

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2024

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.072.2:691.618.5(043.3)
Avtor:	Darjan Grudnik
Mentor:	doc. dr. David Antolinc, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Razvoj upogibnega prednapetega steklenega nosilca
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	58 str., 3 pregl., 68 sl.
Ključne besede:	konstrukcijsko steklo, vmesna povezovalna plast, UV lepilo, EVA folija, prednapet upogibni nosilec, steklena vlakna, numerična analiza

Izvleček:

Cilj magistrskega dela je bil raziskati steklo kot konstrukcijski material, poiskati njegove prednosti in slabosti ter ugotoviti, ali bi steklo v posebnih primerih lahko nadomestilo uporabo drugih, v gradbeništvu običajno uporabljenih konstrukcijskih materialov. Namen je bil izvesti numerično analizo prednapetega steklenega nosilca, skupaj z eksperimentalnim testom, ki pa se je izkazal za finančno in časovno preveč zahtevnega. Z eksperimentalnimi testi sem se tako omejil le na spremljevalne strižne teste vmesnih povezovalnih plasti, natezne teste steklenih vlaken ter tlačne teste steklenih plošč. Celotna magistrska naloga je bila zasnovana tako, da bo možno v potencialnem nadaljevanju te študije s pomočjo pridobljenih rezultatov izdelati stekleni nosilec polne velikosti in ga eksperimentalno testirati. Numerični model je bil izdelan v programskem okolju Abaqus, ki omogoča natančen vpogled v razvoj napetosti po nosilcu. V razvoju modela prednapetega steklenega nosilca sem želel kar se da dobro izkoristiti tlačne lastnosti stekla in natezne lastnosti steklenih vlaken. Pri obravnavi stekla kot konstrukcijskega materiala je bilo potrebno posebno pozornost nameniti lokalnim konicam napetosti. Steklo je namreč krhek material, ki ni sposoben plastičnega deformiranja in zato lahko lokalno doseganje trdnosti materiala pomeni njegovo porušitev. Steklo je material, ki ponuja določene prednosti (kot sta visoka tlačna trdnost ter linearno obnašanje) pred ostalimi materiali, ki se običajno uporabljajo v gradbeništvu. Žal pa ima steklo tudi številne pomanjkljivosti, kot sta krhkost in relativno visoka cena, kar sta tudi glavni omejitvi pri uporabi stekla za konstrukcijske namene v širši gradbeni stroki.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.072.2:691.618.5(043.3)
Author:	Darjan Grudnik
Supervisor:	Assist. Prof. David Antolinc, Ph.D.
Title:	Development of prestressed glass beam
Document type:	Master thesis
Notes:	58 p., 3 tab., 68 fig.
Keywords:	structural glass, interlayer, UV adhesive, EVA interlayer, prestressed bending beam, glass fibers, numerical analysis

Abstract:

The goal of this thesis is to explore glass as a structural material, find its advantages and disadvantages, and to open new possibilities for structural use of glass. The purpose of the thesis was to perform numerical analysis of prestressed glass beam alongside with experimental testing of the beam. Unfortunately, the experimental tests of a full-size beam proved themselves as too expensive and time consuming for the financial and time constraints of this thesis. Therefore, I decided to perform only side experimental tests, where the glass bonding interlayers, glass fibres and compressive tests of glass panels were conducted. The thesis is prepared with the intention to provide preliminary information for further potential researchers who are going to continue the experimental implementation and analysis of the full-scale prestressed glass beam. The prestressed glass beam was numerically modelled and studied with program Abaqus, which offered detailed understanding of stresses and strains development throughout the beam. During the development phase of the numerical modelling, the idea was to find the upper load bearing capacity of the glass beam. When designing with structural glass, special consideration is needed around local stress concentration because of its brittle nature. Glass is a material that offers certain advantages over other conventional construction materials such as high compressive strength and linear behaviour. Unfortunately, glass has several weaknesses such as fragility and cost, which I believe are the important factors which limit the more widespread use of glass as a structural material.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč in usmerjanje pri nastajanju magistrskega dela se zahvaljujem mentorju, doc. dr. Davidu Antolincu, univ. dipl. inž. grad.

Posebej se zahvaljujem moji družini, ki mi je študij omogočila in me ves čas študija tudi podpirala. Zahvaljujem se tudi svoji partnerki in vsem svojim prijateljem, ki so mi v času študija pričarali nepozabne študentske dni.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
BIBLIOGRAFSKO- DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	II
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	III
ZAHVALA.....	IV
1 UVOD	1
2 STEKLO.....	2
2.1 Kaj je steklo in katere vrste poznamo	2
2.2 Kaljenje stekla	2
2.3 Lamelirano steklo	3
2.4 Mehanske karakteristike	4
2.4.1 Steklo	4
2.4.2 Steklена vlakna.....	5
2.5 Lepljenje stekel.....	6
3 PREGLED OBSTOJEČEGA STANJA LITERATURE NA PODROČJU STEKLENIH NOSILCEV	8
3.1 Splošno o steklenih nosilcih.....	8
3.2 Raziskave za konstruiranje steklenega mosta v Delftu	9
3.3 Raziskave na področju vmesnih povezovalnih plasti za steklene elemente v tlaku	12
4 RAZVOJ KONCEPTA UPOGIBNEGA PREDNAPETEGA NOSILCA	14
5 IDEJA SPREMLJEVALNIH PREISKAV IN NJIHOVA IZVEDBA.....	17
5.1 Namen in izvedba strižnih testov vmesne povezovalne plasti	17
5.2 Namen in izvedba nateznih testov steklenih vlaken	26
5.3 Namen in izvedba tlačnih testov steklenih ploščic	31

6	NUMERIČNA ANALIZA	33
6.1	Modeliranje geometrije.....	33
6.2	Material, particije in koraki analize	35
6.3	Interakcije med površinami.....	36
6.4	Robni pogoji, obtežbe in mreža končnih elementov	37
6.5	Analiza in rezultati	39
6.6	Kritični komentarji rezultatov in primerjava z nosilnostjo primerljivega AB prereza	52
7	ZAKLJUČEK	54
8	VIRI IN LITERATURA	56

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kemijska sestava stekla [2].	2
Preglednica 2: Fizikalne in materialne karakteristike stekla [5].	5
Preglednica 3: Dimenzije posameznih sestavnih elementov strižnih preizkušancev.	18

