41	-3,41	-3,41
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,54	0,43	0,29	0,16	0,07	0,01	-0,23	-0,19	-0,22	-0,25	-0,26	-0,28	-0,31	-0,32	-0,32
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,41	-3,04	-3,30	-3,11	-2,99	-2,90	-2,55	-2,60	-2,56	-2,52	-2,49	-2,47	-2,43	-2,42	-2,42
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	2,31	3,46	4,13	4,14	4,14	4,14	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,33	0,52	0,63	0,64	0,65	0,65	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67

$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	12,09	18,25	21,86	21,93	21,98	22,01	22,13	22,12	22,13	22,14	22,15	22,16	22,18	22,18	22,18
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	15,58	23,05	27,36	27,30	27,25	27,22	27,09	27,11	27,09	27,08	27,07	27,06	27,05	27,04	27,04
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	37,40	55,24	65,50	65,30	65,17	65,08	64,71	64,76	64,72	64,68	64,65	64,63	64,58	64,57	64,57
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-0,61	-1,18	-1,56	-1,65	-1,71	-1,76	-1,93	-1,90	-1,92	-1,94	-1,95	-1,96	-1,98	-1,99	-1,99
$F_{con,s,ULS}$ [kN]	2,85	4,26	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08
$F_{con,s,ULS,critic}$ [kN]	0,30	0,44	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,11	0,18	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$I_{z_{CLT,strig}}$	0,04	0,08	0,11	0,12	0,12	0,12	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$I_{z_{les,zg}}$	0,27	0,38	0,43	0,42	0,41	0,41	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38
$I_{z_{les,sp}}$	0,27	0,42	0,52	0,52	0,53	0,53	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,56
$I_{z_{les,strig}}$	0,32	0,50	0,60	0,61	0,62	0,62	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,65	0,65
$I_{z_s}$	0,52	0,76	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,00	1,00	0,88	0,71	0,68	0,70	0,57	0,64	0,65	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67
$I_{z_{con,s}}$	0,56	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$X_{con,s,ULS,critic}$ [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
$KO_{con,s,ULS,critic}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$	E	E	E	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	37,40	55,24	65,50	65,30	65,17	65,08	64,71	64,76	64,72	64,68	64,65	64,63	64,58	64,57	64,57
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	17,67	26,29	31,29	31,26	31,25	31,23	31,18	31,19	31,18	31,18	31,17	31,17	31,16	31,16	31,16
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	22,65	33,74	40,18	40,16	40,15	40,14	40,10	40,11	40,10	40,10	40,10	40,10	40,09	40,09	40,09
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	33,08	49,35	58,80	58,79	58,79	58,78	58,76	58,77	58,76	58,76	58,76	58,76	58,76	58,76	58,76
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	30,54	45,56	54,29	54,29	54,28	54,28	54,27	54,27	54,27	54,27	54,27	54,27	54,26	54,26	54,26

Tabela 97: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	A2														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	7,90	9,34	10,04	10,45	10,73	10,92	11,70	11,59	11,69	11,76	11,82	11,87	11,97	11,99	11,99
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2987,2 4	3445,9 4	3670,2 2	3803,2 1	3891,2 2	3953,7 7	4203,8 4	4168,5 1	4198,8 8	4222,9 9	4242,5 9	4258,8 3	4289,4 3	4297,8 2	4297,8 2
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2496,1 1	2892,6 2	3099,4 4	3226,4 2	3312,3 1	3374,2 7	3630,0 1	3593,0 8	3624,8 2	3650,1 4	3670,8 3	3688,0 3	3720,6 0	3729,5 7	3729,5 7
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,08	8,15	10,24	11,76	12,90	13,80	18,32	17,58	18,22	18,75	19,20	19,58	20,33	20,54	20,54
$K_{CLT,ULS}$ [kN/m]	3,38	5,43	6,83	7,84	8,60	9,20	12,22	11,72	12,14	12,50	12,80	13,05	13,55	13,70	13,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,21	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42	0,49	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,15	0,22	0,26	0,29	0,31	0,32	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42

Tabela 98: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	A2														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS



Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	7,73	9,37	10,23	10,76	11,12	11,38	12,45	12,29	12,43	12,53	12,62	12,69	12,83	12,87	12,87
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1617,5 8	1880,4 2	2018,1 6	2102,9 4	2160,3 8	2201,8 7	2373,5 2	2348,6 9	2370,0 2	2387,0 6	2400,9 7	2412,5 5	2434,4 8	2440,5 2	2440,5 2
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1327,0 7	1533,2 3	1647,5 6	1720,2 4	1770,5 2	1807,3 8	1964,8 4	1941,5 6	1961,5 6	1977,6 2	1990,8 0	2001,8 2	2022,7 8	2028,5 9	2028,5 9
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$\gamma_{s,SLS}$	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
$\gamma_{s,ULS}$	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	1,95	3,14	3,94	4,52	4,96	5,31	7,05	6,76	7,01	7,21	7,38	7,53	7,82	7,90	7,90
$K_{CLT,ULS}$ [kN/m]	1,30	2,09	2,63	3,01	3,31	3,54	4,70	4,51	4,67	4,81	4,92	5,02	5,21	5,27	5,27
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,15	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,40	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,11	0,16	0,20	0,22	0,24	0,25	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,33

## 12.2.7 Konfiguracija B, parameter: indeks vijaka CLT plošče

Tabela 99: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	B														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,45	1,58	2,79	3,23	3,26	3,28	3,35	3,34	3,35	3,36	3,36	3,37	3,38	3,38	3,38
u [mm]	7,15	10,31	13,76	14,68	14,40	14,21	13,49	13,59	13,50	13,43	13,38	13,33	13,25	13,23	13,23
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1933,5 8	2218,0 9	2353,5 0	2432,6 7	2484,6 3	2521,3 3	2666,3 4	2646,0 2	2663,5 0	2677,3 4	2688,5 7	2697,8 6	2715,3 4	2720,1 3	2720,1 3
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1704,9 8	1973,9 6	2111,2 2	2194,4 9	2250,3 8	2290,5 0	2454,2 0	2430,7 4	2450,9 0	2466,9 6	2480,0 5	2490,9 2	2511,4 7	2517,1 3	2517,1 3
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,08	8,15	10,24	11,76	12,90	13,80	18,32	17,58	18,22	18,75	19,20	19,58	20,33	20,54	20,54
$K_{CLT,ULS}$ [kN/m]	3,38	5,43	6,83	7,84	8,60	9,20	12,22	11,72	12,14	12,50	12,80	13,05	13,55	13,70	13,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,21	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42	0,49	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,15	0,22	0,26	0,29	0,31	0,32	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-1,69	-2,72	-3,82	-4,20	-4,20	-4,20	-4,21	-4,21	-4,21	-4,21	-4,21	-4,21	-4,21	-4,22	-4,22
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,55	0,51	0,49	0,39	0,30	0,24	0,01	0,04	0,01	-0,01	-0,03	-0,04	-0,07	-0,08	-0,08
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,02	0,04	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-1,73	-2,18	-2,69	-2,73	-2,59	-2,49	-2,11	-2,16	-2,12	-2,08	-2,05	-2,03	-1,99	-1,97	-1,97
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	3,02	4,66	6,44	7,01	6,97	6,94	6,84	6,86	6,84	6,83	6,83	6,82	6,81	6,80	6,80
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,25	0,42	0,60	0,67	0,67	0,68	0,69	0,69	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-0,61	-1,18	-1,78	-2,03	-2,08	-2,11	-2,24	-2,23	-2,24	-2,25	-2,26	-2,27	-2,29	-2,29	-2,29
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,12	0,19	0,26	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
$I_{z_{CLT,drig}}$	0,04	0,08	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
$I_{z_{les,zg}}$	0,28	0,40	0,53	0,57	0,55	0,55	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51
$I_{z_{les,sp}}$	0,41	0,65	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_{les,drig}}$	0,24	0,40	0,58	0,64	0,64	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,00	1,00	1,00	0,87	0,83	0,84	0,66	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77
JFM <sub>CLT</sub>	E	E	E	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 100: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS fin

Konfiguracija	B														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter															

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,65	1,82	3,08	3,14	3,17	3,19	3,28	3,27	3,28	3,28	3,29	3,30	3,31	3,31	3,31
u [mm]	12,89	18,03	23,71	23,05	22,59	22,27	21,02	21,20	21,05	20,93	20,84	20,76	20,61	20,57	20,57
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1197,7 1	1384,1 8	1477,3 4	1533,2 2	1570,4 6	1597,0 6	1704,4 7	1689,1 9	1702,3 3	1712,7 7	1721,2 3	1728,3 3	1741,6 4	1745,3 0	1745,3 0
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1056,3 4	1223,4 4	1312,7 0	1368,2 4	1406,1 3	1433,6 3	1548,5 9	1531,8 4	1546,2 3	1557,7 4	1567,1 6	1575,0 1	1589,8 9	1594,0 0	1594,0 0
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	2,59	4,16	5,23	6,00	6,58	7,04	9,35	8,97	9,29	9,57	9,79	9,99	10,37	10,48	10,48
$K_{CLT.ULS}$ [kN/m]	1,73	2,77	3,48	4,00	4,39	4,70	6,23	5,98	6,20	6,38	6,53	6,66	6,92	6,99	6,99
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,17	0,24	0,29	0,32	0,34	0,35	0,42	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,45	0,45
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,12	0,18	0,21	0,23	0,25	0,26	0,32	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,35	0,35	0,35
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]	-1,93	-3,01	-4,17	-4,19	-4,19	-4,19	-4,20	-4,20	-4,20	-4,20	-4,20	-4,21	-4,21	-4,21	-4,21
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	0,79	0,80	0,84	0,69	0,58	0,51	0,24	0,28	0,25	0,22	0,20	0,18	0,15	0,14	0,14
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]	0,02	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-2,25	-2,80	-3,44	-3,20	-3,04	-2,92	-2,49	-2,55	-2,49	-2,45	-2,42	-2,39	-2,34	-2,32	-2,32
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	3,53	5,29	7,19	7,14	7,09	7,06	6,94	6,96	6,95	6,93	6,93	6,92	6,90	6,90	6,90
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,29	0,46	0,65	0,65	0,66	0,66	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]	-0,61	-1,18	-1,78	-1,87	-1,92	-1,96	-2,11	-2,09	-2,11	-2,12	-2,14	-2,15	-2,16	-2,17	-2,17
$I_{z_{CLT.zg}}$	0,13	0,21	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
$I_{z_{CLT.strig}}$	0,04	0,08	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
$I_{z_{les.zg}}$	0,34	0,47	0,62	0,60	0,59	0,58	0,55	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
$I_{z_{les.sp}}$	0,47	0,72	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_{les.strig}}$	0,27	0,44	0,62	0,63	0,63	0,63	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
$I_{z_{screw.CL.T}}$	1,00	1,00	1,00	0,80	0,77	0,78	0,62	0,70	0,71	0,71	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73
$JFM_{CLT}$	E	E	E	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 101: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	B														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4,66	5,55	5,97	6,22	6,38	6,49	6,95	6,88	6,94	6,98	7,02	7,04	7,10	7,11	7,11
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1933,5 8	2218,0 9	2353,5 0	2432,6 7	2484,6 3	2521,3 3	2666,3 4	2646,0 2	2663,5 0	2677,3 4	2688,5 7	2697,8 6	2715,3 4	2720,1 3	2720,1 3
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1704,9 8	1973,9 6	2111,2 2	2194,4 9	2250,3 8	2290,5 0	2454,2 0	2430,7 4	2450,9 0	2466,9 6	2480,0 5	2490,9 2	2511,4 7	2517,1 3	2517,1 3
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	5,08	8,15	10,24	11,76	12,90	13,80	18,32	17,58	18,22	18,75	19,20	19,58	20,33	20,54	20,54
$K_{CLT.ULS}$ [kN/m]	3,38	5,43	6,83	7,84	8,60	9,20	12,22	11,72	12,14	12,50	12,80	13,05	13,55	13,70	13,70
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,21	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42	0,49	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,15	0,22	0,26	0,29	0,31	0,32	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42

Tabela 102: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	B														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,69	4,63	5,11	5,40	5,59	5,73	6,29	6,21	6,28	6,33	6,38	6,42	6,49	6,51	6,51

u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	958,4 3	1109,1 5	1185,5 8	1231,7 8	1262,7 2	1284,9 0	1375,1 1	1362,2 1	1373,3 0	1382,1 2	1389,3 1	1395,2 9	1406,5 7	1409,6 7	1409,6 7
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	846,1 3	979,06	1051,0 3	1096,1 6	1127,0 9	1149,6 2	1244,5 3	1230,6 3	1242,5 7	1252,1 4	1259,9 7	1266,5 1	1278,9 2	1282,3 4	1282,3 4
K <sub>CLT.SLS</sub> [kN/mm]	1,95	3,14	3,94	4,52	4,96	5,31	7,05	6,76	7,01	7,21	7,38	7,53	7,82	7,90	7,90
K <sub>CLT.ULS</sub> [kN/mm]	1,30	2,09	2,63	3,01	3,31	3,54	4,70	4,51	4,67	4,81	4,92	5,02	5,21	5,27	5,27
γ <sub>CLT.SLS</sub>	0,15	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,40	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42
γ <sub>CLT.ULS</sub>	0,11	0,16	0,20	0,22	0,24	0,25	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,33

## 12.2.8 Konfiguracija A2, parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika

Tabela 103: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS ini

Konfiguracija	A2											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
q <sub>max</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	4,19	4,74	5,16	5,37	5,44	5,57	5,64	5,71	5,85	5,99	6,13	6,27
u [mm]	11,68	12,34	12,75	12,93	12,81	12,64	12,53	12,46	12,32	12,20	12,09	11,95
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3953,77	4105,26	4245,87	4318,35	4396,87	4531,49	4614,67	4683,86	4820,74	4955,86	5089,45	5234,36
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3374,27	3515,96	3647,90	3716,24	3790,61	3918,04	3997,44	4063,34	4194,07	4323,54	4451,92	4591,89
K <sub>s.SLS</sub> [N/mm]	11,38	11,60	11,71	11,82	12,04	12,15	12,50	12,62	12,87	13,11	13,37	13,89
K <sub>s.ULS</sub> [N/mm]	7,59	7,73	7,80	7,88	8,03	8,10	8,34	8,41	8,58	8,74	8,91	9,26
γ <sub>s.SLS</sub>	0,58	0,59	0,59	0,59	0,60	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63
γ <sub>s.ULS</sub>	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53
K <sub>CLT.SLS</sub> [kN/mm]	13,80	13,87	13,90	13,94	14,00	14,03	14,13	14,16	14,22	14,29	14,35	14,47
K <sub>CLT.ULS</sub> [kN/mm]	9,20	9,25	9,27	9,29	9,33	9,36	9,42	9,44	9,48	9,52	9,57	9,65
γ <sub>CLT.SLS</sub>	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
γ <sub>CLT.ULS</sub>	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
σ <sub>CLT.zg.ULS</sub> [MPa]	-3,85	-4,12	-4,30	-4,38	-4,36	-4,34	-4,32	-4,31	-4,30	-4,28	-4,27	-4,25
σ <sub>CLT.sp.ULS</sub> [MPa]	-0,20	-0,26	-0,31	-0,33	-0,35	-0,38	-0,40	-0,42	-0,44	-0,46	-0,48	-0,51
τ <sub>max.CL.T.ULS</sub> [MPa]	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
σ <sub>tes.zg.ULS</sub> [MPa]	-2,83	-3,51	-4,17	-4,51	-4,75	-5,25	-5,48	-5,73	-6,22	-6,70	-7,19	-7,66
σ <sub>tes.sp.ULS</sub> [MPa]	4,92	5,85	6,70	7,13	7,39	7,94	8,18	8,45	8,97	9,49	10,00	10,47
τ <sub>max.les.ULS</sub> [MPa]	0,74	0,83	0,90	0,94	0,95	0,98	1,00	1,01	1,04	1,08	1,11	1,14
σ <sub>s.zg.ULS</sub> [MPa]	22,68	23,81	24,36	24,67	24,53	24,07	24,09	23,95	23,71	23,51	23,35	23,37
σ <sub>s.sp.ULS</sub> [MPa]	26,55	27,91	28,59	28,96	28,78	28,27	28,25	28,09	27,80	27,56	27,36	27,34
σ <sub>s.max.ULS</sub> [MPa]	63,13	66,37	68,01	68,87	68,46	67,24	67,18	66,79	66,11	65,54	65,07	65,00
F <sub>screw.CL.T.ULS</sub> [kN]	-2,16	-2,34	-2,46	-2,51	-2,51	-2,52	-2,52	-2,52	-2,53	-2,53	-2,53	-2,54
F <sub>con.s.ULS</sub> [kN]	5,08	5,33	5,46	5,53	5,50	5,40	5,40	5,37	5,31	5,27	5,23	5,23
F <sub>con.s.ULS.critic</sub> [kN]	0,53	0,55	0,56	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,55	0,54	0,54	0,54
I <sub>ZCLT.zg</sub>	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
I <sub>ZCLT.strig</sub>	0,15	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
I <sub>Zles.zg</sub>	0,45	0,48	0,49	0,47	0,45	0,45	0,41	0,38	0,35	0,33	0,31	0,29
I <sub>Zles.sp</sub>	0,66	0,67	0,68	0,65	0,61	0,60	0,55	0,51	0,46	0,42	0,39	0,37
I <sub>Zles.strig</sub>	0,71	0,75	0,73	0,69	0,64	0,64	0,58	0,55	0,50	0,46	0,47	0,49
I <sub>Zs</sub>	0,87	0,92	0,94	0,95	0,95	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90
I <sub>Zscrew.CL.T</sub>	0,86	0,93	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
I <sub>Zcon.s</sub>	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,92	0,89	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73
X <sub>con.s.ULS.critic</sub> [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
KO <sub>con.s.ULS.critic</sub>	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001