KAZALO SLIK

Slika 1: Primerjava razvoja napetosti in razpok upogibno obremenjenega elementa iz navadnega in kaljenega stekla [3].	3
Slika 2: Obnašanje lameliranega stekla s PVB folijo po porušitvi v odvisnosti od stopnje kaljenja stekla [3].	4
Slika 3: Odnos med napetostmi in deformacijami za konstrukcijsko jeklo in steklo [4].	5
Slika 4: EVA folija ali etilen vinil acetatna folija [11].	6
Slika 5: Različni pristopi testiranja ločevanja povezovalnih plasti [12].	7
Slika 6: UV lepilo [15].	7
Slika 7: Skica običajnega steklenega lameliranega nosilca [23].	8
Slika 8: Slika običajnega steklenega lameliranega nosilca [20].	9
Slika 9: Primer hibridnega lameliranega steklenega nosilca [21].	9
Slika 10: Idejna zasnova steklenega mosta v Delftu [16].	10
Slika 11: Lom stekla zaradi lokalnih geometrijskih nepopolnosti ter prikaz statičnih sistemov, ki so se zaradi omenjenih nepopolnosti razvili [16].	11
Slika 12: Predvidena porušitev loka zaradi premajhne togosti vmesnih plasti a) in predvidena porušitev loka zaradi prevelike togosti vmesnih plasti b) [16].	11
Slika 13: Stekleni nosilec v obliki loka s strižno odporno geometrijo iz univerze v Delftu [16].	12
Slika 14: Primer suhega povezovanja steklenih elementov [19].	13
Slika 15: Referenčni AB nosilec iz magistrskega dela »Utrditev upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca s kompozitnimi CFRP lamelami [17].	14
Slika 16: Geometrija prečnega prereza steklenega nosilca [mm].	16
Slika 17: Geometrija steklenega nosilca z obtežbo in podpiranjem [mm].	16
Slika 18: Skica preizkušanca za analizo nosilnosti povezave EVA folije ali UV lepila s steklom.	17
Slika 19: Strižni preizkušanec z EVA folijo.	18
Slika 20: Strižni preizkušanec z UV lepilom.	19
Slika 21: Debelina vmesne povezovalne plasti: EVA folija (levo) in UV lepilo (desno).	19
Slika 22: Pogled na postavitev strižnega testa pred izvedbo preiskave.	20
Slika 23: Prikaz detajlov strižnega testiranja preizkušancev.	21
Slika 24: Porušitev strižnega preizkušanca, lepljenega z EVA folijo.	22
Slika 25: Strižna porušitev preizkušanca z UV lepilom.	23
Slika 26: Rezultat strižnega preizkušanja za preizkušanec z EVA folijo.	24
Slika 27: Rezultat strižnega preizkušanja za preizkušanec z UV lepilom.	25
Slika 28: Preizkušanec za testiranje nosilnosti steklenih vlaken.	27
Slika 29: Vpetje preizkušanca za natezni test steklenih vlaken a) in detajl vpetja b).	27
Slika 30: Odziv steklenih vlaken v nateznem preizkusu.	28

Slika 31: Začetek trganja steklenih vlaken a) in dokončna porušitev steklenih vlaken b).	29
Slika 32: Slika prereza preizkušanca iz steklenih vlaken pod mikroskopom.	30
Slika 33: Računalniško obdelana slika prereza preizkušanca iz steklenih vlaken pod mikroskopom. ...	30
Slika 34: Povečan prikaz prereza preizkušanca iz steklenih vlaken.	31
Slika 35: Priprava preizkušancev na tlačni test ter porušeni vzorci.	32
Slika 36: Stekleni nosilec, sestavljen iz posameznih steklenih elementov.	33
Slika 37: Načrt steklenega nosilca, sestavljenega iz posameznih steklenih elementov.	33
Slika 38: Steklена vlakna ter končne plošče za prednapetje.	34
Slika 39: Celoten model steklenega nosilca skupaj s podporami.	34
Slika 40: Delitev enega izmed steklenih elementov na ustrezne particije.	35
Slika 41: Posamezni koraki reševanja numeričnega problema.	36
Slika 42: Definicija posameznih inkrementov znotraj koraka.	36
Slika 43: Vrste posameznih interakcij med površinami.	37
Slika 44: Mesta predpisanih robnih pogojev.	38
Slika 45: Razporeditev končnih elementov po prerezu nosilca.	39
Slika 46: Opazovana točka pomikov T ter pomembni prerezi A-A, B-B in C-C.	40
Slika 47: Vertikalni pomik nosilca v odvisnosti od časa v točki T (do časovnega koraka 3,0 s).	40
Slika 48: Vertikalni pomiki U2 [mm] nosilca po prednapenjanju.	41
Slika 49: Sila prednapetja v odvisnosti od vertikalnega pomika nosilca v točki T.	41
Slika 50: Sile [N] v prerezu nosilca A-A po prednapenjanju.	42
Slika 51: Momenti [Nmm] v prerezu nosilca A-A po prednapenjanju.	42
Slika 52: Napetosti S33 [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza A-A po prednapenjanju.	43
Slika 53: Napetosti S33 [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza B-B po prednapenjanju.	43
Slika 54: Napetosti S33 [MPa] na mestu nosilca, kjer preko končnih plošč vnašamo silo prednapetja v fazi končanega prednapenjanja.	44
Slika 55: Vertikalni pomik nosilca v odvisnosti od časa v točki T.	45
Slika 56: Vertikalni pomik U2 [mm] nosilca po vsiljevanju pomikov.	45
Slika 57: Vertikalni pomik nosilca v točki T, v odvisnosti od sile, ki je za izvedbo pomika potrebna.	46
Slika 58: Sile [N] v prerezu nosilca A-A po vsiljevanju pomikov.	47
Slika 59: Momenti [Nmm] v prerezu nosilca A-A po vsiljevanju pomikov.	47
Slika 60: Sile [N] v prerezu nosilca C-C po vsiljevanju pomikov.	47
Slika 61: Napetosti S33 [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza A-A po vsiljevanju pomikov.	48
Slika 62: Odpiranje spodnje cone na mestu stikovanja steklenih elementov v prerezu A-A.	48
Slika 63: Tlačna napetost na zg. robu nosilca v prerezu A-A v odvisnosti od vertikalnega pomika v točki T.	49

Slika 64: Napetosti S33 [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza nosilca B-B po vsiljevanju pomikov.	49
Slika 65: Razvoj napetosti na sp. robu nosilca v prerezu B-B v odvisnosti od vertikalnega pomika v točki T.	50
Slika 66: Napetosti S33 [MPa] na mestu nosilca, kjer preko končnih plošč vnašamo silo prednapetja v fazi končnega vsiljevanja pomikov.	51
Slika 67: Razvoj napetosti ob vpetju steklenih vlaken v odvisnosti od vertikalnega pomika nosilca v točki T.	51
Slika 68: AB prerez, zasnovan za primerjavo nosilnosti s steklenim nosilcem.	53

»Ta stran je namenoma prazna.«

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Steklo je material, ki ga človek pozna že zelo dolgo. Zgodovinarji ocenjujejo, da se umetno izdelano steklo v zgodovini človeka pojavi že okoli 5000 let pred našim štetjem. Gre za eno izmed najstarejših gradiv, narejenih s strani človeka. Na začetku se je uporabljalo za nakit, orodje in orožje. Relativno hitro pa se je začela tudi uporaba stekla v gradbeništvu. Zgodovinski zapisi pričajo o prvih zastekljenih odprtinah že v času Rimskega cesarstva [1].

Za podrobnejšo analizo stekla kot konstrukcijskega materiala sem se odločil predvsem zaradi izstopajoče tlačne trdnosti stekla ter zaradi izjemno visoke natezne trdnosti stekla v obliki steklenih vlaken. Namen magistrske naloge je bil predstaviti in analizirati steklo kot konstrukcijski material in ga primerjati z najbolj široko uporabljenim materialom v gradbeništvu, z betonom oz. armiranim betonom. Leta 2017 je Martin Klun v svoji magistrski nalogi »Utrditev upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca s kompozitnimi CFRP lamelami« [17] analiziral upogibni armiranobetonski nosilec. Ideja magistrske naloge je bila izdelati in analizirati stekleni oz. prednapeti stekleni upogibni nosilec in ga primerjati z rezultati armiranobetonskega upogibnega nosilca, ki so bili pridobljeni v okviru omenjene magistrske naloge.