JFM <sub>CLT</sub>	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
JFM <sub>s,ST</sub>	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
JFM <sub>s,S</sub>	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	63,13	66,37	68,01	68,87	68,46	67,24	67,18	66,79	66,11	65,54	65,07	65,00
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	30,96	32,54	33,32	33,75	33,55	32,94	32,93	32,74	32,41	32,13	31,91	31,89
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	39,95	41,98	42,99	43,53	43,28	42,49	42,48	42,24	41,81	41,45	41,16	41,15
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	58,69	61,67	63,14	63,94	63,57	62,41	62,41	62,04	61,41	60,89	60,47	60,46
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	54,22	56,97	58,33	59,07	58,73	57,65	57,65	57,32	56,73	56,25	55,86	55,85

Tabela 104: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS fin

Konfiguracija	A2											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,53	3,98	4,32	4,54	4,67	4,88	4,93	5,01	5,18	5,35	5,50	5,61
u [mm]	15,70	16,51	16,97	17,35	17,41	17,43	17,24	17,21	17,13	17,05	16,96	16,72
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2661,78	2755,02	2841,12	2886,65	2937,67	3021,78	3077,77	3122,17	3210,44	3298,11	3385,24	3482,81
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2209,18	2297,95	2380,53	2424,13	2472,77	2553,94	2607,28	2650,11	2735,45	2820,39	2904,99	2999,39
$K_{s,SLS}$ [N/mm]	7,69	7,84	7,91	7,98	8,13	8,21	8,45	8,53	8,69	8,86	9,03	9,38
$K_{s,ULS}$ [N/mm]	5,13	5,22	5,27	5,32	5,42	5,47	5,63	5,69	5,80	5,91	6,02	6,25
$\gamma_{s,SLS}$	0,48	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53
$\gamma_{s,ULS}$	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	7,04	7,08	7,09	7,11	7,14	7,16	7,21	7,23	7,26	7,29	7,32	7,38
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	4,70	4,72	4,73	4,74	4,76	4,77	4,81	4,82	4,84	4,86	4,88	4,92
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-3,31	-3,50	-3,62	-3,72	-3,74	-3,77	-3,75	-3,75	-3,75	-3,75	-3,74	-3,71
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,01	-0,01	-0,04	-0,05	-0,06	-0,08	-0,10	-0,11	-0,13	-0,14	-0,16	-0,18
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,90	-3,55	-4,16	-4,52	-4,80	-5,34	-5,56	-5,82	-6,33	-6,83	-7,33	-7,75
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	4,14	4,92	5,63	6,04	6,35	6,94	7,14	7,41	7,95	8,46	8,97	9,38
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,65	0,72	0,78	0,82	0,84	0,88	0,90	0,91	0,95	0,99	1,02	1,05
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	22,01	23,12	23,66	24,21	24,47	24,46	24,54	24,55	24,58	24,61	24,64	24,73
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	27,22	28,60	29,29	29,97	30,25	30,25	30,26	30,26	30,26	30,27	30,27	30,28
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	65,08	68,38	70,05	71,66	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-1,76	-1,88	-1,95	-2,01	-2,03	-2,05	-2,05	-2,06	-2,07	-2,08	-2,08	-2,07
$F_{con,s,ULS}$ [kN]	5,08	5,33	5,46	5,59	5,64	5,64	5,65	5,65	5,65	5,66	5,66	5,67
$F_{con,s,ULS,critic}$ [kN]	0,53	0,55	0,56	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	0,59	0,59
$I_{z,CLT,zg}$	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
$I_{z,CLT,strig}$	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
$I_{z,les,zg}$	0,41	0,43	0,44	0,43	0,41	0,42	0,38	0,36	0,33	0,31	0,29	0,28
$I_{z,les,sp}$	0,53	0,54	0,55	0,53	0,51	0,51	0,46	0,43	0,39	0,37	0,34	0,32
$I_{z,les,strig}$	0,62	0,65	0,63	0,60	0,57	0,57	0,52	0,50	0,45	0,42	0,44	0,45
$I_{z_s}$	0,90	0,95	0,97	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z,screw,CLT}$	0,70	0,75	0,78	0,80	0,81	0,82	0,81	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
$I_{z,con,s}$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,93	0,91	0,88	0,85	0,82	0,79
$X_{con,s,ULS,critic}$ [m]	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
$KO_{con,s,ULS,critic}$	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
JFM <sub>CLT</sub>	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
JFM <sub>s,ST</sub>	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
JFM <sub>s,S</sub>	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E

$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	65,08	68,38	70,05	71,66	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	72,32
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	31,23	32,82	33,61	34,38	34,72	34,71	34,75	34,76	34,77	34,78	34,80	34,85
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	40,14	42,18	43,19	44,18	44,62	44,61	44,67	44,68	44,70	44,72	44,75	44,82
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	58,78	61,76	63,24	64,70	65,35	65,33	65,42	65,44	65,47	65,51	65,55	65,67
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	54,28	57,03	58,39	59,74	60,34	60,33	60,41	60,43	60,46	60,50	60,54	60,64

Tabela 105: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS ini

Konfiguracija	A2											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	10,92	11,39	11,82	12,04	12,28	12,70	12,95	13,16	13,58	14,00	14,41	14,84
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3953,77	4105,26	4245,87	4318,35	4396,87	4531,49	4614,67	4683,86	4820,74	4955,86	5089,45	5234,36
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3374,27	3515,96	3647,90	3716,24	3790,61	3918,04	3997,44	4063,34	4194,07	4323,54	4451,92	4591,89
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,60	11,71	11,82	12,04	12,15	12,50	12,62	12,87	13,11	13,37	13,89
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,73	7,80	7,88	8,03	8,10	8,34	8,41	8,58	8,74	8,91	9,26
$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,59	0,59	0,59	0,60	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,87	13,90	13,94	14,00	14,03	14,13	14,16	14,22	14,29	14,35	14,47
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,25	9,27	9,29	9,33	9,36	9,42	9,44	9,48	9,52	9,57	9,65
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Tabela 106: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS fin

Konfiguracija	A2											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	11,38	11,83	12,26	12,48	12,73	13,15	13,42	13,64	14,08	14,52	14,95	15,44
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2201,87	2276,86	2345,81	2382,68	2424,64	2492,46	2539,17	2575,39	2647,51	2719,29	2790,75	2871,95
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1807,38	1879,21	1945,89	1981,36	2021,33	2087,23	2131,52	2166,57	2236,49	2306,19	2375,70	2454,05
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	6,32	6,44	6,50	6,56	6,69	6,75	6,95	7,01	7,15	7,28	7,43	7,71
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	4,22	4,30	4,34	4,38	4,46	4,50	4,63	4,67	4,76	4,86	4,95	5,14
$\gamma_{s,SLS}$	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,48	0,49
$\gamma_{s,ULS}$	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,39
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,33	5,35	5,36	5,39	5,40	5,43	5,45	5,47	5,49	5,52	5,57
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,56	3,57	3,57	3,59	3,60	3,62	3,63	3,65	3,66	3,68	3,71
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26

## 12.2.9 Konfiguracija B, parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika

Tabela 107: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS ini

Konfiguracija	B											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini

$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,28	4,00	4,40	4,47	4,54	4,68	4,75	4,82	4,97	5,11	5,26	5,39
u [mm]	14,21	15,32	15,47	15,22	14,97	14,57	14,38	14,22	13,93	13,68	13,46	13,23
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2521,33	2720,89	2906,67	2996,49	3085,75	3253,59	3339,28	3420,04	3577,56	3730,43	3879,33	4028,68
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2290,50	2465,77	2629,74	2709,57	2789,46	2939,65	3017,36	3090,36	3233,41	3373,06	3509,84	3648,09
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,87	13,90	13,94	14,00	14,03	14,13	14,16	14,22	14,29	14,35	14,47
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,25	9,27	9,29	9,33	9,36	9,42	9,44	9,48	9,52	9,57	9,65
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]	-4,20	-4,64	-4,77	-4,74	-4,70	-4,64	-4,61	-4,59	-4,55	-4,51	-4,48	-4,45
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	0,24	0,16	0,07	0,03	-0,02	-0,08	-0,11	-0,14	-0,19	-0,23	-0,27	-0,31
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-2,49	-3,29	-3,95	-4,20	-4,44	-4,95	-5,18	-5,43	-5,92	-6,41	-6,90	-7,36
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	6,94	8,33	9,25	9,50	9,75	10,25	10,50	10,75	11,25	11,75	12,24	12,71
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,68	0,79	0,86	0,87	0,89	0,92	0,93	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]	-2,11	-2,39	-2,51	-2,51	-2,51	-2,52	-2,52	-2,52	-2,53	-2,53	-2,53	-2,54
$I_{Z_{CLT.zg}}$	0,29	0,32	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31
$I_{Z_{CLT.strig}}$	0,15	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$I_{Z_{les.zg}}$	0,55	0,59	0,60	0,56	0,52	0,51	0,47	0,44	0,40	0,37	0,35	0,33
$I_{Z_{les.sp}}$	1,00	1,00	0,99	0,92	0,86	0,82	0,74	0,68	0,60	0,55	0,51	0,47
$I_{Z_{les.strig}}$	0,65	0,72	0,70	0,65	0,60	0,60	0,54	0,51	0,47	0,43	0,44	0,46
$I_{Z_{screw.CL.T}}$	0,84	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 108: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS fin

Konfiguracija	B											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,19	3,87	4,33	4,84	4,93	5,12	5,20	5,29	5,46	5,64	5,82	5,98
u [mm]	22,27	23,93	24,48	25,95	25,61	25,02	24,71	24,46	24,03	23,65	23,31	22,95
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1597,05	1720,40	1835,57	1891,51	1947,37	2052,35	2106,46	2157,33	2256,85	2353,81	2448,62	2544,23
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1433,63	1541,69	1643,37	1693,15	1743,21	1837,51	1886,66	1932,84	2023,65	2112,70	2200,28	2289,16
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	7,69	7,84	7,91	7,98	8,13	8,21	8,45	8,53	8,69	8,86	9,03	9,38
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	5,13	5,22	5,27	5,32	5,42	5,47	5,63	5,69	5,80	5,91	6,02	6,25
$\gamma_{CLT.SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{CLT.ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]	-3,32	-3,59	-3,72	-3,96	-4,19	-4,27	-4,68	-4,77	-4,74	-4,71	-4,69	-4,67
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	0,23	0,19	0,15	0,13	0,11	0,08	0,06	0,04	0,00	-0,03	-0,06	-0,09
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-3,83	-4,87	-5,78	-6,56	-7,36	-8,37	-9,62	-10,27	-11,16	-12,04	-12,92	-13,75
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	7,31	8,70	9,80	10,87	11,95	13,08	14,83	15,59	16,49	17,38	18,26	19,10
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,64	0,74	0,82	0,90	0,98	1,06	1,19	1,25	1,30	1,36	1,42	1,47
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]	-1,65	-1,82	-1,90	-2,04	-2,18	-2,24	-2,47	-2,52	-2,53	-2,53	-2,53	-2,54
$I_{Z_{CLT.zg}}$	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,30	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$I_{Z_{CLT.strig}}$	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$I_{Z_{les.zg}}$	0,65	0,69	0,70	0,71	0,71	0,73	0,74	0,70	0,64	0,60	0,56	0,53
$I_{Z_{les.sp}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,85	0,78	0,72	0,68
$I_{Z_{les.strig}}$	0,61	0,67	0,66	0,66	0,66	0,69	0,69	0,68	0,62	0,58	0,61	0,63
$I_{Z_{screw.CL.T}}$	0,66	0,72	0,76	0,81	0,87	0,89	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 109: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS ini

Konfiguracija	B											
Parameter	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	6,49	7,11	7,69	7,96	8,23	8,75	9,01	9,26	9,74	10,21	10,67	11,12
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2521,33	2720,89	2906,67	2996,49	3085,75	3253,59	3339,28	3420,04	3577,56	3730,43	3879,33	4028,68
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2290,50	2465,77	2629,74	2709,57	2789,46	2939,65	3017,36	3090,36	3233,41	3373,06	3509,84	3648,09
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,87	13,90	13,94	14,00	14,03	14,13	14,16	14,22	14,29	14,35	14,47
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,25	9,27	9,29	9,33	9,36	9,42	9,44	9,48	9,52	9,57	9,65
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Tabela 110: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS fin

Konfiguracija	B											
Parameter	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,73	6,33	6,90	7,17	7,44	7,96	8,22	8,47	8,96	9,43	9,90	10,36
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1284,90	1383,48	1475,65	1520,49	1565,34	1649,64	1693,20	1734,14	1814,31	1892,53	1969,10	2046,45
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1149,62	1236,05	1317,55	1357,53	1397,78	1473,69	1513,32	1550,57	1623,91	1695,93	1766,84	1838,88
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,33	5,35	5,36	5,39	5,40	5,43	5,45	5,47	5,49	5,52	5,57
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,56	3,57	3,57	3,59	3,60	3,62	3,63	3,65	3,66	3,68	3,71
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26

## 12.2.10 Konfiguracija A2, parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona

Tabela 111: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona; ULS ini

Konfiguracija	A2				
Parameter	Odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona [cm]				
	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4,19	4,61	4,91	4,85	4,80
u [mm]	11,68	12,99	14,04	14,24	14,41
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3953,77	3836,07	3736,25	3650,53	3576,12
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3374,27	3264,76	3175,37	3101,01	3038,19
$K_{s.SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s.ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s.SLS}$	0,58	0,53	0,48	0,44	0,41
$\gamma_{s.ULS}$	0,48	0,43	0,38	0,35	0,32
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42

$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-3,85	-4,24	-4,54	-4,57	-4,60
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	-0,20	-0,18	-0,15	-0,12	-0,09
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,83	-3,06	-3,23	-3,21	-3,19
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	4,92	5,56	6,09	6,24	6,37
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,74	0,80	0,85	0,84	0,84
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	22,68	22,46	21,82	20,07	18,55
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	26,55	26,77	26,48	24,80	23,34
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	63,13	64,09	63,99	60,51	57,52
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-2,16	-2,36	-2,50	-2,50	-2,50
$F_{con,s,ULS}$ [kN]	5,08	5,08	4,98	4,63	4,32
$F_{con,s,ULS,critic}$ [kN]	0,53	0,70	1,55	2,55	3,72
$I_{Z_{CLT,zg}}$	0,27	0,30	0,32	0,32	0,32
$I_{Z_{CLT,strig}}$	0,15	0,17	0,18	0,18	0,18
$I_{Z_{les,zg}}$	0,45	0,50	0,54	0,55	0,56
$I_{Z_{les,sp}}$	0,66	0,76	0,83	0,86	0,88
$I_{Z_{les,strig}}$	0,71	0,77	0,81	0,81	0,80
$I_{Z_s}$	0,87	0,89	0,88	0,84	0,80
$I_{Z_{screw,CLT}}$	0,86	0,94	1,00	1,00	1,00
$I_{Z_{con,s}}$	1,00	1,00	0,98	0,91	0,85
$X_{con,s,ULS,critic}$ [m]	2,03	2,03	1,88	1,73	1,58
$KO_{con,s,ULS,critic}$	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E
$\sigma_{s,1001}$ [MPa]	63,13	64,09	63,99	60,51	57,52
$\sigma_{s,1002}$ [MPa]	30,96	31,25	31,20	29,59	28,30
$\sigma_{s,1003}$ [MPa]	39,95	40,16	39,49	36,69	34,21
$\sigma_{s,1004}$ [MPa]	58,69	59,24	59,68	57,36	55,78
$\sigma_{s,1005}$ [MPa]	54,22	54,34	52,92	48,53	44,49

Tabela 112: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona; ULS fin

Konfiguracija	A2				
Parameter	Odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona [cm]				
	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,53	3,94	4,34	4,74	5,14
$u$ [mm]	15,70	17,73	19,75	21,77	23,79
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2661,78	2560,22	2476,36	2405,95	2345,98
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2209,18	2120,83	2050,57	1993,37	1945,88
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
$\gamma_{s,SLS}$	0,48	0,43	0,39	0,35	0,32
$\gamma_{s,ULS}$	0,39	0,33	0,29	0,26	0,24
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-3,31	-3,69	-4,07	-4,45	-4,83