Cilji magistrske naloge so bili raziskati steklo kot konstrukcijski material, poiskati njegove prednosti in slabosti ter skozi analizo steklenega nosilca ugotoviti, ali je steklo možno oziroma smiselno v posebnih primerih uporabiti zgolj v konstrukcijske namene. Namen je bil izvesti numerično analizo steklenega upogibnega prednapetega nosilca, skupaj s spremljevalnimi eksperimentalnimi preiskavami tako, da bo možno v potencialnem nadaljevanju te študije s pomočjo pridobljenih rezultatov izdelati stekleni nosilec polne velikosti in ga eksperimentalno analizirati.

2 STEKLO

2.1 Kaj je steklo in katere vrste poznamo

S pojmom steklo definiramo katerokoli nekristalinično trdnino (amorfno trdnino), za katero je značilna temperatura steklastega prehoda. Takim materialom pravimo tudi nepopolne trdnine ali super ohlajene tekočine. Steklo je v večji meri narejeno iz kremenovega peska oz. silicijevega dioksida SiO_2 . Kremenov pesek ima relativno visoko tališče pri okoli $1600\text{ }^\circ\text{C}$ in zaradi tega se pri izdelavi stekla uporabljamo dodatke. Običajno dodajamo sodo oz. natrijev karbonat Na_2CO_3 (pridobljen iz soli in apnenca) za nižanje temperature tališča na okoli $1300\text{--}1500\text{ }^\circ\text{C}$. Soda je topna v vodi in da preprečimo njeno topnost, moramo, poleg natrijevega karbonata, dodajati tudi kalcijev oksid CaO (apno), ki ta efekt prepreči. Takšno steklo imenujemo natrij kalcijevo silikatno steklo oz. natrijevo steklo (Na-Ca-SiO_4) in predstavlja 90 % vsega proizvedenega stekla. Poznamo pa tudi druga stekla, npr. borosilikatno steklo, ki namesto kalcijevega oksida vsebuje borov trioksid B_2O_3 , ki pripomore k odpornosti stekla na kemikalije ter hitre spremembe temperature. Preglednica 1 prikazuje kemijsko sestavo stekla s prikazom deleža posameznih surovin, ki jih najdemo v steklu [2], [3].

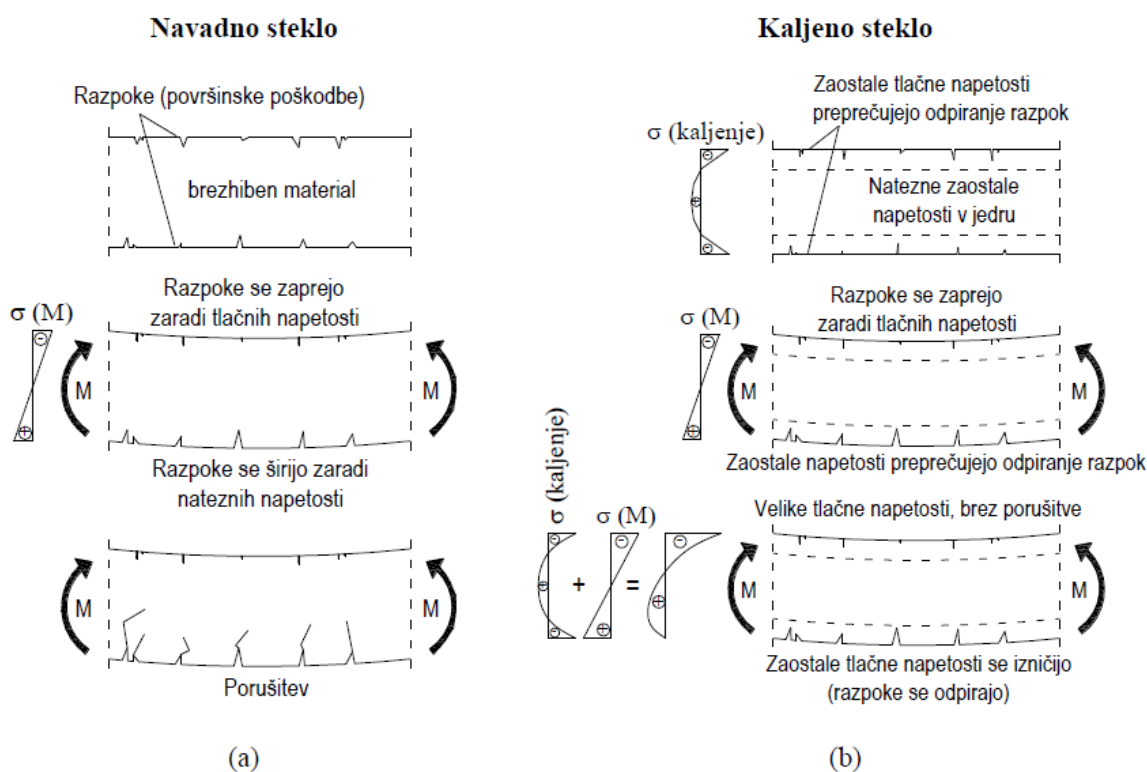
Preglednica 1: Kemijska sestava stekla [2].

Kemijska sestava (ime in oznaka)	Natrij kalcijevo silikatno steklo	Borosilikatno steklo
Kremenov pesek, SiO_2	69–74 %	70–87 %
Apnenec, CaCO_3	5–14 %	/
Natrijev karbonat, Na_2CO_3	10–16 %	0–8 %
Borov oksid, B_2O_3	/	7–15 %
Kalijev oksid, K_2O	/	0–8 %
Magnezijev oksid, MgO	0–6 %	/
Aluminijev oksid, Al_2O_3	0–3 %	/
Ostali dodatki (železo, titan, svinec)	0–5 %	0–8 %

2.2 Kaljenje stekla

Postopek kaljenja stekla inducira tlačne oz. zaostale napetosti na površini stekla, kjer so v splošnem prisotne mikro razpoke. Za doseganje ravnotežja znotraj prereza pa se v notranjosti, ki je brez razpok, pojavijo natezne napetosti. S postopkom kaljenja tako zmanjšamo vpliv in velikost površinskih mikro razpok in jim hkrati preprečujemo širjenje. S postopkom kaljenja steklu izboljšamo upogibno nosilnost, saj so površinske razpoke izpostavljene tlačnim silam, katere je pri obremenjevanju najprej

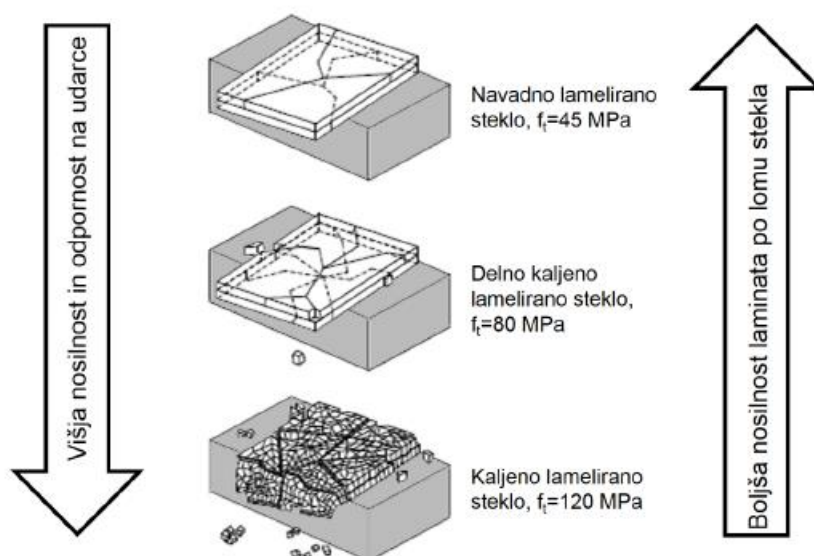
potrebno z obtežbo premagati, preden se razpoke sploh začnejo odpirati. Med kaljenjem pa se z vzpostavitvijo ravnovesja med tlačnimi in nateznimi napetostmi nakopiči veliko energije, ki se ob porušitvi ravnovesja sprosti eksplozivno po celotnem volumnu in povzroči razpad steklenega elementa. Na sliki 1 je prikazana primerjava razvoja napetosti in razpok po višini upogibno obremenjenega elementa za navadno in za kaljeno steklo [3].



Slika 1: Primerjava razvoja napetosti in razpok upogibno obremenjenega elementa iz navadnega in kaljenega stekla [3].

2.3 Lamelirano steklo

Poleg osnovne ali začetne nosilnosti stekla je zelo pomembno zagotavljati tudi določeno nosilnost stekla po nastanku razpok. To lahko dosežemo z lepljenjem več posameznih tanjših plasti stekla. Običajno za povezovanje posameznih plasti uporabljamo plasti tanke folije iz polivinil butirala (PVB) ali pa etilen vinil acetata (EVA). Z vmesnimi povezovalnimi plastmi dosežemo, da že poškodovano ali razpokano steklo ostane na svojem mestu in zato lahko računamo na določen nivo nosilnosti kljub razpokanosti stekla. Na obnašanje lameliranega stekla pa pomembno vpliva tudi že omenjeno kaljenje stekla. Slika 2 prikazuje obnašanje lameliranega stekla v odvisnosti od stopnje kaljenja stekla [3].

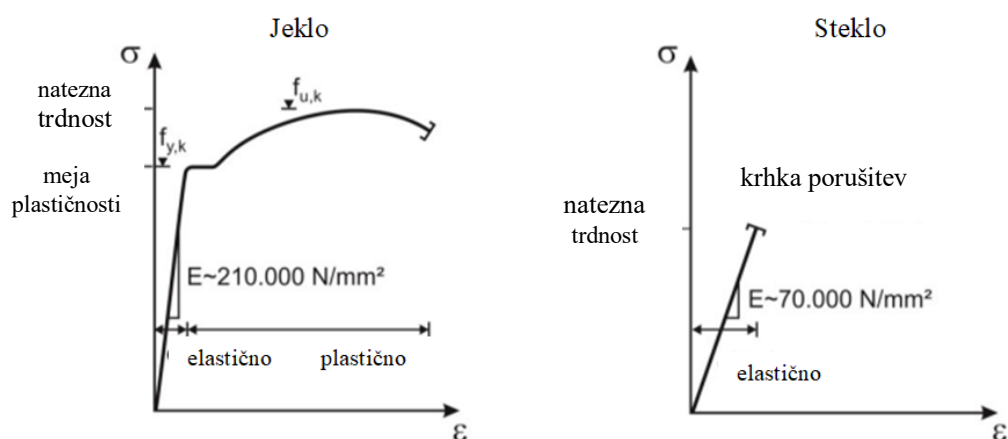


Slika 2: Obnašanje lameliranega stekla s PVB folijo po porušitvi v odvisnosti od stopnje kaljenja stekla [3].

2.4 Mehanske karakteristike

2.4.1 Steklo

Steklo je material, ki se obnaša linearno elastično skoraj do porušitve. Ima zelo visoko tlačno trdnost, cca. 1000 MPa, kar je za 30-krat več od povprečnega betona. V primerjavi z betonom ima zelo podobno specifično težo (25 kN/m^3), a skoraj 2-krat večji elastični modul (70 GPa). Ima tudi zelo visoko teoretično natezno trdnost, cca. 5000 MPa. Zaradi mikro razpok in ostalih površinskih nepravilnosti pa je dejanska natezna trdnost bistveno manjša in znaša med 30 MPa in 80 MPa (sicer odvisno od vrste stekla, v primeru borosiliktnega stekla tudi do 120 MPa), kar pa je dejansko primerljivo s tlačno trdnostjo betona. Slika 3 prikazuje odnos med napetostmi in deformacijami za steklo in konstrukcijsko jeklo. Primerjava obnašanja stekla z ostalimi materiali (npr. jeklom) jasno kaže njegovo veliko pomanjkljivost. Steklo je izrazito krhek material in ni sposoben prenašati plastičnih deformacij. Ravno zaradi tega je uporaba stekla v konstrukcijske namene zelo zahtevna, oz. morajo biti varnostni faktorji pri uporabi stekla zelo visoki. Poleg tega prihajajoči novi standard Evrokod 10 (EN 19100), ki bo pokrival projektiranje konstrukcijskega stekla, predvideva obravnavo in kontrolo dodatnih mejnih stanj, poleg mejnih stanj nosilnosti in uporabnosti. Gre za vpeljavo mejnega stanja med nastankom razpok in mejnega stanja po nastanku razpok. V bistvu gre za projektiranje robustnosti konstrukcije, pri kateri je potrebno predvideti porušitev steklenega elementa iz kateregakoli neznanega razloga ter na osnovi tega predvideti nadaljnje varno obnašanje konstrukcije. Preglednica 2 prikazuje fizikalne in materialne karakteristike stekla [4], [5], [6], [24].



Slika 3: Odnos med napetostmi in deformacijami za konstrukcijsko jeklo in steklo [4].

Preglednica 2: Fizikalne in materialne karakteristike stekla [5].

Specifična teža [γ]	25 kN/m ³
Modul elastičnosti [E]	70 GPa
Strižni modul [G]	28 GPa
Poissonov količnik [ν]	0,23
Trdota po Mohsovi lestvici	6
Temperaturni razteznostni koeficient [α_T]	9*10 ⁻⁶ K ⁻¹
Natezna trdnost [f_t , steklo]	45 MPa
Tlačna trdnost [f_c , steklo]	800–1000 MPa

2.4.2 Steklana vlakna

Steklana vlakna imajo zelo veliko natezno trdnost, ki se lahko približa teoretični natezni trdnosti stekla. S steklenimi vlakni dosegamo natezne trdnosti tudi preko 3000 MPa (npr. E-steklo 3500 MPa). Za primerjavo: pri običajnem armaturnem jeklu lahko govorimo o natezni trdnosti okoli 700 MPa, pri jeklenih kablji za prednapenjanje pa o natezni trdnosti do okoli 2000 MPa. Razlog, zakaj lahko s steklom v obliki vlaken dosegamo tako visoke natezne trdnosti, se skriva v načinu izdelave. Steklo je namreč zelo občutljivo na površinske napake oz. poškodbe. Mikro razpoke v običajnem steklu predstavljajo oslabitve in s tem lokalne koncentracije napetosti, zaradi katerih se razpoke progresivno odpirajo in vodijo v končno porušitev steklenega elementa. V primeru steklenih vlaken, ki so izdelana s postopkom vlečenja, pa se površinske mikro razpoke odstranijo. Poleg tega pa so prerezi steklenih vlaken zelo majhni (nekaj μm) in zato prostora za napake v obliki površinskih mikro razpok pravzaprav ni [7], [8].