$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	0,01	0,06	0,11	0,15	0,20
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-2,90	-3,17	-3,43	-3,70	-3,96
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	4,14	4,78	5,42	6,07	6,71
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,65	0,71	0,77	0,83	0,89
$\sigma_{s.zg.ULS}$ [MPa]	22,01	21,67	21,34	21,00	20,67
$\sigma_{s.sp.ULS}$ [MPa]	27,22	27,55	27,89	28,22	28,56
$\sigma_{s.max.ULS}$ [MPa]	65,08	66,38	67,80	69,23	70,65
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]	-1,76	-1,93	-2,11	-2,29	-2,47
$F_{con.s.ULS}$ [kN]	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08
$F_{con.s.ULS.critic}$ [kN]	0,53	0,70	1,58	2,80	4,38
$I_{Z_{CLT.zg}}$	0,23	0,26	0,28	0,31	0,34
$I_{Z_{CLT.strig}}$	0,12	0,14	0,15	0,16	0,17
$I_{Z_{les.zg}}$	0,41	0,46	0,51	0,57	0,62
$I_{Z_{les.sp}}$	0,53	0,63	0,72	0,81	0,90
$I_{Z_{les.strig}}$	0,62	0,68	0,73	0,79	0,85
$I_{Z_s}$	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
$I_{Z_{screw.CL.T}}$	0,70	0,77	0,84	0,92	0,99
$I_{Z_{con.s}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$X_{con.s.ULS.critic}$ [m]	2,03	2,03	1,88	1,73	1,58
$KO_{con.s.ULS.critic}$	1001	1001	1001	1001	1001
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F
$JFM_{s,ST}$	E	E	E	E	E
$JFM_{s,S}$	E	E	E	E	E
$\sigma_{s.1001}$ [MPa]	65,08	66,38	67,80	69,23	70,65
$\sigma_{s.1002}$ [MPa]	31,23	31,57	32,15	32,86	33,68
$\sigma_{s.1003}$ [MPa]	40,14	40,38	40,49	40,53	40,50
$\sigma_{s.1004}$ [MPa]	58,78	59,34	60,95	63,06	65,70
$\sigma_{s.1005}$ [MPa]	54,28	54,42	54,01	53,33	52,38

Tabela 113: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona; SLS ini

Konfiguracija	A2				
Parameter	Odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona [cm]				
	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	10,92	10,55	10,24	9,97	9,74
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3953,77	3836,07	3736,25	3650,53	3576,12
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3374,27	3264,76	3175,37	3101,01	3038,19
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	11,38	11,38	11,38	11,38	11,38
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	7,59	7,59	7,59	7,59	7,59
$\gamma_{s,SLS}$	0,58	0,53	0,48	0,44	0,41
$\gamma_{s,ULS}$	0,48	0,43	0,38	0,35	0,32
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32

Tabela 114: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odklik točkovega stika steklo-les od sredine razpona; SLS fin

Konfiguracija	A2				
Parameter	Odklik točkovega stika steklo-les od sredine razpona [cm]				
	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	11,38	10,80	10,32	9,93	9,60
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2201,87	2108,81	2032,92	1969,84	1916,58
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1807,38	1728,70	1666,86	1616,97	1575,87
$K_{s,SLS}$ [kN/mm]	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
$K_{s,ULS}$ [kN/mm]	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22
$\gamma_{s,SLS}$	0,44	0,38	0,34	0,31	0,28
$\gamma_{s,ULS}$	0,34	0,29	0,26	0,23	0,20
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

## 12.2.11 Konfiguracija A1, parameter: indeks CLT plošče

Tabela 115: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A1							
Parameter	Indeks CLT plošče							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4,16	5,61	6,28	5,26	4,40	2,38	4,30	2,32
u [mm]	23,90	11,66	11,39	8,88	7,50	4,79	7,50	4,79
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1570,73	4753,02	5384,14	6103,52	6345,53	6707,31	6244,66	6615,91
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1570,73	4260,23	4833,55	5402,48	5603,59	5851,21	5502,72	5759,82
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]		13,80	14,53	13,99	12,83	8,70	12,83	8,70
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]		9,20	9,69	9,33	8,56	5,80	8,56	5,80
$\gamma_{CLT,SLS}$		0,42	0,43	0,33	0,31	0,18	0,31	0,18
$\gamma_{CLT,ULS}$		0,32	0,33	0,24	0,23	0,13	0,23	0,13
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]		-4,17	-4,87	-3,50	-3,13	-1,98	-3,13	-1,98
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]		-0,52	-0,12	0,66	0,78	1,01	0,78	1,01
$\tau_{\max,CLT,ULS}$ [MPa]		0,08	0,09	0,08	0,06	0,03	0,06	0,03
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-10,71	-3,46	-3,23	-2,38	-2,04	-1,42	-2,04	-1,42
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	5,16	4,27	4,33	3,51	2,94	1,76	2,94	1,76
$\tau_{\max,les,ULS}$ [MPa]	0,96	0,91	0,93	0,76	0,64	0,37	0,64	0,37
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	51,55	42,74	43,25	35,11	29,41	17,62	29,41	17,62
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	59,48	46,61	47,03	38,05	31,90	19,21	31,90	19,21
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	59,48	46,61	47,03	38,05	31,90	19,21	31,90	19,21
$F_{\text{screw},CLT,ULS}$ [kN]		-2,50	-2,66	-2,27	-1,88	-1,04	-1,88	-1,04
$I_{z,CLT,zg}$		0,29	0,34	0,24	0,21	0,13	0,21	0,13
$I_{z,CLT,strip}$		0,18	0,19	0,16	0,13	0,07	0,13	0,07
$I_{z,les,zg}$	1,00	0,45	0,44	0,34	0,29	0,18	0,29	0,18
$I_{z,les,sp}$	0,92	0,53	0,55	0,46	0,38	0,22	0,38	0,22

$I_{z_{les, strig}}$	0,92	0,87	0,89	0,73	0,61	0,36	0,61	0,36
$I_{z_s}$	0,82	0,64	0,65	0,53	0,44	0,27	0,44	0,27
$I_{z_{screw, CLT}}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$		F	F	F	F	E	F	E

Tabela 116: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A1							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4,57	6,41	7,09	5,97	5,03	2,89	4,92	2,82
$u$ [mm]	33,35	18,28	17,83	14,09	12,01	7,99	12,01	7,99
$(EI)_{eff, SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1215,04	3438,91	3871,83	4331,59	4466,20	4591,06	4398,04	4529,31
$(EI)_{eff, ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1215,04	3031,35	3415,19	3765,30	3877,88	3967,05	3809,72	3905,29
$\gamma_{s, SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s, ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT, SLS}$ [kN/mm]		7,04	7,42	7,14	6,55	4,44	6,55	4,44
$K_{CLT, ULS}$ [kN/mm]		4,70	4,94	4,76	4,37	2,96	4,37	2,96
$\gamma_{CLT, SLS}$		0,35	0,36	0,27	0,25	0,15	0,25	0,15
$\gamma_{CLT, ULS}$		0,26	0,27	0,20	0,18	0,10	0,18	0,10
$\sigma_{CLT, zg, ULS}$ [MPa]		-4,28	-5,00	-3,65	-3,29	-2,17	-3,29	-2,17
$\sigma_{CLT, sp, ULS}$ [MPa]		-0,41	0,02	0,82	0,94	1,20	0,94	1,20
$\tau_{max, CLT, ULS}$ [MPa]		0,08	0,09	0,08	0,06	0,03	0,06	0,03
$\sigma_{les, zg, ULS}$ [MPa]	-10,82	-4,41	-4,17	-3,19	-2,76	-1,96	-2,76	-1,96
$\sigma_{les, sp, ULS}$ [MPa]	4,14	3,79	3,82	3,12	2,63	1,62	2,63	1,62
$\tau_{max, les, ULS}$ [MPa]	1,04	1,02	1,03	0,85	0,71	0,43	0,71	0,43
$\sigma_{s, zg, ULS}$ [MPa]	61,25	56,01	56,58	46,24	38,95	23,97	38,95	23,97
$\sigma_{s, sp, ULS}$ [MPa]	72,32	62,08	62,50	50,91	42,93	26,62	42,93	26,62
$\sigma_{s, max, ULS}$ [MPa]	72,32	62,08	62,50	50,91	42,93	26,62	42,93	26,62
$F_{screw, CLT, ULS}$ [kN]		-2,50	-2,66	-2,27	-1,88	-1,04	-1,88	-1,04
$I_{z_{CLT, zg}}$		0,30	0,35	0,25	0,23	0,15	0,23	0,15
$I_{z_{CLT, strig}}$		0,18	0,19	0,16	0,13	0,07	0,13	0,07
$I_{z_{les, zg}}$	0,98	0,48	0,46	0,37	0,31	0,21	0,31	0,21
$I_{z_{les, sp}}$	0,87	0,48	0,46	0,37	0,31	0,21	0,31	0,21
$I_{z_{les, strig}}$	0,99	0,97	0,99	0,81	0,68	0,41	0,68	0,41
$I_{z_s}$	1,00	0,86	0,86	0,70	0,59	0,37	0,59	0,37
$I_{z_{screw, CLT}}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$		F	F	F	F	E	F	E

Tabela 117: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; ULS fin

Konfiguracija	A1							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,73	13,42	15,30	17,51	18,22	19,26	17,90	18,98
$u$ [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff, SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1570,73	4753,02	5384,14	6103,52	6345,53	6707,31	6244,66	6615,91
$(EI)_{eff, ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1570,73	4260,23	4833,55	5402,48	5603,59	5851,21	5502,72	5759,82
$\gamma_{s, SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s, ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]		13,80	14,53	13,99	12,83	8,70	12,83	8,70
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]		9,20	9,69	9,33	8,56	5,80	8,56	5,80
$\gamma_{CLT.SLS}$		0,42	0,43	0,33	0,31	0,18	0,31	0,18
$\gamma_{CLT.ULS}$		0,32	0,33	0,24	0,23	0,13	0,23	0,13

Tabela 118: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	A1							
	Indeks CLT plošče							
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	4,70	16,10	18,22	20,50	21,07	21,31	20,72	21,00
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1065,60	2958,22	3320,64	3697,44	3798,51	3860,64	3742,47	3809,86
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1065,60	2591,92	2910,14	3192,58	3277,69	3324,28	3221,65	3273,50
$\gamma_{s.SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s.ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]		5,31	5,59	5,38	4,94	3,35	4,94	3,35
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]		3,54	3,73	3,59	3,29	2,23	3,29	2,23
$\gamma_{CLT.SLS}$		0,33	0,34	0,25	0,23	0,13	0,23	0,13
$\gamma_{CLT.ULS}$		0,25	0,26	0,18	0,17	0,09	0,17	0,09

## 12.2.12 Konfiguracija A1, parameter: razmik med vijaki CLT plošče

Tabela 119: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A1											
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]											
Parameter	7,2	9,2	13,2	17,2	21,2	25,2	29,2	33,2	37,2	41,2	45,2	49,2
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	6,72	6,09	4,28	3,31	2,70	2,29	1,99	1,76	1,58	1,44	1,32	1,22
u [mm]	12,38	12,18	10,22	9,17	8,52	8,08	7,75	7,51	7,32	7,16	7,03	6,93
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	5123,47	4850,32	4417,91	4091,03	3835,24	3629,63	3460,76	3319,58	3199,79	3096,89	3007,52	2929,20
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4661,62	4363,21	3918,19	3602,22	3366,28	3183,37	3037,43	2918,28	2819,15	2735,40	2663,70	2601,63
$\gamma_{s.SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s.ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,50	0,44	0,35	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,40	0,34	0,27	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,10	0,09
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]	-4,82	-4,46	-3,38	-2,80	-2,44	-2,19	-2,02	-1,88	-1,78	-1,69	-1,62	-1,56
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	-0,95	-0,65	-0,18	0,07	0,23	0,33	0,41	0,47	0,51	0,55	0,58	0,61
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]	0,10	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-3,38	-3,54	-3,25	-3,09	-2,99	-2,92	-2,87	-2,83	-2,80	-2,78	-2,76	-2,75
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	4,83	4,54	3,54	3,00	2,67	2,44	2,28	2,15	2,05	1,97	1,91	1,85
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	1,05	0,97	0,74	0,61	0,54	0,49	0,45	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36
$\sigma_{s.zg.ULS}$ [MPa]	48,34	45,39	35,37	30,01	26,68	24,40	22,75	21,49	20,51	19,72	19,06	18,52
$\sigma_{s.sp.ULS}$ [MPa]	52,45	49,43	38,76	33,06	29,51	27,08	25,32	23,99	22,94	22,09	21,40	20,81
$\sigma_{s.max.ULS}$ [MPa]	52,45	49,43	38,76	33,06	29,51	27,08	25,32	23,99	22,94	22,09	21,40	20,81
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]	-2,22	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50
$I_{z_{CLT.zg}}$	0,34	0,31	0,24	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
$I_{z_{CLT.strig}}$	0,22	0,19	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04

$I_{z_{les.zg}}$	0,48	0,47	0,39	0,35	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27
$I_{z_{les.sp}}$	0,62	0,57	0,42	0,35	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27
$I_{z_{les.strig}}$	1,00	0,92	0,70	0,59	0,52	0,47	0,43	0,41	0,39	0,37	0,36	0,34
$I_{z_s}$	0,73	0,68	0,54	0,46	0,41	0,37	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29
$I_{z_{screw.CLT}}$	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 120: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS fin

Konfiguracija	A1											
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]											
Parameter	7,2	9,2	13,2	17,2	21,2	25,2	29,2	33,2	37,2	41,2	45,2	49,2
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	6,75	6,67	5,02	4,01	3,38	2,95	2,64	2,40	2,21	2,07	1,94	1,84
u [mm]	17,22	18,40	16,41	15,06	14,22	13,64	13,22	12,91	12,66	12,46	12,29	12,15
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3765,58	3522,95	3158,58	2897,99	2702,37	2550,11	2428,24	2328,48	2245,32	2174,94	2114,59	2062,27
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3361,07	3114,11	2765,03	2530,14	2361,27	2234,03	2134,71	2055,02	1989,68	1935,12	1888,88	1849,20
$\gamma_{s.SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s.ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,43	0,37	0,29	0,24	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,33	0,28	0,21	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]	-4,46	-4,42	-3,51	-2,96	-2,61	-2,37	-2,20	-2,07	-1,97	-1,89	-1,82	-1,76
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	-0,82	-0,53	-0,04	0,23	0,40	0,51	0,59	0,66	0,71	0,75	0,78	0,81
$\tau_{max.CLT.ULS}$ [MPa]	0,09	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-3,88	-4,37	-4,17	-4,00	-3,90	-3,82	-3,77	-3,73	-3,70	-3,67	-3,65	-3,63
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	3,84	3,89	3,19	2,75	2,48	2,29	2,16	2,06	1,98	1,91	1,86	1,82
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	1,05	1,05	0,84	0,72	0,65	0,59	0,56	0,53	0,51	0,49	0,48	0,46
$\sigma_{s.zg.ULS}$ [MPa]	56,87	57,50	47,15	40,71	36,70	33,96	31,97	30,46	29,28	28,32	27,54	26,88
$\sigma_{s.sp.ULS}$ [MPa]	62,58	63,61	52,60	45,70	41,41	38,48	36,36	34,74	33,48	32,46	31,62	30,91
$\sigma_{s,max.ULS}$ [MPa]	62,58	63,61	52,60	45,70	41,41	38,48	36,36	34,74	33,48	32,46	31,62	30,91
$F_{screw.CLT.ULS}$ [kN]	-2,03	-2,43	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50
$I_{z_{CLT.zg}}$	0,31	0,31	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12
$I_{z_{CLT.strig}}$	0,20	0,19	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
$I_{z_{les.zg}}$	0,45	0,48	0,43	0,40	0,38	0,36	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32
$I_{z_{les.sp}}$	0,45	0,48	0,43	0,39	0,37	0,35	0,34	0,34	0,33	0,32	0,32	0,32
$I_{z_{les.strig}}$	1,00	1,00	0,81	0,69	0,62	0,57	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45	0,44
$I_{z_s}$	0,87	0,88	0,73	0,63	0,57	0,53	0,50	0,48	0,46	0,45	0,44	0,43
$I_{z_{screw.CLT}}$	0,81	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 121: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	A1											
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]											
Parameter	7,2	9,2	13,2	17,2	21,2	25,2	29,2	33,2	37,2	41,2	45,2	49,2
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	14,57	13,72	12,37	11,35	10,55	9,91	9,38	8,94	8,57	8,25	7,97	7,72
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	5123,47	4850,32	4417,91	4091,03	3835,24	3629,63	3460,76	3319,58	3199,79	3096,89	3007,52	2929,20
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4661,62	4363,21	3918,19	3602,22	3366,28	3183,37	3037,43	2918,28	2819,15	2735,40	2663,70	2601,63

$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,50	0,44	0,35	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,40	0,34	0,27	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,10	0,09

Tabela 122: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	A1											
	Razmik med vijaki CLT plošče [cm]											
Parameter	7,2	9,2	13,2	17,2	21,2	25,2	29,2	33,2	37,2	41,2	45,2	49,2
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	17,98	16,58	14,52	13,08	12,01	11,19	10,54	10,01	9,57	9,20	8,88	8,61
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3258,82	3034,95	2705,25	2474,12	2303,11	2171,45	2066,97	1982,04	1911,64	1852,34	1801,70	1757,95
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2887,52	2665,53	2357,66	2154,27	2009,90	1902,11	1818,56	1751,90	1697,48	1652,21	1613,96	1581,22
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,41	0,35	0,27	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,31	0,26	0,20	0,16	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06

## 12.2.13 Konfiguracija A1, parameter: strižni modul adheziva

Tabela 123: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; ULS ini

Konfiguracija	A1						
	Strižni modul adheziva [MPa]						
Parameter	2,82E-08	2,82E-06	2,82E-04	2,82E-02	2,82E+00	2,82E+02	2,82E+03
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,24	3,24	3,25	3,80	5,52	5,61	5,61
u [mm]	14,21	14,21	14,22	14,72	11,97	11,66	11,66
(EI) <sub>eff,SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2522,27	2522,29	2524,64	2737,00	4561,74	4751,14	4753,02
(EI) <sub>eff,ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2291,43	2291,45	2293,58	2484,99	4094,98	4258,61	4260,23
$\gamma_{s,SLS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-4,20	-4,20	-4,21	-4,44	-4,22	-4,17	-4,17
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,24	0,24	0,24	0,16	-0,47	-0,52	-0,52
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,49	-2,49	-2,49	-2,75	-3,43	-3,46	-3,46
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	6,94	6,94	6,95	7,02	4,51	4,28	4,27
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,68	0,68	0,68	0,74	0,90	0,91	0,91
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	-2,36	-2,36	-2,30	3,10	40,03	42,72	42,74
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	2,36	2,36	2,42	7,99	44,00	46,59	46,61
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	2,36	2,36	2,42	7,99	44,00	46,59	46,61
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-2,11	-2,11	-2,11	-2,28	-2,50	-2,50	-2,50

$I_{z_{CLT,zg}}$	0,29	0,29	0,29	0,31	0,30	0,29	0,29
$I_{z_{CLT, strig}}$	0,15	0,15	0,15	0,16	0,18	0,18	0,18
$I_{z_{les,zg}}$	0,55	0,55	0,55	0,57	0,46	0,45	0,45
$I_{z_{les,sp}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,57	0,53	0,53
$I_{z_{les, strig}}$	0,65	0,65	0,65	0,71	0,86	0,87	0,87
$I_{z_s}$	0,03	0,03	0,03	0,11	0,61	0,64	0,64
$I_{z_{screw,CLT}}$	0,84	0,84	0,84	0,91	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 124: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; ULS fin

Konfiguracija	A1						
	Strižni modul adheziva [MPa]						
Parameter	2,82E-08	2,82E-06	2,82E-04	2,82E-02	2,82E+00	2,82E+02	2,82E+03
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,15	3,15	3,16	3,99	6,31	6,41	6,41
$u$ [mm]	22,27	22,27	22,28	23,57	18,77	18,28	18,28
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1597,99	1598,01	1600,20	1795,94	3297,96	3437,54	3438,91
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1434,56	1434,58	1436,54	1611,22	2912,64	3030,19	3031,35
$\gamma_{s,SLS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-4,19	-4,19	-4,20	-4,56	-4,33	-4,28	-4,28
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,51	0,51	0,51	0,43	-0,36	-0,41	-0,41
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,92	-2,92	-2,93	-3,38	-4,38	-4,41	-4,41
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	7,06	7,06	7,06	7,19	4,04	3,79	3,79
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,66	0,66	0,66	0,76	1,00	1,02	1,02
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	-3,70	-3,69	-3,61	4,51	53,03	55,99	56,01
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	3,70	3,70	3,79	12,34	59,26	62,05	62,08
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	3,70	3,70	3,79	12,34	59,26	62,05	62,08
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-1,96	-1,96	-1,96	-2,20	-2,50	-2,50	-2,50
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,29	0,29	0,29	0,32	0,30	0,30	0,30
$I_{z_{CLT, strig}}$	0,14	0,14	0,14	0,16	0,18	0,18	0,18
$I_{z_{les,zg}}$	0,58	0,58	0,58	0,61	0,49	0,48	0,48
$I_{z_{les,sp}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,49	0,48	0,48
$I_{z_{les, strig}}$	0,63	0,63	0,63	0,73	0,96	0,97	0,97
$I_{z_s}$	0,05	0,05	0,05	0,17	0,82	0,86	0,86
$I_{z_{screw,CLT}}$	0,78	0,78	0,79	0,88	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 125: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; SLS ini

Konfiguracija	A1						
	Strižni modul adheziva [MPa]						
Parameter	2,82E-08	2,82E-06	2,82E-04	2,82E-02	2,82E+00	2,82E+02	2,82E+03
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	6,45	6,45	6,46	7,12	12,82	13,41	13,42
$u$ [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00

$(EI)_{\text{eff.SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2522,27	2522,29	2524,64	2737,00	4561,74	4751,14	4753,02
$(EI)_{\text{eff.ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2291,43	2291,45	2293,58	2484,99	4094,98	4258,61	4260,23
$\gamma_{s,SLS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$K_{\text{CLT.SLS}}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{\text{CLT.ULS}}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{\text{CLT.SLS}}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{\text{CLT.ULS}}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32

Tabela 126: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; SLS fin

Konfiguracija	A1						
	Strižni modul adheziva [MPa]						
Parameter	2,82E-08	2,82E-06	0,000282	0,028214	2,821429	282,1429	2821,429
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\text{max}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,66	5,66	5,67	6,86	15,35	16,09	16,10
$u$ [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{\text{eff.SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1285,83	1285,85	1288,00	1477,78	2838,58	2957,06	2958,22
$(EI)_{\text{eff.ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1150,56	1150,58	1152,49	1321,37	2492,23	2590,96	2591,92
$\gamma_{s,SLS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	0,00	0,00	0,00	0,08	0,89	1,00	1,00
$K_{\text{CLT.SLS}}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{\text{CLT.ULS}}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
$\gamma_{\text{CLT.SLS}}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\gamma_{\text{CLT.ULS}}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

### 12.2.14 Konfiguracija A1, parameter: indeks vijaka CLT plošče

Tabela 127: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A1														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{\text{max}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,98	2,42	3,96	5,38	5,71	5,61	6,72	6,57	6,52	6,49	6,46	6,44	6,39	6,38	6,38
$u$ [mm]	5,24	7,36	9,70	11,82	12,06	11,66	12,51	12,41	12,23	12,08	11,96	11,87	11,69	11,64	11,64
$(EI)_{\text{eff.SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3541,5 9	4110,3 1	4392,4 4	4561,0 2	4673,1 0	4753,0 2	5074,7 1	5029,0 4	5068,3 0	5099,4 8	5124,8 6	5145,9 1	5185,6 0	5196,5 0	5196,5 0
$(EI)_{\text{eff.ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3106,8 2	3620,4 0	3892,9 6	4061,9 2	4176,9 1	4260,2 3	4607,3 1	4556,8 6	4600,2 0	4634,8 5	4663,1 8	4686,7 7	4731,5 0	4743,8 4	4743,8 4
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{\text{CLT.SLS}}$ [kN/mm]	5,08	8,15	10,24	11,76	12,90	13,80	18,32	17,58	18,22	18,75	19,20	19,58	20,33	20,54	20,54
$K_{\text{CLT.ULS}}$ [kN/m m]	3,38	5,43	6,83	7,84	8,60	9,20	12,22	11,72	12,14	12,50	12,80	13,05	13,55	13,70	13,70
$\gamma_{\text{CLT.SLS}}$	0,21	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42	0,49	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52
$\gamma_{\text{CLT.ULS}}$	0,15	0,22	0,26	0,29	0,31	0,32	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42
$\sigma_{\text{CLT.zg.ULS}}$ [MPa]	-1,39	-2,26	-3,19	-4,04	-4,23	-4,17	-4,82	-4,73	-4,70	-4,68	-4,66	-4,65	-4,62	-4,61	-4,61
$\sigma_{\text{CLT.sp.ULS}}$ [MPa]	0,25	0,05	-0,15	-0,34	-0,46	-0,52	-0,91	-0,85	-0,88	-0,90	-0,92	-0,94	-0,96	-0,97	-0,97
$\tau_{\text{max.CLT.ULS}}$ [MPa]	0,02	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$\sigma_{\text{les.zg.ULS}}$ [MPa]	-1,92	-2,47	-3,10	-3,65	-3,64	-3,46	-3,46	-3,47	-3,38	-3,32	-3,27	-3,22	-3,14	-3,12	-3,12
$\sigma_{\text{les.sp.ULS}}$ [MPa]	1,56	2,42	3,34	4,19	4,36	4,27	4,85	4,77	4,73	4,70	4,67	4,65	4,62	4,61	4,61



$\tau_{\max,les,ULS}$ [MPa]	0,31	0,50	0,70	0,88	0,92	0,91	1,05	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	15,59	24,17	33,44	41,91	43,60	42,74	48,48	47,72	47,31	47,00	46,74	46,54	46,15	46,05	46,05
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	17,33	26,62	36,66	45,84	47,61	46,61	52,63	51,84	51,37	51,00	50,71	50,47	50,03	49,91	49,91
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	17,33	26,62	36,66	45,84	47,61	46,61	52,63	51,84	51,37	51,00	50,71	50,47	50,03	49,91	49,91
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-0,61	-1,18	-1,78	-2,34	-2,50	-2,50	-3,06	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,10	0,16	0,22	0,28	0,30	0,29	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$I_{z_{CLT,drig}}$	0,04	0,08	0,13	0,17	0,18	0,18	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
$I_{z_{les,zg}}$	0,20	0,28	0,37	0,46	0,46	0,45	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,45
$I_{z_{les,sp}}$	0,20	0,28	0,40	0,51	0,54	0,53	0,62	0,61	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
$I_{z_{les,drig}}$	0,30	0,47	0,66	0,84	0,88	0,87	1,00	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96
$I_{z_s}$	0,24	0,37	0,51	0,63	0,66	0,64	0,73	0,72	0,71	0,71	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	E	E	E	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 128: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini

Konfiguracija	A1														
	Indeks vijaka CLT plošče														
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,41	2,98	4,67	6,21	6,54	6,41	6,74	6,73	6,74	6,74	6,75	6,76	6,77	6,77	6,77
$u$ [mm]	8,90	12,07	15,61	18,79	19,01	18,28	17,43	17,63	17,46	17,32	17,21	17,12	16,95	16,91	16,91
$(EI)_{\text{eff,SLS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2486,2 2	2913,0 2	3137,8 3	3276,6 0	3370,7 9	3438,9 1	3721,5 1	3680,5 6	3715,7 5	3743,8 6	3766,8 3	3785,9 6	3822,1 9	3832,1 7	3832,1 7
$(EI)_{\text{eff,ULS}}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2181,6 9	2543,3 7	2745,9 0	2875,3 7	2965,2 7	3031,3 5	3315,3 1	3273,1 4	3309,3 5	3338,4 7	3362,3 9	3382,3 9	3420,4 8	3431,0 4	3431,0 4
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	2,59	4,16	5,23	6,00	6,58	7,04	9,35	8,97	9,29	9,57	9,79	9,99	10,37	10,48	10,48
$K_{CLT,ULS}$ [kN/m]	1,73	2,77	3,48	4,00	4,39	4,70	6,23	5,98	6,20	6,38	6,53	6,66	6,92	6,99	6,99
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,17	0,24	0,29	0,32	0,34	0,35	0,42	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,45	0,45
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,12	0,18	0,21	0,23	0,25	0,26	0,32	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,35	0,35	0,35
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-1,51	-2,38	-3,32	-4,18	-4,36	-4,28	-4,45	-4,45	-4,45	-4,46	-4,46	-4,46	-4,47	-4,47	-4,47
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	0,37	0,17	-0,02	-0,20	-0,34	-0,41	-0,77	-0,72	-0,76	-0,79	-0,82	-0,84	-0,88	-0,89	-0,89
$\tau_{\max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,02	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-2,52	-3,20	-3,98	-4,68	-4,65	-4,41	-3,97	-4,05	-3,98	-3,92	-3,88	-3,84	-3,77	-3,75	-3,75
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	1,47	2,21	3,02	3,75	3,88	3,79	3,85	3,86	3,85	3,85	3,84	3,84	3,83	3,83	3,83
$\tau_{\max,les,ULS}$ [MPa]	0,38	0,58	0,80	1,00	1,04	1,02	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	21,81	32,75	44,63	55,46	57,37	56,01	56,99	57,10	57,00	56,93	56,87	56,82	56,72	56,69	56,69
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	24,76	36,76	49,81	61,69	63,68	62,08	62,77	62,95	62,80	62,68	62,58	62,50	62,34	62,30	62,30
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	24,76	36,76	49,81	61,69	63,68	62,08	62,77	62,95	62,80	62,68	62,58	62,50	62,34	62,30	62,30
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-0,61	-1,18	-1,78	-2,34	-2,50	-2,50	-2,78	-2,76	-2,78	-2,80	-2,82	-2,83	-2,85	-2,86	-2,86
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,10	0,17	0,23	0,29	0,31	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32
$I_{z_{CLT,drig}}$	0,04	0,08	0,13	0,17	0,18	0,18	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$I_{z_{les,zg}}$	0,23	0,32	0,41	0,49	0,50	0,48	0,45	0,46	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44
$I_{z_{les,sp}}$	0,23	0,31	0,41	0,49	0,49	0,48	0,45	0,46	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
$I_{z_{les,drig}}$	0,36	0,56	0,76	0,95	0,99	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_s}$	0,34	0,51	0,69	0,85	0,88	0,86	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86
$I_{z_{screw,CLT}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,82	0,93	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96
$JFM_{CLT}$	E	E	E	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 129: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS ini

Konfiguracija	A1														
Parameter	Indeks vijaka CLT plošče														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	9,63	11,41	12,29	12,82	13,17	13,42	14,42	14,28	14,40	14,50	14,58	14,64	14,77	14,80	14,80
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3541,59	4110,31	4392,44	4561,02	4673,10	4753,02	5074,71	5029,04	5068,30	5099,48	5124,86	5145,91	5185,60	5196,50	5196,50
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3106,82	3620,40	3892,96	4061,92	4176,91	4260,23	4607,31	4607,36	4556,86	4600,20	4634,85	4663,18	4686,77	4731,50	4743,84
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	5,08	8,15	10,24	11,76	12,90	13,80	18,32	17,58	18,22	18,75	19,20	19,58	20,33	20,54	20,54
$K_{CLT.ULS}$ [kN/m]	3,38	5,43	6,83	7,84	8,60	9,20	12,22	11,72	12,14	12,50	12,80	13,05	13,55	13,70	13,70
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,21	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42	0,49	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,15	0,22	0,26	0,29	0,31	0,32	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42

Tabela 130: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS fin

Konfiguracija	A1														
Parameter	Indeks vijaka CLT plošče														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	10,85	13,16	14,40	15,18	15,71	16,10	17,72	17,48	17,69	17,85	17,98	18,09	18,31	18,36	18,36
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2116,58	2487,35	2686,70	2811,20	2896,33	2958,22	3217,90	3179,97	3212,56	3238,64	3259,99	3277,79	3311,56	3320,89	3320,89
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	1858,01	2165,66	2340,98	2454,24	2533,43	2591,92	2846,12	2808,08	2840,74	2867,06	2888,71	2906,84	2941,45	2951,05	2951,05
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	1,95	3,14	3,94	4,52	4,96	5,31	7,05	6,76	7,01	7,21	7,38	7,53	7,82	7,90	7,90
$K_{CLT.ULS}$ [kN/m]	1,30	2,09	2,63	3,01	3,31	3,54	4,70	4,51	4,67	4,81	4,92	5,02	5,21	5,27	5,27
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,15	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,40	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,11	0,16	0,20	0,22	0,24	0,25	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,33

## 12.2.15 Konfiguracija A1, parameter: debelina steklenega traku

Tabela 131: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; ULS ini

Konfiguracija	A1												
Parameter	Debelina steklenega traku [mm]												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,28	4,56	4,91	5,19	5,42	5,61	5,78	5,94	6,07	6,20	6,31	6,42	
u [mm]	14,21	15,21	13,99	13,04	12,28	11,66	11,14	10,69	10,31	9,98	9,68	9,42	
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2521,33	3037,87	3513,69	3954,96	4366,70	4753,02	5117,38	5462,63	5791,21	6105,18	6406,32	6696,14	
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2290,50	2753,26	3175,60	3564,18	3924,29	4260,23	4575,51	4873,03	5155,19	5424,04	5681,30	5928,43	
$\gamma_{s,SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
$\gamma_{s,ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]	-4,20	-4,73	-4,53	-4,39	-4,27	-4,17	-4,09	-4,02	-3,96	-3,91	-3,86	-3,82
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	0,24	0,03	-0,16	-0,31	-0,42	-0,52	-0,60	-0,67	-0,73	-0,79	-0,83	-0,87
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-2,49	-3,11	-3,23	-3,33	-3,40	-3,46	-3,52	-3,56	-3,60	-3,63	-3,66	-3,69
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	6,94	6,98	6,05	5,33	4,75	4,27	3,88	3,54	3,25	2,99	2,77	2,57
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,68	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99
$\sigma_{s.zg.ULS}$ [MPa]		69,83	60,52	53,29	47,50	42,74	38,76	35,38	32,45	29,90	27,65	25,65
$\sigma_{s.sp.ULS}$ [MPa]		70,84	62,38	55,89	50,76	46,61	43,20	40,35	37,93	35,86	34,08	32,53
$\sigma_{s.max.ULS}$ [MPa]		70,84	62,38	55,89	50,76	46,61	43,20	40,35	37,93	35,86	34,08	32,53
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]	-2,11	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50
$I_{Z_{CLT.zg}}$	0,29	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27
$I_{Z_{CLT.strig}}$	0,15	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$I_{Z_{les.zg}}$	0,55	0,59	0,54	0,50	0,47	0,45	0,43	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37
$I_{Z_{les.sp}}$	1,00	0,98	0,83	0,71	0,61	0,53	0,47	0,41	0,40	0,38	0,37	0,36
$I_{Z_{les.strig}}$	0,65	0,79	0,81	0,83	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93	0,95
$I_{Z_s}$		0,98	0,86	0,77	0,70	0,64	0,60	0,56	0,52	0,50	0,47	0,45
$I_{Z_{screw.CL.T}}$	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 132: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; ULS fin