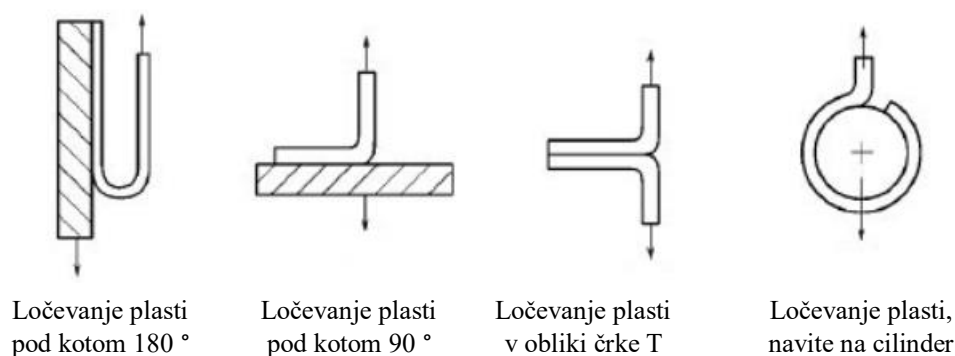
2.5 Lepljenje stekel

V prvi vrsti se stekla lepijo zaradi varnosti in nosilnosti po nastanku razpok. V mojem primeru, kjer sem obravnaval izdelavo steklenega nosilca, pa je bilo potrebno razmisliti o lepljenju steklenih elementov predvsem zaradi finančno-tehničnih in izvedbenih razlogov glede velikosti oz. debeline posameznih steklenih elementov. Na tržišču obstaja več različnih načinov lepljenja stekel. Dva možna načina za lepljenje oz. spajanje stekel sta uporaba EVA folije ter UV lepil. Omenjeni tehniki sem se odločil podrobneje raziskati tudi preko eksperimentalnih preiskav (točka 5.1).

EVA folija (slika 4) ali etilen vinil acetatna folija je folija, ki omogoča spajanje steklenih elementov (običajno uporabljena za izdelavo lameliranega stekla). Folija je popolnoma prozorna, odporna na atmosferske vplive, kot so vlaga in UV svetloba, ter omogoča spajanje različnih vrst stekel. Za potrebe eksperimenta, ki je predstavljen v nadaljevanju, sem uporabil EVA folijo italijanskega proizvajalca Satinal, natančneje tip folije Extra chiaro. Za to magistrsko nalogo je najpomembnejši podatek oprijem folije na steklo. Proizvajalec podaja podatek v meri N/cm, ki ga je pridobil s tako imenovanim »peel off« testom. Gre za test, pri katerem merimo, kakšno silo potrebujemo, da ločimo (v tem primeru) EVA folijo in steklo, pri tem pa je kot ločevanja plasti enak 180° . Za takšen test proizvajalec navaja podatek prijemljivosti >150 N/cm. Slika 5 prikazuje različne možne pristope »peel off« testa [9], [10], [11].



Slika 4: EVA folija ali etilen vinil acetatna folija [11].



Slika 5: Različni pristopi testiranja ločevanja povezovalnih plasti [12].

UV lepljenje je lepljenje, pri katerem uporabljamo enokomponentno lepilo, ki ga aktiviramo s pomočjo ultravijolične svetlobe, pod vplivom katere lepilo otrdi in poskrbi za spajanje elementov. UV lepila (slika 6) omogočajo spajanje stekla z vrsto drugih materialov, najbolj pogosto pa se uporabljajo za lepljenje stikov steklo – steklo ali kovina – steklo. UV lepila so podobna kot EVA folije popolnoma prozorna. Za moje eksperimente je proizvajalec testnih elementov uporabljal Bohle UV lepilo, in sicer vrsto lepila LV 740, ki ima deklarirano strižno trdnost 17 MPa [13], [14], [15].

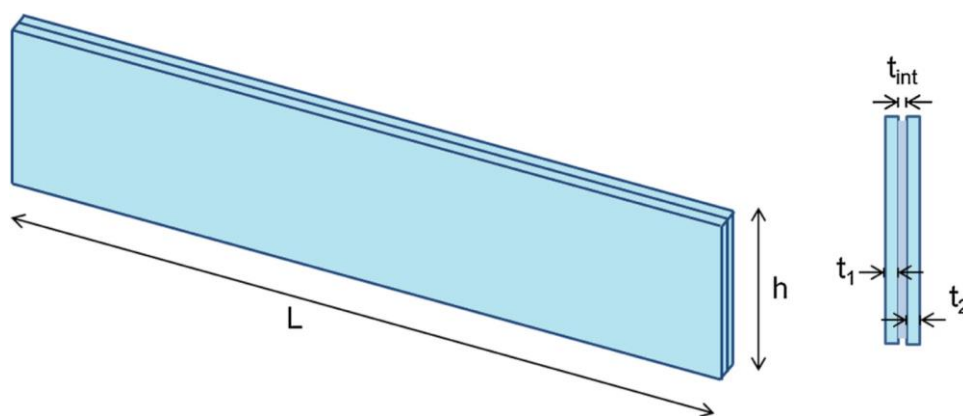


Slika 6: UV lepilo [15].

3 PREGLED OBSTOJEČEGA STANJA LITERATURE NA PODROČJU STEKLENIH NOSILCEV

3.1 Splošno o steklenih nosilcih

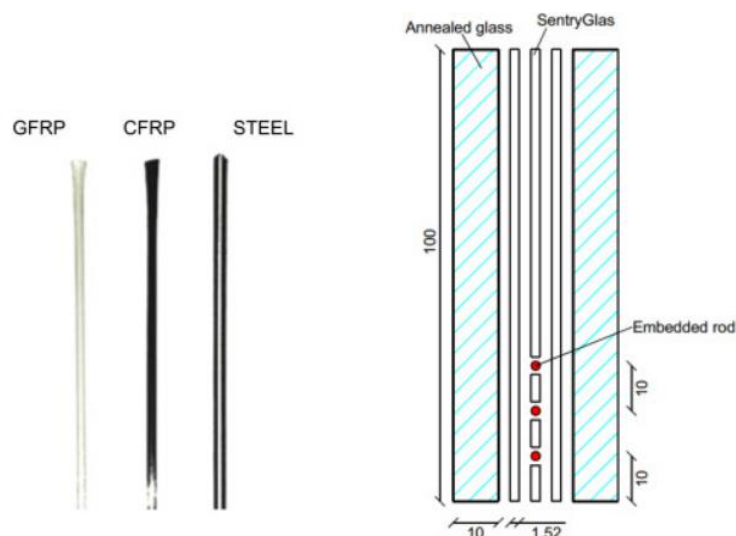
Kadar se pogovarjamo o steklenih nosilcih, imamo običajno v mislih lamelirane steklene nosilce, kot je prikazano na slikah 7 in 8. Pri takšnih steklenih nosilcih je potrebno dodatno pozornost med drugim nameniti bočni zvrnitvi nosilca, saj so lamelirani stekleni nosilci običajno zelo vitki. Poleg običajnih lameliranih steklenih nosilcev pa lahko govorimo tudi o steklenih nosilcih (hibridnih steklenih nosilcih), pri katerih, poleg stekla, uporabljamo tudi druge materiale. Gre za kombinacijo stekla in drugih materialov, kot so karbonska in steklena vlakna ter palice, jekleni trakovi, lepila itd. (slika 9). Namen uporabe teh materialov je predvsem dodatno povečanje odpornosti, robustnosti in togosti steklenih nosilcev. Pri steklenih nosilcih in steklu na splošno se pogosto sprašujemo tudi, na kakšno nosilnost lahko računamo po nastanku razpok v steklu. V okviru članka »Enabling a Ductile Failure of Laminated Glass Beams with Iron-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) Strips« [22] so s pomočjo uporabe trakov iz spominske zlitine na osnovi železa, ki so prilepljeni na tlačno in natezno cono steklenega nosilca, omogočili duktilno porušitev sistema oz. nosilnost po začetnem lomu stekla, kar je za uporabo stekla v gradbeništvu izjemnega pomena [21], [22].