Konfiguracija	A1											
	Debelina steklenega traku [mm]											
Parameter	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	3,19	3,03	4,23	5,40	6,18	6,41	6,60	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66
u [mm]	22,27	16,71	17,96	19,13	19,30	18,28	17,45	16,56	15,71	15,00	14,38	13,84
$(EI)_{eff.SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1597,05	2063,49	2469,34	2827,82	3148,59	3438,91	3704,34	3949,20	4176,92	4390,24	4591,38	4782,19
$(EI)_{eff.ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1433,63	1846,50	2200,78	2510,23	2784,69	3031,35	3255,60	3461,60	3652,55	3831,02	3999,04	4158,28
$\gamma_{s.SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s.ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT.SLS}$ [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
$K_{CLT.ULS}$ [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{CLT.SLS}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$\gamma_{CLT.ULS}$	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
$\sigma_{CLT.zg.ULS}$ [MPa]	-4,19	-3,35	-3,78	-4,20	-4,39	-4,28	-4,19	-4,07	-3,94	-3,82	-3,73	-3,64
$\sigma_{CLT.sp.ULS}$ [MPa]	0,51	0,18	0,01	-0,16	-0,31	-0,41	-0,50	-0,57	-0,61	-0,65	-0,69	-0,71
$\tau_{max.CL.T.ULS}$ [MPa]	0,07	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les.zg.ULS}$ [MPa]	-2,92	-2,68	-3,33	-3,95	-4,34	-4,41	-4,47	-4,46	-4,41	-4,38	-4,34	-4,30
$\sigma_{les.sp.ULS}$ [MPa]	7,06	4,81	4,73	4,63	4,31	3,79	3,36	2,97	2,63	2,35	2,11	1,90
$\tau_{max.les.ULS}$ [MPa]	0,66	0,60	0,75	0,89	0,99	1,02	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
$\sigma_{s.zg.ULS}$ [MPa]		71,21	69,94	68,51	63,81	56,01	49,73	43,98	38,96	34,77	31,21	28,14
$\sigma_{s.sp.ULS}$ [MPa]		72,32	72,32	72,32	68,93	62,08	56,68	51,68	47,31	43,73	40,75	38,25
$\sigma_{s.max.ULS}$ [MPa]		72,32	72,32	72,32	68,93	62,08	56,68	51,68	47,31	43,73	40,75	38,25
$F_{screw.CL.T.ULS}$ [kN]	-1,96	-1,69	-2,01	-2,32	-2,50	-2,50	-2,50	-2,47	-2,43	-2,39	-2,35	-2,32
$I_{Z_{CLT.zg}}$	0,29	0,23	0,26	0,29	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26
$I_{Z_{CLT.strig}}$	0,14	0,12	0,14	0,16	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16
$I_{Z_{les.zg}}$	0,58	0,43	0,47	0,50	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,39	0,38

$I_{z_{les,sp}}$	1,00	0,65	0,61	0,57	0,50	0,48	0,45	0,43	0,41	0,39	0,37	0,36
$I_{z_{les,strig}}$	0,63	0,57	0,71	0,85	0,95	0,97	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_s}$		1,00	1,00	1,00	0,95	0,86	0,78	0,71	0,65	0,60	0,56	0,53
$I_{z_{screw,CLT}}$	0,78	0,68	0,80	0,93	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	0,94	0,93
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 133: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; SLS ini

Konfiguracija	A1											
	Debelina steklenega traku [mm]											
Parameter	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	6,49	8,10	9,57	10,94	12,22	13,42	14,54	15,61	16,63	17,60	18,53	19,43
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2521,33	3037,87	3513,69	3954,96	4366,70	4753,02	5117,38	5462,63	5791,21	6105,18	6406,32	6696,14
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2290,50	2753,26	3175,60	3564,18	3924,29	4260,23	4575,51	4873,03	5155,19	5424,04	5681,30	5928,43
$\gamma_{s,SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32

Tabela 134: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; SLS fin

Konfiguracija	A1											
	Debelina steklenega traku [mm]											
Parameter	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,73	8,50	10,83	12,82	14,56	16,10	17,48	18,74	19,90	20,97	21,97	22,92
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1284,90	1731,52	2106,44	2428,04	2708,97	2958,22	3182,37	3386,36	3573,94	3748,04	3910,97	4064,60
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	1149,62	1543,43	1868,57	2143,94	2382,14	2591,92	2779,54	2949,58	3105,51	3249,99	3385,08	3512,44
$\gamma_{s,SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

## 12.2.16 Konfiguracija A1, parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika

Tabela 135: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS ini

Konfiguracija	A1											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,61	5,75	5,89	5,96	6,02	6,17	6,23	6,30	6,44	6,58	6,72	6,84
u [mm]	11,66	11,59	11,53	11,50	11,46	11,41	11,36	11,34	11,29	11,24	11,20	11,13
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4753,02	4876,80	4996,51	5057,43	5121,02	5238,88	5304,71	5364,62	5483,97	5602,74	5721,00	5844,35
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4260,23	4376,25	4488,88	4546,58	4607,17	4719,23	4782,48	4839,81	4954,30	5068,58	5182,68	5302,16

$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}[kN/mm]$	13,80	13,87	13,90	13,94	14,00	14,03	14,13	14,16	14,22	14,29	14,35	14,47
$K_{CLT,ULS}[kN/mm]$	9,20	9,25	9,27	9,29	9,33	9,36	9,42	9,44	9,48	9,52	9,57	9,65
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\sigma_{CLT,zg,ULS}[MPa]$	-4,17	-4,16	-4,16	-4,15	-4,15	-4,14	-4,14	-4,14	-4,13	-4,13	-4,13	-4,12
$\sigma_{CLT,sp,ULS}[MPa]$	-0,52	-0,54	-0,55	-0,56	-0,57	-0,57	-0,59	-0,59	-0,60	-0,61	-0,62	-0,64
$\tau_{max,CLT,ULS}[MPa]$	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}[MPa]$	-3,46	-3,96	-4,46	-4,71	-4,94	-5,44	-5,67	-5,92	-6,41	-6,89	-7,38	-7,84
$\sigma_{les,sp,ULS}[MPa]$	4,27	4,83	5,38	5,65	5,92	6,45	6,71	6,98	7,51	8,03	8,55	9,05
$\tau_{max,les,ULS}[MPa]$	0,91	0,94	0,97	0,99	1,00	1,03	1,05	1,07	1,10	1,13	1,16	1,19
$\sigma_{s,zg,ULS}[MPa]$	42,74	42,26	41,83	41,63	41,41	41,07	40,87	40,71	40,42	40,14	39,89	39,58
$\sigma_{s,sp,ULS}[MPa]$	46,61	46,11	45,66	45,45	45,22	44,85	44,64	44,47	44,16	43,87	43,60	43,27
$\sigma_{s,max,ULS}[MPa]$	46,61	46,11	45,66	45,45	45,22	44,85	44,64	44,47	44,16	43,87	43,60	43,27
$F_{screw,CLT,ULS}[kN]$	-2,50	-2,51	-2,51	-2,51	-2,51	-2,52	-2,52	-2,52	-2,53	-2,53	-2,53	-2,54
$I_{Z_{CLT,zg}}$	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
$I_{Z_{CLT,strig}}$	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$I_{Z_{les,zg}}$	0,45	0,45	0,44	0,42	0,40	0,40	0,37	0,35	0,32	0,30	0,29	0,27
$I_{Z_{les,sp}}$	0,53	0,52	0,51	0,48	0,46	0,46	0,43	0,40	0,37	0,34	0,32	0,31
$I_{Z_{les,strig}}$	0,87	0,85	0,79	0,73	0,68	0,67	0,61	0,58	0,52	0,48	0,50	0,51
$I_{Z_s}$	0,64	0,64	0,63	0,63	0,63	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61	0,60	0,60
$I_{Z_{screw,CLT}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 136: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS fin

Konfiguracija	A1											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	6,41	6,62	6,83	6,93	7,02	7,22	7,31	7,41	7,60	7,80	7,99	8,15
u [mm]	18,28	18,32	18,37	18,38	18,37	18,40	18,37	18,38	18,39	18,40	18,40	18,35
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3438,91	3515,92	3590,44	3628,89	3669,68	3744,13	3787,09	3825,42	3902,02	3978,56	4055,05	4135,74
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3031,35	3109,35	3184,77	3223,57	3264,58	3339,66	3382,63	3421,14	3498,06	3574,84	3651,49	3732,03
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}[kN/mm]$	7,04	7,08	7,09	7,11	7,14	7,16	7,21	7,23	7,26	7,29	7,32	7,38
$K_{CLT,ULS}[kN/mm]$	4,70	4,72	4,73	4,74	4,76	4,77	4,81	4,82	4,84	4,86	4,88	4,92
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
$\sigma_{CLT,zg,ULS}[MPa]$	-4,28	-4,29	-4,29	-4,30	-4,30	-4,30	-4,31	-4,31	-4,31	-4,32	-4,32	-4,32
$\sigma_{CLT,sp,ULS}[MPa]$	-0,41	-0,41	-0,41	-0,41	-0,42	-0,41	-0,42	-0,42	-0,42	-0,43	-0,43	-0,44
$\tau_{max,CLT,ULS}[MPa]$	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}[MPa]$	-4,41	-5,03	-5,65	-5,95	-6,25	-6,86	-7,14	-7,44	-8,04	-8,64	-9,24	-9,80
$\sigma_{les,sp,ULS}[MPa]$	3,79	4,36	4,94	5,24	5,52	6,11	6,39	6,69	7,27	7,86	8,44	9,01
$\tau_{max,les,ULS}[MPa]$	1,02	1,06	1,10	1,12	1,14	1,19	1,21	1,23	1,27	1,31	1,35	1,39
$\sigma_{s,zg,ULS}[MPa]$	56,01	56,50	56,91	57,10	57,21	57,53	57,60	57,73	57,95	58,14	58,31	58,33
$\sigma_{s,sp,ULS}[MPa]$	62,08	62,58	63,00	63,20	63,31	63,64	63,70	63,83	64,05	64,25	64,41	64,41
$\sigma_{s,max,ULS}[MPa]$	62,08	62,58	63,00	63,20	63,31	63,64	63,70	63,83	64,05	64,25	64,41	64,41
$F_{screw,CLT,ULS}[kN]$	-2,50	-2,51	-2,51	-2,51	-2,51	-2,52	-2,52	-2,52	-2,53	-2,53	-2,53	-2,54
$I_{Z_{CLT,zg}}$	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30

$I_{z_{CLT, strig}}$	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$I_{z_{les, zg}}$	0,48	0,48	0,48	0,46	0,44	0,44	0,41	0,38	0,36	0,34	0,32	0,31
$I_{z_{les, sp}}$	0,48	0,48	0,48	0,45	0,43	0,44	0,41	0,38	0,36	0,34	0,32	0,31
$I_{z_{les, strig}}$	0,97	0,96	0,90	0,83	0,77	0,77	0,70	0,66	0,61	0,56	0,58	0,59
$I_{z_s}$	0,86	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89
$I_{z_{screw, CLT}}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 137: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS ini

Konfiguracija	A1											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	13,42	13,79	14,16	14,35	14,54	14,91	15,10	15,29	15,65	16,01	16,38	16,75
$u$ [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff, SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4753,02	4876,80	4996,51	5057,43	5121,02	5238,88	5304,71	5364,62	5483,97	5602,74	5721,00	5844,35
$(EI)_{eff, ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4260,23	4376,25	4488,88	4546,58	4607,17	4719,23	4782,48	4839,81	4954,30	5068,58	5182,68	5302,16
$\gamma_{s, SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s, ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT, SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,87	13,90	13,94	14,00	14,03	14,13	14,16	14,22	14,29	14,35	14,47
$K_{CLT, ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,25	9,27	9,29	9,33	9,36	9,42	9,44	9,48	9,52	9,57	9,65
$\gamma_{CLT, SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
$\gamma_{CLT, ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Tabela 138: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS fin

Konfiguracija	A1											
	Indeks trdnostnega razreda stropnika											
Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	16,10	16,49	16,87	17,07	17,27	17,65	17,86	18,05	18,44	18,82	19,21	19,60
$u$ [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{eff, SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2958,22	3022,83	3085,06	3117,21	3151,42	3213,38	3249,43	3281,33	3345,04	3408,62	3472,10	3539,20
$(EI)_{eff, ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2591,92	2659,67	2724,76	2758,13	2793,36	2857,55	2894,27	2927,06	2992,38	3057,41	3122,16	3190,10
$\gamma_{s, SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s, ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT, SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,33	5,35	5,36	5,39	5,40	5,43	5,45	5,47	5,49	5,52	5,57
$K_{CLT, ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,56	3,57	3,57	3,59	3,60	3,62	3,63	3,65	3,66	3,68	3,71
$\gamma_{CLT, SLS}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
$\gamma_{CLT, ULS}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26

## 12.2.17 Konfiguracija A1, parameter: širina steklenega traku

Tabela 139: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; ULS ini

Konfiguracija	A1								
	Širina steklenega traku [cm]								
Parameter	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5,26	5,78	6,08	6,26	6,38	6,47	6,44	6,37	6,31

u [mm]	12,90	11,05	9,98	9,28	8,78	8,42	8,04	7,71	7,45
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	4043,73	5163,34	6021,39	6699,99	7250,14	7705,18	8087,83	8414,11	8695,65
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	3644,13	4612,53	5339,71	5905,87	6359,19	6730,37	7039,92	7302,02	7526,82
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
K <sub>CLT,SLS</sub> [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
K <sub>CLT,ULS</sub> [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-4,36	-4,08	-3,91	-3,80	-3,72	-3,66	-3,58	-3,49	-3,43
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	-0,33	-0,62	-0,79	-0,89	-0,97	-1,03	-1,06	-1,08	-1,10
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-3,34	-3,52	-3,63	-3,70	-3,75	-3,79	-3,77	-3,74	-3,72
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	5,22	3,81	2,99	2,46	2,08	1,80	1,56	1,38	1,23
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,87	0,93	0,96	1,00	1,02	1,04	1,05	1,05	1,05
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	52,22	38,10	29,91	24,56	20,78	17,98	15,64	13,75	12,24
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	56,50	41,77	33,22	27,63	23,70	20,77	18,31	16,31	14,71
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	56,50	41,77	33,22	27,63	23,70	20,77	18,31	16,31	14,71
F <sub>screw,CLT,ULS</sub> [kN]	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,47	-2,44	-2,41
I <sub>ZCLT,zg</sub>	0,31	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24
I <sub>ZCLT,strig</sub>	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
I <sub>Zles,zg</sub>	0,50	0,43	0,39	0,36	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30
I <sub>Zles,sp</sub>	0,69	0,45	0,38	0,36	0,34	0,32	0,31	0,30	0,29
I <sub>Zles,strig</sub>	0,83	0,88	0,92	0,95	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
I <sub>Zs</sub>	0,78	0,58	0,46	0,38	0,33	0,29	0,25	0,23	0,20
I <sub>screw,CLT</sub>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96
JFM <sub>CLT</sub>	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 140: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; ULS fin

Konfiguracija	A1								
	Širina steklenega traku [cm]								
Parameter	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
q <sub>max</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	5,43	6,59	6,52	6,41	6,32	6,23	6,15	6,08	6,02
u [mm]	18,73	17,33	15,05	13,65	12,72	12,06	11,57	11,18	10,88
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2901,57	3732,07	4307,27	4729,28	5052,14	5307,17	5513,74	5684,49	5828,02
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	2575,69	3276,45	3750,36	4092,31	4350,73	4552,93	4715,49	4849,06	4960,78
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
K <sub>CLT,SLS</sub> [kN/mm]	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
K <sub>CLT,ULS</sub> [kN/mm]	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
$\sigma_{CLT,zg,ULS}$ [MPa]	-4,14	-4,18	-3,83	-3,61	-3,46	-3,35	-3,26	-3,20	-3,15
$\sigma_{CLT,sp,ULS}$ [MPa]	-0,18	-0,51	-0,65	-0,72	-0,77	-0,80	-0,82	-0,84	-0,85
$\tau_{max,CLT,ULS}$ [MPa]	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-3,93	-4,47	-4,38	-4,29	-4,23	-4,17	-4,13	-4,10	-4,07
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	4,47	3,30	2,37	1,83	1,48	1,24	1,06	0,92	0,81
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,89	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]	66,11	48,78	35,11	27,09	21,89	18,27	15,61	13,58	11,97
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]	72,32	54,53	40,11	31,62	26,12	22,28	19,45	17,29	15,58

$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]	72,32	54,53	40,11	31,62	26,12	22,28	19,45	17,29	15,58
$F_{screw,CLT,ULS}$ [kN]	-2,30	-2,50	-2,39	-2,31	-2,25	-2,21	-2,18	-2,15	-2,13
$I_{z_{CLT,zg}}$	0,29	0,29	0,27	0,26	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22
$I_{z_{CLT,striig}}$	0,16	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15
$I_{z_{les,zg}}$	0,49	0,45	0,40	0,37	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31
$I_{z_{les,sp}}$	0,54	0,45	0,39	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28
$I_{z_{les,striig}}$	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_s}$	1,00	0,75	0,55	0,44	0,36	0,31	0,27	0,24	0,22
$I_{z_{screw,CLT}}$	0,92	1,00	0,96	0,92	0,90	0,88	0,87	0,86	0,85
$JFM_{CLT}$	F	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabela 141: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; SLS ini

Konfiguracija	A1								
Parameter	Širina steklenega traku [cm]								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	11,22	14,69	17,34	19,43	21,12	22,51	23,68	24,67	25,52
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	4043,73	5163,34	6021,39	6699,99	7250,14	7705,18	8087,83	8414,11	8695,65
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	3644,13	4612,53	5339,71	5905,87	6359,19	6730,37	7039,92	7302,02	7526,82
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32

Tabela 142: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; SLS fin

Konfiguracija	A1								
Parameter	Širina steklenega traku [cm]								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	13,24	17,61	20,47	22,47	23,95	25,09	25,98	26,71	27,30
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
$(EI)_{eff,SLS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2494,99	3202,99	3667,81	3996,45	4241,17	4430,51	4581,41	4704,51	4806,88
$(EI)_{eff,ULS}$ [kNm <sup>2</sup> ]	2203,01	2794,36	3173,10	3436,49	3630,34	3779,02	3896,70	3992,20	4071,28
$\gamma_{s,SLS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$K_{CLT,SLS}$ [kN/mm]	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31	5,31
$K_{CLT,ULS}$ [kN/mm]	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
$\gamma_{CLT,SLS}$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
$\gamma_{CLT,ULS}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

## 12.2.18 Konfiguracija C, parameter: debelina steklenega traku

Tabela 143: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; ULS ini

Konfiguracija	C											
Parameter	Debelina steklenega traku [mm]											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS



Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,68	2,09	2,92	3,44	3,83	4,16	4,43	4,67	4,68	4,69	4,70	4,71
u [mm]	25,96	23,48	25,05	24,93	24,41	23,90	23,41	22,90	21,70	20,67	19,78	19,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	954,40	1135,13	1295,24	1439,32	1570,73	1692,02	1805,12	1911,58	2012,60	2109,17	2202,09
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	954,40	1135,13	1295,24	1439,32	1570,73	1692,02	1805,12	1911,58	2012,60	2109,17	2202,09
$\gamma_{s,SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-8,62	-8,51	-9,73	-10,24	-10,51	-10,71	-10,86	-10,95	-10,66	-10,40	-10,18	-9,97
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	8,62	7,08	6,90	6,31	5,69	5,16	4,68	4,25	3,74	3,32	2,95	2,64
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,57	0,62	0,75	0,84	0,90	0,96	1,01	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]		70,76	69,00	63,05	56,93	51,55	46,80	42,51	37,44	33,17	29,54	26,39
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]		72,32	72,32	68,02	63,41	59,48	56,12	53,15	48,96	45,52	42,67	40,27
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]		72,32	72,32	68,02	63,41	59,48	56,12	53,15	48,96	45,52	42,67	40,27
$I_{z_{les,zg}}$	1,00	0,91	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,93	0,90	0,87
$I_{z_{les,sp}}$	1,00	0,90	0,96	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,84	0,80	0,76	0,73
$I_{z_{les,strig}}$	0,55	0,59	0,72	0,80	0,86	0,92	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_s}$		1,00	1,00	0,94	0,88	0,82	0,78	0,73	0,68	0,63	0,59	0,56

Tabela 144: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; ULS fin

Konfiguracija	C											
	Debelina steklenega traku [mm]											
Parameter	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Mejno stanje	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,68	1,37	2,21	3,03	3,81	4,57	4,61	4,61	4,61	4,61	4,62	4,62
u [mm]	38,42	24,49	27,01	29,32	31,44	33,35	31,32	29,49	27,98	26,72	25,64	24,70
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	504,50	703,55	864,20	998,40	1113,69	1215,04	1305,91	1388,72	1465,29	1536,96	1604,77	1669,54
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	504,50	703,55	864,20	998,40	1113,69	1215,04	1305,91	1388,72	1465,29	1536,96	1604,77	1669,54
$\gamma_{s,SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_{les,zg,ULS}$ [MPa]	-8,62	-6,21	-7,47	-8,66	-9,78	-10,82	-10,52	-10,21	-9,95	-9,72	-9,52	-9,35
$\sigma_{les,sp,ULS}$ [MPa]	8,62	4,78	4,64	4,49	4,32	4,14	3,52	3,01	2,60	2,26	1,98	1,73
$\tau_{max,les,ULS}$ [MPa]	0,57	0,47	0,61	0,76	0,90	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
$\sigma_{s,zg,ULS}$ [MPa]		70,70	68,74	66,48	63,98	61,25	52,12	44,57	38,49	33,46	29,22	25,60
$\sigma_{s,sp,ULS}$ [MPa]		72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	64,59	58,27	53,34	49,42	46,24	43,63
$\sigma_{s,max,ULS}$ [MPa]		72,32	72,32	72,32	72,32	72,32	64,59	58,27	53,34	49,42	46,24	43,63
$I_{z_{les,zg}}$	1,00	0,64	0,72	0,81	0,89	0,98	0,94	0,90	0,87	0,84	0,81	0,79
$I_{z_{les,sp}}$	1,00	0,64	0,70	0,76	0,82	0,87	0,82	0,77	0,73	0,70	0,67	0,64
$I_{z_{les,strig}}$	0,55	0,44	0,58	0,72	0,86	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$I_{z_s}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89	0,81	0,74	0,68	0,64	0,60

Tabela 145: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; SLS ini

Konfiguracija	C											
	Debelina steklenega traku [mm]											
Parameter	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini	ini
$q_{\max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,21	1,85	2,40	2,89	3,33	3,73	4,10	4,45	4,77	5,08	5,37	5,65
u [mm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	954,40	1135,13	1295,24	1439,32	1570,73	1692,02	1805,12	1911,58	2012,60	2109,17	2202,09
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	746,67	954,40	1135,13	1295,24	1439,32	1570,73	1692,02	1805,12	1911,58	2012,60	2109,17	2202,09
$\gamma_{s,SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

$\gamma_{s,ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
------------------	--	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabela 146: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; SLS fin

Konfiguracija	C											
	Debelina steklenega traku [mm]											
Parameter	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Mejno stanje	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS	SLS
Čas	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin	fin
$q_{max}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,72	1,91	2,83	3,56	4,18	4,70	5,17	5,59	5,97	6,32	6,66	6,97
u [mm]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
(EI) <sub>eff.SLS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	414,81	608,46	757,58	877,93	978,70	1065,60	1142,40	1211,65	1275,20	1334,38	1390,20	1443,42
(EI) <sub>eff.ULS</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	414,81	608,46	757,58	877,93	978,70	1065,60	1142,40	1211,65	1275,20	1334,38	1390,20	1443,42
$\gamma_{s,SLS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\gamma_{s,ULS}$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

### 12.3 Primer uporabe naprave za akustično tomografijo lesa

Naprava za akustično tomografijo v času upogibnih preizkusov ojačanih starih stropnikov še ni bila na voljo, stropnike pa smo po končanih upogibnih preizkusih dali odstraniti. Slučajno smo ohranili posamezne kose stropnikov, ki so nastali pri pripravi za upogibne preizkuse oz. pri skrajšanju stropnikov na dolžino 4,7 m. Na odžaganem kosu oz. koncu stropnika smo tako izvedli akustično tomografijo (slika 112). Uporabljena naprava se imenuje Fakopp ArborSonic 3D Acoustic Tomograph. Naprava uporablja piezoelektrične senzorje, da meri čas prehoda zvoka med posameznimi senzorji oz. točkami na lesenem prerezu.



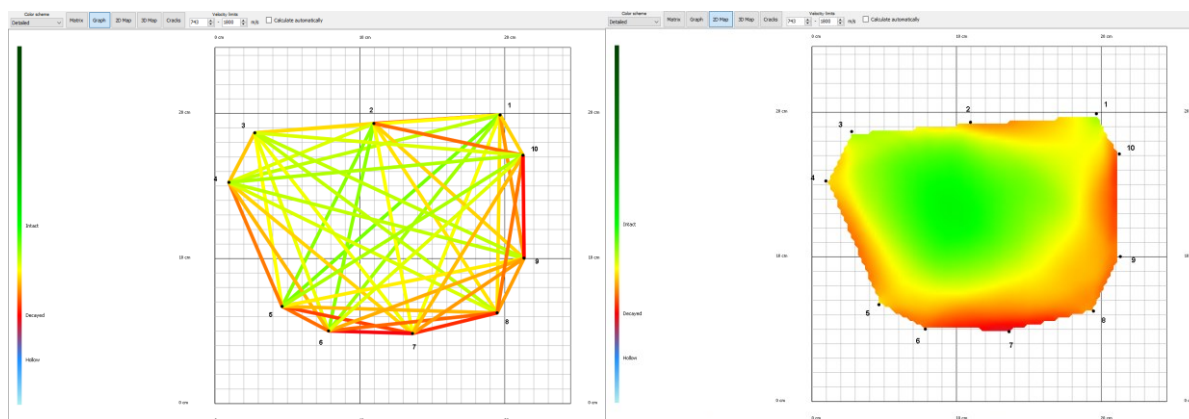
Slika 112: Odžagani konec stropnika z nameščenimi piezoelektričnimi senzorji naprave za akustično tomografijo Fakopp ArborSonic 3D Acoustic Tomograph

Izvorni zvok sprožimo na posameznem senzorju s pritrkovanjem po keramični glavi piezoelektričnega senzorja (slika 113). Postopek ponovimo na vseh senzorjih.



Slika 113: Proizvajanje zvoka s pritrkovanjem po piezoelektričnih senzorjih naprave za akustično tomografijo Fakopp ArborSonic 3D Acoustic Tomograph

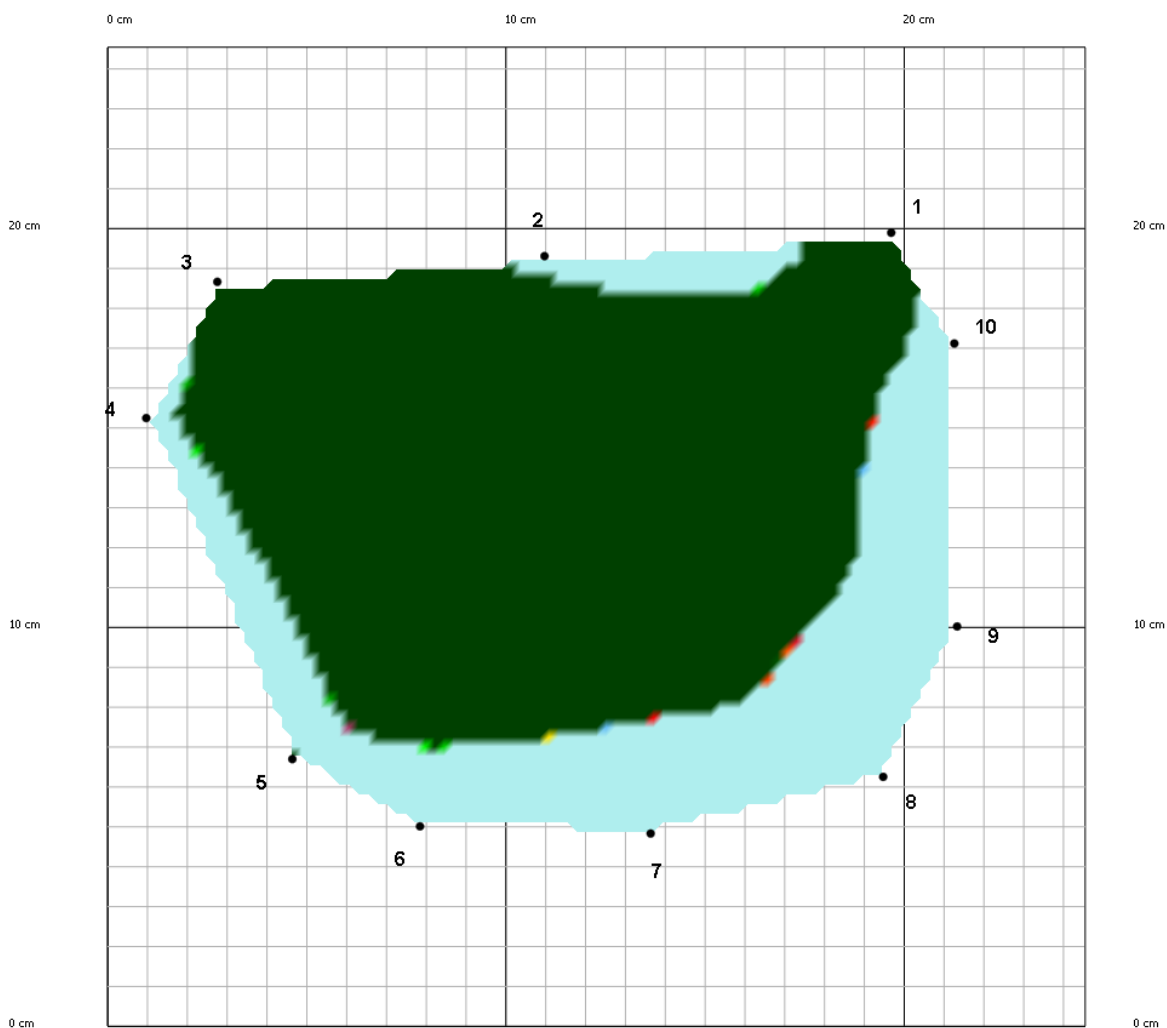
Rezultat meritev je matrika časov potovanja zvoka med posameznimi senzorji. Pri izmerjenih hitrostih zvoka predpostavljamo, da gre za longitudinalne valove, ki potujejo hitreje od transverzalnih valov. S poznavanjem geometrije oz. položaja točk programska oprema naprave izračuna hitrosti potovanja zvoka med posameznimi točkami in rezultate prevede v grafično obliko. Na sliki 114 levo vidimo grafični prikaz hitrosti med posameznimi točkami (zelena barva indicira večjo hitrost, rdeča pa manjšo). Nadalje programska oprema izvede interpolacijo hitrosti zvoka po celotnem prerezu (slika 114 desno).



Slika 114: Prikaz rezultatov akustične tomografije na prerezu stropnika (levo: hitrosti zvoka med posameznimi točkami senzorjev, desno: interpolacija hitrosti zvoka na celotnem prerezu)

Kot vidimo na sliki 114 desno, zvok po lesenem prerezu potuje z zelo različnimi hitrostmi (od približno 700 m/s do 1800 m/s). Pri akustični tomografiji se razlika med hitrostjo zvoka v tangencialni in radialni smeri zanemari. V enem od temeljnih del na področju akustike lesa [146] je podana obrazložitev, da je hitrost zvoka tudi v lesu (anizotropnem materialu) indikator

njegove kakovosti. V [146] je navedenih več primerov meritev hitrosti zvoka v smrekovem lesu, na podlagi katerih lahko trdimo, da je hitrost zvoka v tangencialni smeri v tem lesu večja vsaj od 1200 m/s. Diagram na sliki 114 desno lahko predelamo na način, da vidimo, v katerih delih prereza je bila hitrost zvoka večja in v katerih manjša od 1200 m/s (slika 115). Za dele, kjer je hitrost zvoka manjša od 1200 m/s, predpostavljamo, da jih ne moremo upoštevati kot nosilne.



Slika 115: Prikaz delov prereza, kjer zvok potuje s hitrostjo, manjšo od 1200 m/s (svetlo modra barva), in kjer zvok potuje s hitrostjo, večjo od 1200 m/s (temno zelena barva)

Kot vidimo na sliki 115, je zdravi del prereza (hitrosti, večje od 1200 m/s) dosti manjši od izmerjenih dimenzij. Po širini in višini prereza so odstopanja tudi do 4 cm (en kvadrataček na mreži predstavlja 1 cm). Na podlagi prikazanih zdravih delov prereza je jasno, da bosta dejanska nosilnost in togost lesenega elementa z obravnavanim prečnim prerezom dosti manjši od nosilnosti in togosti, ki ju bi izračunali na podlagi izmerjenih dimenzij prereza oz. dimenzij prereza brez upoštevanja poškodb. Prikazana meritev predstavlja vsaj delni razlog za odstopanje izračunanih in izmerjenih upogibnih togosti in nosilnosti ojačanih stropnikov v tej disertaciji.