Slika 7: Skica običajnega steklenega lameliranega nosilca [23].



Slika 8: Slika običajnega steklenega lameliranega nosilca [20].



Slika 9: Primer hibridnega lameliranega steklenega nosilca [21].

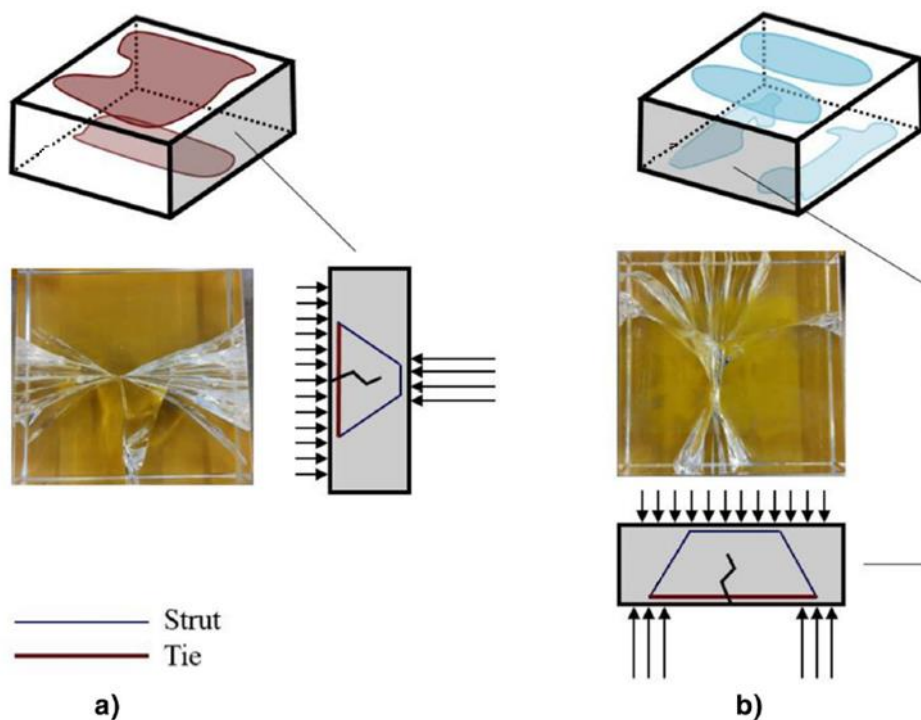
3.2 Raziskave za konstruiranje steklenega mosta v Delftu

Na področju raziskovanja možnosti uporabe stekla v konstrukcijske namene je bila leta 2018 na Tehniški univerzi v Delftu narejena obsežna raziskava, v kateri so preizkušali koncept popolnoma steklenega mosta za pešce. Raziskave so bile le na raziskovalni ravni za načrtovanja mostu v polni velikosti s 14-metrskim razponom. Slika 10 prikazuje idejno zasnovo mostu [16].



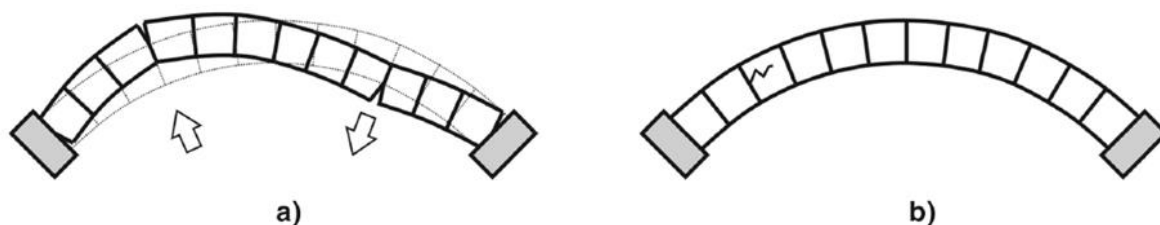
Slika 10: Idejna zasnova steklenega mosta v Delftu [16].

Ideja je bila ustvariti most v obliki loka in pri tem kar se da izkoristiti potencial visoke tlačne trdnosti stekla. Odločili so se za pristop uporabe litega stekla in most sestaviti iz posameznih sestavnih delov. Zaradi načina izdelave steklenega loka so potrebovali vmesno povezovalno plast med posameznimi bloki stekla (podobno, ko pri zidanju uporabljamo malto, ki povezuje posamezne zidake v zid). V okviru raziskav so preiskovali različne vrste in debeline vmesnih plasti, polivinilklorida (PVC), poliuretanskega lepila PU70 ter poliuretanskega lepila PU90. Problem pri steklu so lokalne napetosti oz. lokalne konice napetosti, ki jih povzročijo že najmanjše geometrijske nepravilnosti. Steklo je namreč krhek material, ki ni sposoben plastičnega deformiranja. Tudi v primeru testiranja steklenih elementov v Delftu, kjer je bilo lito steklo naknadno obdelano s CNC stroji z visoko natančnostjo, je prihajalo do teh težav. Zaradi teh majhnih geometrijskih nepopolnosti je prihajalo do koncentriranih tlačnih in nateznih napetosti. Tlačne napetosti načeloma niti niso problem, saj imamo pri steklu vsaj v teoriji, kar se tiče tlačnih napetosti, dovolj rezerve. Problem so natezne napetosti. Slika 11 prikazuje preizkušance, ki so se porušili zaradi prisotnosti nateznih napetosti, ki so posledica geometrijskih nepopolnosti. Na sliki 11 a) zgoraj ter 11 b) zgoraj vidimo razporeditev lepila, ki se je kot posledica geometrijskih nepopolnosti na spodnjem robu koncentriralo le na sredini elementa v primeru 11 a) oz. lokalno ob robovih na zgornjem robu v primeru elementa 11 b). Ob idealnem sistemu bi bila razporeditev lepila enakomerna preko celotne površine elementa. Zaradi neenakomerne razporeditve lepil (vmesnih povezovalnih plasti) je v elementih prišlo do lokalno koncentriranih napetosti. Na sliki 11 a) in 11 b) lahko vidimo tudi shematsko prikazan statični sistem, ki se je znotraj elementov ustvaril kot posledica nepravilnih oz. neravnih površin elementov. Ocenjene natezne napetosti na mestih porušitve so znašale okoli 70 MPa [16].



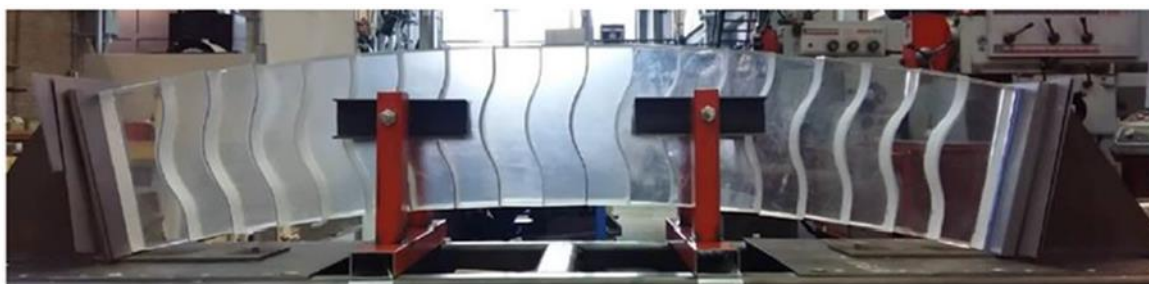
Slika 11: Lom stekla zaradi lokalnih geometrijskih nepopolnosti ter prikaz statičnih sistemov, ki so se zaradi omenjenih nepopolnosti razvili [16].