## Seznam tabel

Tabela 1: Teža različnih lesenih stropov in izračun deleža teže nasutja .....	12
Tabela 2 Predpisane koristne obtežbe v različnih standardih .....	12
Tabela 3: Rezultati nateznih preizkusov epoksidnih vzorcev.....	22
Tabela 4: Rezultati mehanskih lastnosti izbranega adheziva iz [94].....	22
Tabela 5: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ( $\tau$ ) za različne okoljske pogoje (s so standardne deviacije, CV pa koeficienti variacij) .....	25
Tabela 6: Rezultati posameznih preizkušancev (ID je označba preizkušanca, $F_{max}$ je sila trgalnega stroja pri poružitvi preizkušanca, KP je kombinacija oblik loma, NB je število branik na lepljeni površini lesenega vzorca).....	26
Tabela 7: Oblike loma leseno-steklenih preizkušancev.....	29
Tabela 8: Kombinacije oblik loma .....	30
Tabela 9: Najpogostejša oblika loma za posamezne okoljske pogoje.....	30
Tabela 10: Število primerov oblik loma 2 in 3 za posamezne okoljske pogoje .....	31
Tabela 11: Determinacijski koeficienti zveze med številom branik na lepljeni ploskvi in strižno trdnostjo za posamezne okoljske pogoje .....	32
Tabela 12: Modul elastičnosti v longitudinalni smeri ( $E_L$ ), modul elastičnosti v tangencialni smeri ( $E_T$ ), strižni modul za tangencialno in longitudinalno smer ( $G_{LT}$ ) ter Poissonov količnik za tangencialno in longitudinalno smer ( $\nu_{LT}$ ) za modeliranje lesenih vzorcev.....	34
Tabela 13: Primerjava ekstremnih napetosti obeh izračunov z metodo končnih elementov..	36
Tabela 14: Rezultati nosilnosti preizkušenih stikov s pripadajočimi pomiki .....	43
Tabela 15: Ovrednotenje modula pomikov .....	45
Tabela 16: Rezultati analitičnega izračuna nosilnosti ( $FRk.con$ ) in modula pomika ( $Kslip.con$ ) novega točkovnega stika.....	49
Tabela 17: Modificirane materialne lastnosti za leseni kvader (osnovne vrednosti povzete po [91]) .....	50
Tabela 18: Primerjava eksperimentalno in analitično določene nosilnosti točkovnega stika	53
Tabela 19: Primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih rezultatov za modul pomika novega točkovnega stika.....	53

Tabela 20: Maksimalne glavne napetosti in faktorji napetosti za posamezno območje in posamezni obtežni primer .....	60
Tabela 21: Povprečne dimenzije prečnih prerezov stropnikov .....	62
Tabela 22: Materialne karakteristike CLT plošče (trdnostni razred C24 v skladu s standardom [124]).....	63
Tabela 23: Gostota in rezultati nateznih preizkusov majhnih lesenih vzorcev .....	67
Tabela 24: Ocenjene mehanske karakteristike stropnikov .....	72
Tabela 25: Pregled različnih skupin preizkušancev .....	73
Tabela 26: Stropnik 4: rezultati upogibnih preizkusov .....	74
Tabela 27: Stropnik 6: rezultati upogibnih preizkusov .....	76
Tabela 28: Stropnik 1: rezultati upogibnih preizkusov .....	78
Tabela 29: Stropnik 7: rezultati upogibnih preizkusov .....	80
Tabela 30: Stropnik 2: rezultati upogibnih preizkusov .....	82
Tabela 31: Stropnik 3: rezultati upogibnih preizkusov .....	84
Tabela 32: Stropnik 5: rezultati upogibnih preizkusov .....	86
Tabela 33: Deformacije v prerezu na sredini razpona po koncu preizkusa posamezne konfiguracije .....	93
Tabela 34: Izračunane rezultantne sile in upogibni momenti v prerezu na sredini razpona .....	94
Tabela 35: Stropnik 8: rezultati upogibnih preizkusov .....	97
Tabela 36: Zbrani rezultati upogibnih preizkusov .....	99
Tabela 37: Rezultati upogibnih preizkusov različnih konfiguracij stropnikov .....	99
Tabela 38: Rezultati analitičnih izračunov preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za SLS).....	112
Tabela 39: Rezultati analitičnih izračunov preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za ULS).....	113
Tabela 40: Primerjava med konfiguracijami posameznih stropnikov oz. vpliv stekla na upogibno togost in nosilnost stropnikov – analitični izračun .....	114
Tabela 41: Vhodni podatki za parametrično analizo .....	117
Tabela 42: Vrednosti za dimenzioniranje stekla .....	118

Tabela 43: Upoštevani trdnostni razredi lesa (za leseni stropnik).....	119
Tabela 44: Geometrija CLT plošč za računski primer.....	119
Tabela 45: Dimenzije oz. tipi lesnih vijakov CLT plošče .....	120
Tabela 46: Nosilnosti posameznih konfiguracij z osnovnimi parametri .....	128
Tabela 47: Ekstremne nosilnosti posameznih konfiguracij za posamezne parametre.....	128
Tabela 48: Rezultati numeričnih izračunov preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomikov za SLS) pri sili 100 kN.....	132
Tabela 49: Rezultati numeričnih izračunov preizkušanih konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomikov za ULS) pri sili 100 kN .....	133
Tabela 50: Primerjava med konfiguracijami posameznih stropnikov oz. vpliv stekla na upogibno togost in nosilnost stropnika – numerični izračun.....	134
Tabela 51: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguraciji A2-1 in A2-2 ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti .	147
Tabela 52: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo B ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti .....	147
Tabela 53: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo A2-1 ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti.....	147
Tabela 54: Eksperimentalno določene napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo B ter pripadajoče analitično in numerično izračunane napetosti .....	148
Tabela 55: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-1 (v %) .....	148
Tabela 56: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-2 (v %) .....	148
Tabela 57: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo B (v %).	149
Tabela 58: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo A2-1 (v %) .....	149
Tabela 59: Odstopanje analitično in numerično izračunanih napetosti od eksperimentalno določenih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo B (v %).	149

Tabela 60: Primerjava rezultatov eksperimentov ter analitičnih in numeričnih izračunov ..	151
Tabela 61: Primerjava vpliva steklenega traku na posamezne konfiguracije .....	154
Tabela 62: Odstopanje rezultatov numeričnega izračuna od rezultatov analitičnega izračuna .....	154
Tabela 63: Upogibne togosti različnih izračunov .....	158
Tabela 64: Odstopanje efektivne upogibne togosti numeričnega izračuna od različnih analitičnih izračunov .....	158
Tabela 65: Gostote stropnikov (določene z majhnimi vzorci in s tehtanjem stropnikov) ter pripadajoč trdnostni razred po standardu [124] (glede na povprečno gostoto).....	159
Tabela 66: Rezultati alternativnih analitičnih izračunov preizkušeni konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za SLS) .....	159
Tabela 67: Rezultati alternativnih analitičnih izračunov preizkušeni konfiguracij lesenih stropnikov (z moduli pomika za ULS).....	160
Tabela 68: Odstopanje rezultatov alternativnega analitičnega izračuna od eksperimentalnih rezultatov.....	162
Tabela 69: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A1 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za SLS) .....	181
Tabela 70: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A1 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za ULS) .....	181
Tabela 71: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A2 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za SLS) .....	182
Tabela 72: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij A2 lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za ULS) .....	183
Tabela 73: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij B lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za SLS) .....	184
Tabela 74: Rezultati analitičnih izračunov konfiguracij B lesenih stropnikov s trdnostnimi razredi C14–C24 (z moduli pomika za ULS) .....	184
Tabela 75: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini.....	185
Tabela 76: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; ULS .....	186
Tabela 77: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; SLS ini .....	186
Tabela 78: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks CLT plošče; SLS fin .....	187



Tabela 79: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini.....	187
Tabela 80: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; ULS fin .....	188
Tabela 81: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; SLS ini .....	188
Tabela 82: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks CLT plošče; SLS fin .....	189
Tabela 83: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS ini .....	189
Tabela 84: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS fin .....	190
Tabela 85: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS ini .....	191
Tabela 86: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS fin .....	191
Tabela 87: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS ini	192
Tabela 88: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS fin	192
Tabela 89: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS ini.	193
Tabela 90: Rezultati konfiguracije B; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS fin	193
Tabela 91: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; ULS ini .....	193
Tabela 92: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; ULS fin .....	194
Tabela 93: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; SLS ini .....	195
Tabela 94: Rezultati konfiguracije A2; parameter: razmik med točkovnimi stiki steklo-les; SLS fin.....	196
Tabela 95: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini.....	196
Tabela 96: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS fin .....	197
Tabela 97: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS ini .....	198
Tabela 98: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS fin .....	198
Tabela 99: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini.....	199

Tabela 100: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS fin.....	199
Tabela 101: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS ini.....	200
Tabela 102: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS fin.....	200
Tabela 103: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS ini .....	201
Tabela 104: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS fin .....	202
Tabela 105: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS ini .....	203
Tabela 106: Rezultati konfiguracije A2; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS fin .....	203
Tabela 107: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS ini .....	203
Tabela 108: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS fin .....	204
Tabela 109: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS ini .....	205
Tabela 110: Rezultati konfiguracije B; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS fin .....	205
Tabela 111: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona; ULS ini.....	205
Tabela 112: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona; ULS fin .....	206
Tabela 113: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona; SLS ini .....	207
Tabela 114: Rezultati konfiguracije A2; parameter: odmik točkovnega stika steklo-les od sredine razpona; SLS fin .....	208
Tabela 115: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini.....	208
Tabela 116: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; ULS ini.....	209
Tabela 117: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; ULS fin .....	209
Tabela 118: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks CLT plošče; SLS fin.....	210

Tabela 119: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS ini .....	210
Tabela 120: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; ULS fin .....	211
Tabela 121: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS ini .....	211
Tabela 122: Rezultati konfiguracije A1; parameter: razmik med vijaki CLT plošče; SLS fin .....	212
Tabela 123: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; ULS ini .....	212
Tabela 124: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; ULS fin .....	213
Tabela 125: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; SLS ini .....	213
Tabela 126: Rezultati konfiguracije A1; parameter: strižni modul adheziva; SLS fin .....	214
Tabela 127: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini .....	214
Tabela 128: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; ULS ini .....	215
Tabela 129: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS ini .....	216
Tabela 130: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks vijaka CLT plošče; SLS fin .....	216
Tabela 131: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; ULS ini .....	216
Tabela 132: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; ULS fin .....	217
Tabela 133: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; SLS ini .....	218
Tabela 134: Rezultati konfiguracije A1; parameter: debelina steklenega traku; SLS fin .....	218
Tabela 135: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS ini .....	218
Tabela 136: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; ULS fin .....	219
Tabela 137: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS ini .....	220
Tabela 138: Rezultati konfiguracije A1; parameter: indeks trdnostnega razreda stropnika; SLS fin .....	220
Tabela 139: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; ULS ini .....	220

Tabela 140: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; ULS fin.....	221
Tabela 141: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; SLS ini.....	222
Tabela 142: Rezultati konfiguracije A1; parameter: širina steklenega traku; SLS fin .....	222
Tabela 143: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; ULS ini .....	222
Tabela 144: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; ULS fin .....	223
Tabela 145: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; SLS ini .....	223
Tabela 146: Rezultati konfiguracije C; parameter: debelina steklenega traku; SLS fin.....	224

## Seznam slik

Slika 1: Različni tipi stropnih konstrukcij do konca 19. stoletja: a) strop iz stikajočih se lesenih stropnikov, b) strop iz lesenih stropnikov z razmiki, c) obok oz. obok med železnimi nosilci (vir slike: [57]).....	9
Slika 2: Etnološka območja na Slovenskem (vir slike: [67]) .....	11
Slika 3: Načini za ojačitev lesenih stropov oz. stropnikov: a) uporaba dodatnih lesenih elementov, b) tvorba škatlastih nosilcev iz obstoječih nosilcev z dodajanjem stropnikov in obložnih plošč, c) uporaba dodatnih jeklenih elementov, d) uporaba jeklenih nateznih elementov in distančnikov za povečanje statične višine stropnika (slika povzeta po [70]) ...	13
Slika 4: Sovprežni leseno-betonski nosilci z nateznimi ojačitvami oz. CFRP trakovi na spodnji strani stropnikov (vir slike: [16]).....	13
Slika 5: Prikaz stropnika, ojačanega z novim postopkom .....	14
Slika 6: Različne konfiguracije lesenega stropnika in ojačitev s pripadajočimi diagrami normalnih napetosti ( $\sigma$ ) v prerezu ob delovanju upogibnega momenta v smeri osi y z označenim težiščem prereza (CG); a) samo stropnik, b) stropnik, ojačan samo s CLT ploščo, c) stropnik, ojačan s CLT ploščo in steklenim trakom .....	15
Slika 7: Tesarska pravila za dimenzije stropnikov (z medosno razdaljo od 0,8 m do 1,1 m) iz 19. in 20. stoletja na območju srednje Evrope [70] (z rdečo črtkano črto so označene dimenzije stropnika, na katerih smo preverjali novi postopek ojačitve starih lesenih stropov).....	15
Slika 8: Orodje za strižni preizkus in leseno-stekleni preizkušaneec.....	19
Slika 9: Leseno-stekleni preizkušaneec z označenimi anatomskimi smermi v lesu (L – longitudinalna smer, R – radialna smer, T – tangencialna smer) .....	19
Slika 10: Tlačni preizkus lesenih vzorcev .....	20
Slika 11: Sestavljeni kalup za izdelavo epoksidnih vzorcev .....	21
Slika 12: Natezni preizkusi epoksidnih vzorcev.....	22
Slika 13: Strižni preizkus.....	24
Slika 14: Povprečne vrednosti strižne trdnosti glede na okoljske pogoje (intervali napak so standardne deviacije) .....	25
Slika 15: Krivulje sile v odvisnosti od pomika (merjenega na glavi trgalnega stroja) za leseno-steklene preizkušance pri različnih okoljskih pogojih (T – temperatura, u – vlažnost lesa)..	28
Slika 16: Porušna ploskev na lesenem vzorcu (opazni so »vrhovi« jesenskega lesa).....	32

Slika 17: Model s končnimi elementi .....	33
Slika 18: Prikaz rezultatov vektorja pomikov (v mm) za izračun brez upoštevanja tolerance (a) in za izračun z upoštevanjem tolerance (b).....	34
Slika 19: Primerjava krivulj sila-pomik, izračunanih z izračunom s končnimi elementi, upoštevajoč toleranco (debela rdeča krivulja), in eksperimentalnimi rezultati (tanke krivulje), za okoljske pogoje s temperaturo 20 °C in vlažnostjo lesa 10 % .....	35
Slika 20: Rezultati izračunov z metodo končnih elementov za napetosti v adhezivnem sloju: normalne napetosti ( $\sigma_y$ ) pravokotno na ravnino lepljenega stika (a), strižne napetosti ( $\tau_y$ ) vzporedno z ravnino lepljenega stika (b). Črtkana črta predstavlja rezultate izračuna z upoštevanjem tolerance, točkasta črta označuje rezultate izračuna brez upoštevanja tolerance, rdeča črta pa povprečno strižno napetost v lepljenem stiku (10 MPa). Rezultatska pot (c) je vzporedna z ravnino lepljenega stika in poteka skozi sredino debeline adhezivnega sloja v smeri rdeče puščice. ....	36
Slika 21: Dimenzije aluminijastega vstavka (v mm) .....	38
Slika 22: Aluminijasti vstavek; levo: pogled z zgornje strani, desno: pogled s spodnje strani .....	39
Slika 23: Konfiguracija točkovnega stika steklo-les (levo) in leseno-stekleni preizkušanci (desno).....	39
Slika 24: Dimenzije steklenega traku debeline 10 mm (vse dimenzije v mm).....	40
Slika 25: Primerjava osvetljevanja zračne (levo) in kositrove strani (desno) steklenega traku z ultravijolično svetlobo.....	41
Slika 26: Aluminijasti vstavek, prilepljen na luknjo oz. v luknjo v steklenem traku (levo: pogled od zgoraj, desno: pogled od spodaj).....	41
Slika 27: Preizkušanelec pred (levo) in po (desno) privitju lesnih vijakov .....	42
Slika 28: Priprava za strižne preizkuse točkovnega stika steklo-les (levo) in stiskanje steklenega traku za vnos sile trgalnega stroja s trenjem .....	43
Slika 29: Krivulje sil v odvisnosti od pomikov strižnih preizkusov .....	44
Slika 30: Presek preizkušanca po preizkusu (levo) in pretrgani del strižno in natezno obremenjenega lesnega vijaka (desno) .....	46
Slika 31: Diagrama sil prostega telesa: strižno obremenjeni vijak (levo) in strižno-natezno obremenjeni vijak (desno).....	47
Slika 32: Model s končnimi elementi (modri stožci označujejo podpore, zelene puščice pa obtežbo oz. sile) .....	50