Koncept mostu temelji na ideji loka, kjer je celotna konstrukcija v tlaku. Kot že omenjeno, pa je bilo, poleg samega stekla, ključno obnašanje vmesnih povezovalnih plasti, ki bi lahko bistveno vplivale na togost konstrukcije. V okviru raziskave so tako predvideli dva ključna možna mehanizma za porušitev loka. Slika 12 a) prikazuje predvideno porušitev loka zaradi premajhne togosti vmesnih plasti, slika 12 b) pa prikazuje predvideno porušitev loka zaradi prevelike togosti vmesne plasti (plasti, ki ne bi omogočila ustreznega prenosa sile in bi povzročila lokalne konice napetosti) [16].



Slika 12: Predvidena porušitev loka zaradi premajhne togosti vmesnih plasti a) in predvidena porušitev loka zaradi prevelike togosti vmesnih plasti b) [16].

Poleg prenosa obremenitev preko tlačnih napetosti je bilo potrebno zagotoviti tudi strižno odporno geometrijo ter poskrbeti za bočno stabilnost. Bočna stabilnost v okviru omenjene raziskave ni bila obravnavana, eksperimentalno pa je bilo bočno podpiranje zagotovljeno s preprostimi bočnimi jeklenimi podporami (kar je razvidno tudi s slike 13). Strižne napetosti med posameznimi elementi pa so se prenašale preko namensko oblikovane strižno odporne geometrije, ki jo lahko vidimo na sliki 13. Vsak posamezen del, ki sestavlja lok, je oblikovan s posebno izboklino na eni in vdolbino na drugi strani, ki poskrbita za medsebojno zaklinjanje elementov. Na izvedbeni ravni se je pokazalo, da je precizna izdelava takšne geometrije zelo pomembna, saj lahko vsaka najmanjša nepravilnost povzroči lokalne konice napetosti [16].



Slika 13: Stekleni nosilec v obliki loka s strižno odporno geometrijo z univerze v Delftu [16].

Preiskave na Tehniški univerzi v Delftu odpirajo zanimiva vprašanja, kako zasnovati in uporabiti materiale za medsebojno povezovanje steklenih elementov. Uporabljen povezovalna plast mora biti dovolj toga za prenos obremenitve, a hkrati dovolj prožna, da se lahko do neke mere prilagodi površini stekla in omili posledice geometrijskih nepopolnosti.

3.3 Raziskave na področju vmesnih povezovalnih plasti za steklene elemente v tlaku

Zaradi dominantno visoke tlačne trdnosti stekla in želje po čim boljšem izkoriščanju te lastnosti je potrebno posebno pozornost nameniti manj ugodni natezni trdnosti stekla ter njegovi krhkosti. Stik steklo – steklo je namreč neugoden za prenos tlačnih sil, saj se bodo v steklu ob najmanjših nepravilnostih stične površine začele razvijati natezne napetosti, ki bodo zelo hitro povzročile razpoke. Obstaja torej potreba po vmesnih plasteh, ki bodo lahko uspešno prenašale tlačne obremenitve iz enega steklenega elementa na drugega in hkrati varovale steklo pred nastankom razpok. Raziskave, ki so usmerjene v raziskovanje primernih vmesnih povezovalnih plasti za steklene elemente, so tako ključnega pomena za nadaljnji razvoj uporabe steklenih elementov v tlaku. V obstoječih raziskavah lahko zasledimo, da se za vmesno plast med steklenimi elementi in (običajno) jeklenimi elementi eksperimentalnih naprav pogosto uporabljajo različni materiali, kot so različni polimeri, aluminij, svinec, les itd. Omenjeni materiali zagotavljajo tako imenovano suho povezavo, ki pa običajno, razen

za izjemo eksperimentalnih testov, ni primerna za vsesplošno uporabo. Poleg omenjenih materialov pa lahko za povezovanje steklenih elementov uporabljamo tudi akril, polivinilkloride (PVC), polikarbonat in Surlyn. Surlyn je prozoren termoplastični material, ki ga proizvaja podjetje Dow Corporation. Surlyn se pogosto uporablja za proteze ter se odlikuje po visoki trdnosti, vzdržljivosti in dobri odpornosti na kemično agresivna okolja. V okviru članka »Experimental Investigation of a Transparent Interface Material for Glass Compression Members« [18] je za potrebe izgradnje popolnoma steklenega mostu za pešce izvedena raziskava vmesnih povezovalnih plasti, v ospredju katere je Surlyn [18].

V zadnjem času pa lahko zasedimo tudi raziskave vmesnih povezovalnih plasti, ki zagotavljajo le, že prej omenjeno, suho povezavo elementov. Ob pametni zasnovi steklenih elementov s posebno geometrijo posameznih sestavnih delov, ki omogočajo medsebojno zaklinjanje, ne potrebujemo vmesnih plasti, ki bi aktivno povezovali steklene elemente. V okviru članka »An Interlayer Material Study Towards Circular, Dry-Assembly, Interlocking Cast Glass Block Structures« [19] so raziskani določeni materiali, kot so mehke kovine, neopren in hibridni materiali, ki bi bili lahko primerni za izvedbo suhega povezovanja elementov. Slika 14 prikazuje eno izmed možnih geometrij za suho sestavljanje elementov z vmesno plastjo iz poliuretana. Ideja o tem, zakaj bi želeli imeti steklene konstrukcijske elemente, v katerih bi bile prisotne le suhe povezave, je več. Ena izmed prednosti takšnega sistema je način gradnje, ki je lahko relativno enostaven in hiter. Poleg tega takšen sistem gradnje, kjer posamezni stekleni elementi niso spojeni skupaj z lepili, omogoča popolno in enostavno reverzibilnost gradbenega procesa [19].



a)



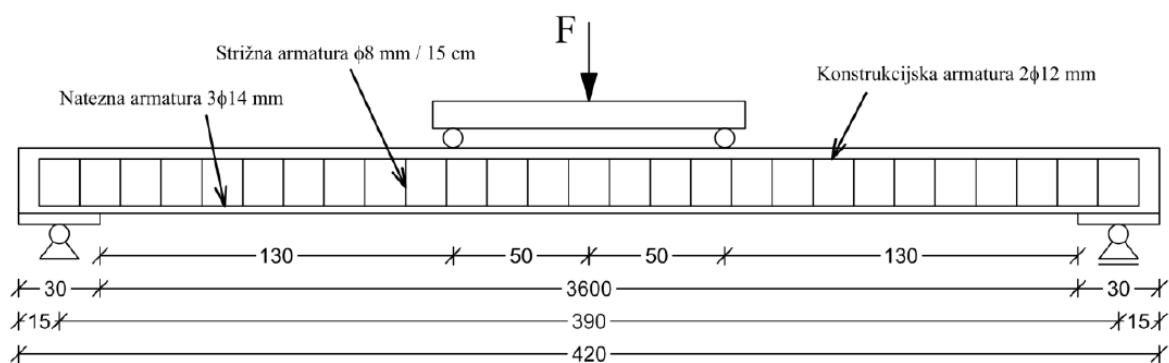
b)

Slika 14: Primer suhega povezovanja steklenih elementov [19].