Slika 33: Prikaz rezultatov vektorja pomikov (v mm).....	51
Slika 34: Maksimalne glavne napetosti v steklenem traku, izračunane po metodi končnih elementov (levo: spodnja stran steklenega traku, desno: zgornja stran steklenega traku) .....	51
Slika 35: Numerični izračun napetosti v steklenem traku: izpis napetosti iz rezultatske poti, vzporedne z osjo Z in potekajoče skozi središče luknje v steklenem traku: črtkana linija – normalne napetosti v smeri osi Z, pikčasta linija – normalne napetosti v smeri osi X .....	52
Slika 36: Numerični izračun napetosti v steklenem traku: izpis napetosti iz rezultatske poti, vzporedne z osjo X in potekajoče skozi središče luknje v steklenem traku: črtkana linija – normalne napetosti v smeri osi Z, pikčasta linija – normalne napetosti v smeri osi X .....	52
Slika 37: Primerjava eksperimentalnih, analitičnih in numeričnih krivulj sil v odvisnosti od pomikov za sile manjše od $0,4 \cdot F_{max.mean}$ (približno 5 kN).....	54
Slika 38: Prikaz velikosti uporabljenih končnih elementov numeričnega izračuna za oceno faktorjev napetosti v steklenem traku in dimenzije modela (dimenzije so v mm) .....	55
Slika 39: Grafični prikaz obtežnih primerov numeričnega izračuna: a) OBT 1; b) OBT 2; c) OBT 3 (modri stožci označujejo podpore, zelene puščice pa obtežbo oz. sile in momente) .	56
Slika 40: Rezultati izračunov maksimalnih glavnih napetosti v steklenem segmentu: a) OBT 1, zgornja stran steklenega segmenta, b) OBT 1, spodnja stran steklenega segmenta, c) OBT 2, zgornja stran steklenega segmenta, d) OBT 2, spodnja stran steklenega segmenta, e) OBT 3, zgornja stran steklenega segmenta, f) OBT 3, spodnja stran steklenega segmenta.....	57
Slika 41: Kritična področja steklenega segmenta.....	58
Slika 42: Prikaz izhodišča kota $\varphi$ za določitev položaja točke izpisa napetosti .....	58
Slika 43: Izpis maksimalnih glavnih napetosti za različne obtežne primere in na različnih kritičnih področjih .....	59
Slika 44: Leseni stropniki z značilnimi sledmi delovanja lesnega črva .....	62
Slika 45: Levo: vzdolžni prerez sovprežnega nosilca s prilepljenim steklom; desno: prečni prerez sovprežnega nosilca s prilepljenim steklom (dimenzije v mm).....	64
Slika 46: Levo: vzdolžni prerez sovprežnega nosilca s točkovnim stikom steklo-les; desno: prečni prerez sovprežnega nosilca s točkovnim stikom steklo-les (dimenzije v mm) .....	64
Slika 47: Merilna mesta za upogib, zdrse in deformacije (deformacije so bile merjene samo na stropniku 5).....	65
Slika 48: Diagrami sila-pomik majhnih lesenih vzorcev, odvzetih iz lesenih stropnikov (pikčasti črti označujeta interval za določitev modula elastičnosti) .....	68

Slika 49: Primera razporeditve gostote in modula elastičnosti v prerezu lesenih desk (levo: vzorec brez napak, desno: vzorec z grčami) (vir slik: [127]).....	69
Slika 50: Levo: diagram napetosti v odvisnosti od deformacij za les (za tlak je podan tudi poenostavljen elasto-plastični konstitutivni zakon); desno: razporeditev deformacij oz. napetosti v lesenem prerezu, obremenjenem z upogibnim momentom in osno silo (vir slik: [128]).....	70
Slika 51: Diagram odvisnosti razmerja upogibne napetosti ob poružitvi z natezno trdnostjo od razmerja tlačne in natezne trdnosti lesenega prereza (na podlagi elasto-plastičnega konstitutivnega zakona za les iz [128]).....	71
Slika 52: Stropnik 4 pred upogibnim preizkusom (konfiguracija C).....	74
Slika 53: Stropnik 4, konfiguracija C: krivulja sile v odvisnosti od upogiba .....	74
Slika 54: Stropnik 4 po upogibnem preizkusu, kjer je prišlo do poružitve v natezni coni prereza (mesto poružitve približno na sredini razpona).....	75
Slika 55: Stropnik 6 konfiguracija B.....	75
Slika 56: Stropnik 6: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a) in zdrsa CLT plošče (b).....	76
Slika 57: Stropnik 1, konfiguracija A1: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo .....	77
Slika 58: Stropnik 1: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c).....	77
Slika 59: Stropnik 1, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A1) .....	78
Slika 60: Stropnik 7, konfiguracija A1: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo .....	79
Slika 61: Stropnik 7: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c).....	79
Slika 62: Stropnik 7, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A1) .....	80
Slika 63: Desni konec stropnika 7 po preizkusu konfiguracije B .....	81
Slika 64: Stropnik 2, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo .....	82
Slika 65: Stropnik 2: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c).....	82
Slika 66: Stropnik 2, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A2) .....	83
Slika 67: Stropnik 3, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo .....	84
Slika 68: Stropnik 3: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c).....	84



Slika 69: Stropnik 3, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A2).....	85
Slika 70: Stropnik 5, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo .....	85
Slika 71: Stropnik 5: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c).....	86
Slika 72: Stropnik 5, konfiguracija A2: položaj merilnih lističev SG-01 do SG-06 in merilnih rozet R1 in R2.....	88
Slika 73: Stropnik 5, konfiguracija A2: položaj merilnih lističev SG-07 do SG-12 in merilne rozete R3.....	88
Slika 74: Stropnik 5, konfiguracija A2: položaj merilnih lističev SG-13 do SG-15.....	89
Slika 75: Stropnik 5, konfiguracija A2: merilna rozeta R3 z vidnimi smermi (smeri glede na vzdolžno os stropnika: a – prečno, b – pod kotom 45° in c – vzdolžno) merjenja deformacij .....	89
Slika 76: Stropnik 5: položaj merilnih lističev SG-16 do SG-18 .....	90
Slika 77: Stropnik 5: položaj merilnih lističev SG-19 do SG-21 .....	90
Slika 78: Deformacije na sredini razpona za različne konfiguracije stropnika 5 v odvisnosti od sile v hidravličnem cilindru .....	91
Slika 79: Deformacije (a) in napetosti (b) v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN.....	92
Slika 80: Deformacije (a) in napetosti (b) v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN.....	92
Slika 81: Deformacije v steklenem traku konfiguracij A2-1 in A2-2 stropnika 5 v odvisnosti od sile v hidravličnem cilindru .....	94
Slika 82: Maksimalne glavne napetosti na merilnih mestih R1, R2 in R3: a) stropnik 5, konfiguracija A2-1; b) stropnik 5, konfiguracija A2-2.....	95
Slika 83: Stropnik 8, konfiguracija A2: sovprežni nosilec CLT-stropnik-steklo .....	96
Slika 84: Stropnik 8: krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa steklenega traku (b) in zdrsa CLT plošče (c).....	96
Slika 85: Stropnik 8, konfiguracija B (po upogibnem preizkusu konfiguracije A2).....	97
Slika 86: Povprečne krivulje sile v odvisnosti od upogiba (a), zdrsa CLT plošče (b) in zdrsa steklenega traku (c).....	99
Slika 87: Upogibna togost ( $E_{\text{Ieff}}$ ), maksimalna dosežena sila ( $F_{\text{max}}$ ), sprememba upogibne togosti zaradi steklenega traku ( $\Delta E_{\text{Ieff}}$ ) in sprememba maksimalne dosežene sile zaradi	

steklenega traku ( $\Delta F_{max}$ ) v odvisnosti od modula elastičnosti ( $E_{0,mean}$ ) stropnikov (za različne konfiguracije) .....	101
Slika 88: Načini porušitve lesenih stropnikov, ojačanih s polimernimi trakovi (vir slike: [132]) .....	102
Slika 89: Notranje statične količine ( $V$ – prečne sile, $M$ – upogibni momenti) pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu (sili $F_{pre}/2$ delujeta na tretjinah razpona) .....	111
Slika 90: Diagram nosilnosti (a) in upogibne togosti (b) v odvisnosti od trdnostnega razreda stropnika (1 – C14, 2 – C16, 3 – C18, 4 – C20, 5 – C22, 6 – C24) za različne konfiguracije (z moduli pomikov za SLS in ULS).....	116
Slika 91: Notranje statične količine ( $V$ – prečne sile, $M$ – upogibni momenti) v prostoležečem nosilcu ob enakomerni zvezni obtežbi .....	118
Slika 92: Diagrami maksimalnih koristnih obtežb (nosilnosti) v odvisnosti od različnih parametrov 1 .....	122
Slika 93: Diagrami maksimalnih koristnih obtežb (nosilnosti) v odvisnosti od različnih parametrov 2 .....	123
Slika 94: Grafični prikaz numeričnega modela v programu Inventor Nastran 2020 (levo: konfiguracija A1, desno: konfiguracija A2) .....	130
Slika 95: Lepljene ploskve pri točkovnem stiku (levo: kontakt med zunanjo površino steklenega traku in adhezivom na površini traku, desno: kontakt med robom luknje v steklenem traku in adhezivom v luknji v traku).....	131
Slika 96: Primerjava rezultatov za stropnik 4, konfiguracija C; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate.....	135
Slika 97: Primerjava rezultatov za stropnik 6, konfiguracija B; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate.....	136
Slika 98: Primerjava rezultatov za stropnik 1: a) konfiguracija A1 (CLT+stropnik+prilepljeno steklo), b) konfiguracija B (CLT+stropnik); črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate .....	137
Slika 99: Primerjava rezultatov za stropnik 7: a) konfiguracija A1, b) konfiguracija B; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate .....	138
Slika 100: Primerjava rezultatov za stropnik 2: a) konfiguracija A2 (CLT+stropnik+privito steklo), b) konfiguracija B (CLT+stropnik); črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate .....	139

Slika 101: Primerjava rezultatov za stropnik 3: a) konfiguracija A2 (CLT+stropnik+privito steklo), b) konfiguracija B (CLT+stropnik); črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate .....	140
Slika 102: Primerjava rezultatov za stropnik 5: a) konfiguracija A2, b) konfiguracija B; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate .....	141
Slika 103: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-1; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti .....	142
Slika 104: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo A2-2; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti .....	143
Slika 105: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 35 kN, za konfiguracijo B; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti .....	144
Slika 106: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo A2-1; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti .....	145
Slika 107: Primerjava eksperimentalno določenih ter analitično in numerično izračunanih napetosti v prerezu na sredini razpona pri sili 85 kN, za konfiguracijo B; rdeča črtkana črta predstavlja eksperimentalno določene napetosti .....	146
Slika 108: Primerjava rezultatov za stropnik 8: a) konfiguracija A2, b) konfiguracija B; črtkana črta označuje eksperimentalne rezultate .....	150
Slika 109: Vpliv strižnih deformacij na zdrs med težišči delov sestavljenega prereza (vir slike: [140]) .....	155
Slika 110: Rezultati upogibnih preizkusov iz študije [145]: a) povprečne krivulje sile v odvisnosti od upogiba, b) upogibne togosti na različnih intervalih sile .....	163
Slika 111: Rezultati parametrične študije [6]: a) vpliv trdnostnega razreda lesenih nosilcev na upogibno togost, b) vpliv trdnostnega razreda lesenih nosilcev na nosilnost.....	164
Slika 112: Odžagani konec stropnika z nameščenimi piezoelektričnimi senzorji naprave za akustično tomografijo Fakopp ArborSonic 3D Acoustic Tomograph.....	224
Slika 113: Proizvajanje zvoka s pritrkovanjem po piezoelektričnih senzorjih naprave za akustično tomografijo Fakopp ArborSonic 3D Acoustic Tomograph.....	225
Slika 114: Prikaz rezultatov akustične tomografije na prerezu stropnika (levo: hitrosti zvoka med posameznimi točkami senzorjev, desno: interpolacija hitrosti zvoka na celotnem prerezu) .....	225

Slika 115: Prikaz delov prereza, kjer zvok potuje s hitrostjo, manjšo od 1200 m/s (svetlo modra barva), in kjer zvok potuje s hitrostjo, večjo od 1200 m/s (temno zelena barva) .....226

## Življenjepis

### OSEBNI PODATKI

Žiga Unuk

Organizacija:

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo

Naslov:

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Elektronska pošta:

ziga.unuk@um.si

### IZOBRAŽEVANJE IN USPOSABLJANJE

---

1. 10. 2011 – 25. 9. 2014 Magister inženir gradbeništva - 2. bolonjska stopnja  
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
3. 9. 2013 – 29. 11. 2013 Praktikant (Praktično usposabljanje v tujini IAESTE)  
Univerza v Zagrebu, Fakulteta za gradbeništvo, Zagreb (Hrvaška)
3. 9. 2012 – 4. 7. 2013 Študijska izmenjava Erasmus  
Tehniška univerza v Gradcu, Fakulteta za gradbeništvo, Gradec (Avstrija)
1. 10. 2008 – 29. 9. 2011 Diplomirani inženir gradbeništva (UN), 1. bolonjska stopnja  
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
- 2004–2008 Gimnazijski maturant  
II. gimnazija Maribor, Maribor
- 1996–2004 Dokončana osnovna šola  
Osnovna šola dr. Jožeta Pučnika Črešnjevce, Črešnjevce

### DELOVNE IZKUŠNJE

---

1. 11. 2016– Mladi raziskovalec ARRS  
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo  
Financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS)
1. 2. 2015 – 31. 10. 2016 Projektni inženir za projektiranje konstrukcij  
Novum Structures GmbH, Veitshöchheim (Nemčija)

## RAZISKOVALNO PODROČJE

---

konstrukcijsko steklo, lesene konstrukcije, adhezivi, sovprežne konstrukcije, ojačitev konstrukcij grajene kulturne dediščine, projektiranje konstrukcij

## POMEMBNEJŠE PUBLIKACIJE

---

UNUK, Žiga, IVANIČ, Andrej, ŽEGARAC LESKOVAR, Vesna, PREMROV, Miroslav, LUBEJ, Samo. Evaluation of a structural epoxy adhesive for timber-glass bonds under shear loading and different environmental conditions. *International journal of adhesion and adhesives*, ISSN 0143-7496, 2019.

UNUK, Žiga, PREMROV, Miroslav, ŽEGARAC LESKOVAR, Vesna. Development of an innovative approach for the renovation of timber floors with the application of CLT panels and structural glass strips. *International journal of architectural heritage: conservation, analysis and restoration*, ISSN 1558-3066, 2019.

UNUK, Žiga, PREMROV, Miroslav, ŽEGARAC LESKOVAR, Vesna. Timber floors and strengthening techniques (Illustrated with a numerical example). *Teknik dergi*, ISSN 1300-3453, 2019.

UNUK, Žiga, ŠTRUKELJ, Andrej, ŽEGARAC LESKOVAR, Vesna, PREMROV, Miroslav. Novel composite connection for timber-glass composite structures. *Archives of civil and mechanical engineering*, ISSN 1644-9665, 2020.

## NAGRADE IN PRIZNANJA

---

18. 9. 2015 Priznanje Andreja Perlacha  
Podelila Univerza v Mariboru
- April 2014 2. mesto na tekmovanju DECO 2014, Univerza Bogaziçi, Istanbul, Turčija; z ekipo Trust'n'Truss, Univerza v Mariboru  
DECO 2014 je mednarodno študentsko tekmovanje, na katerem je treba načrtovati in zgraditi jeklene mostove z razponi 6–7m, ki morajo prenesti obtežbo 12,5 kN. Mostovi so ocenjeni glede na čas sestavljanja, estetiko, lastno težo konstrukcije in pomike konstrukcije.
- 2004–2014 Prejemnik Zoisove štipendije za nadarjene dijake in študente

**PRILOGA 4: IZJAVA O AVTORSTVU IN ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE DOKTORSKE DISERTACIJE**

**UNIVERZA V MARIBORU**

Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo

**IZJAVA O AVTORSTVU IN ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE DOKTORSKE DISERTACIJE**

Ime in priimek študenta/-ke: Žiga Unuk

Študijski program: GRADBENIŠTVO

Naslov doktorske disertacije: Razvoj novega postopka za ojačitev starih lesenih stropov

Mentor/-ica: Miroslav Premrov

Somentor/-ica: Vesna Žegarac Leskovar

Podpisani/-a študent/-ka Žiga Unuk

- izjavljam, da je zaključno delo rezultat mojega znanstvenoraziskovalnega dela;
- izjavljam, da sem pridobil/-a vsa potrebna soglasja za uporabo podatkov in avtorskih del v zaključnem delu in jih v zaključnem delu jasno in ustrezno označil/-a;
- na Univerzo v Mariboru neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi zaključno delo javnosti na svetovnem spletu preko DKUM in drugih informacijskih zbirk in ponudnikov; sem seznanjen/-a, da bodo dela deponirana/objavljena v DKUM dostopna široki javnosti pod pogoji licence **Creative Commons BY-NC-ND**, kar vključuje tudi avtomatizirano indeksiranje preko spleta in obdelavo besedil za potrebe tekstovnega in podatkovnega rudarjenja in ekstrakcije znanja iz vsebin; uporabnikom se dovoli reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo;
- dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto zaključka študija, naslov zaključnega dela) na spletnih straneh Univerze v Mariboru in v publikacijah Univerze v Mariboru;
- izjavljam, da je tiskana oblika zaključnega dela istovetna elektronski obliki zaključnega dela, ki sem jo oddal/-a za objavo v DKUM;
- izjavljam, da sem seznanjen s pogoji Proquest-a za oddajo in javno objavo doktorske disertacije v podatkovno zbirko ProQuest Dissertations & Theses Global (<http://contentz.mkt5049.com/lp/43888/382619/PQDTauthoragreement.pdf>).

Uveljavljam permisivnejšo obliko licence Creative Commons: \_\_\_\_\_ (navedite obliko)

Kraj in datum: Maribor, 16.10.2020 Podpis študenta/-ke: \_\_\_\_\_

DOKTORSKA DISERTACIJA ŽIGA UNUK