4 RAZVOJ KONCEPTA UPOGIBNEGA PREDNAPETEGA NOSILCA

Ideja magistrske naloge je izdelati in analizirati stekleni nosilec, poiskati njegove prednosti in slabosti ter ga primerjati s primerljivim armiranobetonskim nosilcem. Koncept za predlagan nosilec je izdelan na osnovi dejstva, da je tlačna trdnost stekla zelo visoka in znaša do 1000 MPa, kar je okoli 30-krat več kot pri betonu. Poleg tega natezna trdnost steklenih vlaken znaša do 3500 MPa, kar je okoli 5-krat več kot znaša povprečna natezna trdnost jekla in se jo da s pridom izkoristiti z uporabo v natezni coni konstrukcijskega elementa. Če nam uspe združiti takšne mehanske karakteristike v enem konstrukcijskem elementu, kot je npr. stekleni nosilec, bi morda konstrukcijski elementi iz stekla potencialno dobili nek smisel in več pozornosti tudi v širši gradbeni stroki.

Pri snovanju nosilca sem se najprej odločil, da želim posnemati dimenzije armiranobetonskega nosilca (slika 15) iz, v uvodu omenjenega, magistrskega dela »Utrditev upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca s kompozitnimi CFRP lamelami«. Cilj uporabe enakih dimenzij eksperimentalno in numerično analiziranega AB nosilca je bil enostavnejša primerjava z analiziranim steklenim nosilcem. Predvidene dimenzije prereza naj bi tako znašale 160 mm x 240 mm, dolžina elementa pa naj bi bila 4,20 m (oz. 3,90 m med podporami).

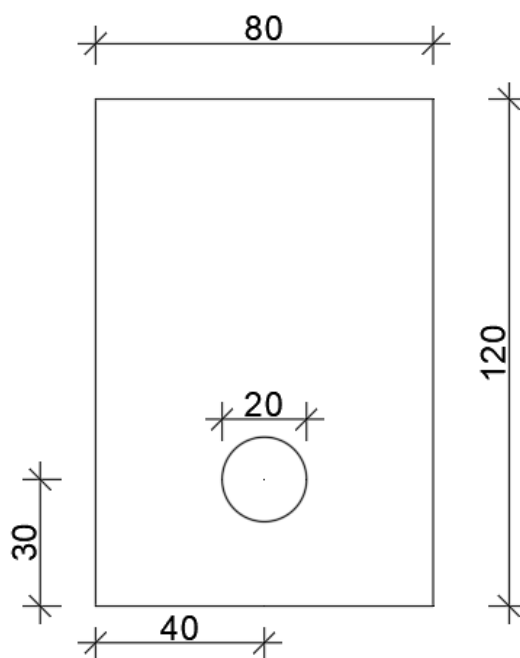


Slika 15: Referenčni AB nosilec iz magistrskega dela »Utrditev upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca s kompozitnimi CFRP lamelami2 [17].

Najprej sem moral ugotoviti, kako sploh uporabiti ali pa združiti elemente steklenih plošč in steklenih vlaken. Ideja je bila, da bi stekleni element npr. iz litega stekla prevzemal tlake, kakor je to naloga betona v konstrukcijskih sistemih. Steklена vlakna pa bi bila namenjena za prevzem natezne obremenitve, kar je običajno primarna naloga armaturnega jekla. Na izvedbeni ravni je izdelava takšnega armirano betonskega nosilca relativno preprosta. Zvežemo armaturo, naredimo opaz in vlijemo beton. V primeru steklenega nosilca to ni tako enostavno (vsaj ne v primeru finančnega in

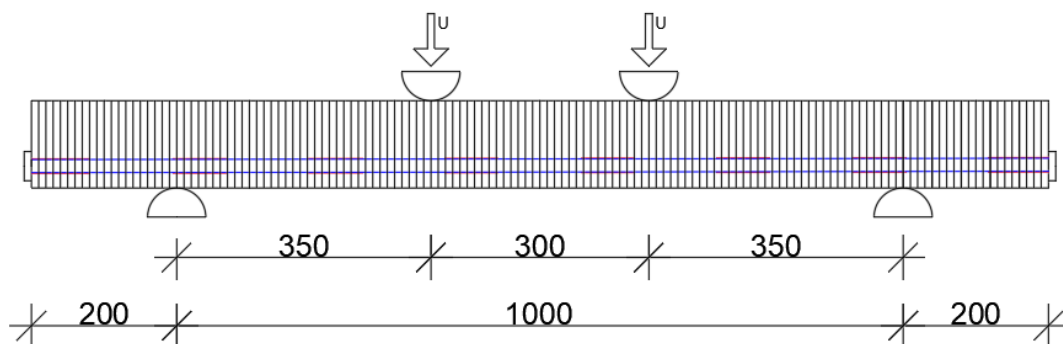
časovnega obsega takšne magistrske naloge). Ideja o uporabi litega stekla je že v osnovi omejena na velikost elementa, ki ga lahko izdelamo z litim steklom. Po zbiranju informacij o možni izdelavi elementov litega stekla bi bilo omenjene dimenzije prereza načeloma možno izdelati, a dolžina bi bila zelo problematična tudi v primeru večjega časovnega in finančnega okvirja. Zato je bilo potrebno razmisliti o izdelavi več posameznih manjših elementov litega stekla, ki bi jih lahko kasneje sestavili/povezali v stekleni nosilec. Glede na zelo visoko predvideno tlačno trdnost stekla se je nekako zdelo smiselno, da bi morda nosilec sestavili tako, da bi ga pravzaprav prednapeli. Dodatno vmesno povezovanje med posameznimi segmenti bi zagotovili z UV lepilom ali EVA folijo. Dejansko bi šlo za koncept podoben prostokonzolni gradnji mostov, kjer so segmenti predfabricirani, pripeljeni na gradbišče in spojeni s preostalim delom konstrukcije s pomočjo prednapetja. Takšen koncept nosilca bi bil tehnološko popolnoma izvedljiv, a zopet so tu še finančni okviri eksperimentalne analize magistrske naloge, katerih ni bilo mogoče preseči, zato sem nosilec še dodatno optimiziral.

Prvotno načrtovanemu prerezu sem najprej zmanjšal dimenzije stranic na polovico. Tako sem dobil prerez 80 mm x 120 mm. Zaradi cenovno najugodnejše opcije sem se odločil nosilec sestaviti iz steklenih plošč debeline 10 mm. V samem prerezu je bilo potrebno dodati še luknjo, skozi katero bodo lahko potekala steklena vlakna za potrebe prednapetja. Odločil sem se za luknjo s premerom 20 mm, ki je od spodnjega roba odmaknjena za 20 mm. Za potrebe prednapetja sem si tako pustil možnost uporabe vrvi iz steklenih vlaken vse do premera cca. 19 mm. Za prenos sile iz vlaken na nosilec pa sem predvidel jeklene ploščice dimenzij 40 mm x 40 mm x 10 mm. Dodatno vmesno povezavo med posameznimi segmenti pa bi zagotavljal ali z EVA folijo ali z UV lepilom. Na sliki 16 je predstavljena geometrija zamišljenega prereza steklenega nosilca.



Slika 16: Geometrija prečnega prereza steklenega nosilca [mm].

Glede na takšno izbiro geometrije sem prerez nosilca zmanjšal na četrtno prvotne površine in zato je bilo edino smiselno zmanjšati tudi predvideno dolžino steklenega nosilca. Nova izbrana dolžina nosilca je tako 1400 mm oz. 1000 mm med podporami (140 elementov debeline 10 mm). Zaradi spremenjene dolžine nosilca sem seveda prilagodil tudi razdaljo med točkami obremenjevanja oz. vsiljevanja pomika na 300 mm. Na sliki 17 je predstavljena predvidena geometrija steklenega nosilca z upoštevanjem korigiranega prereza in debeline posameznih elementov.



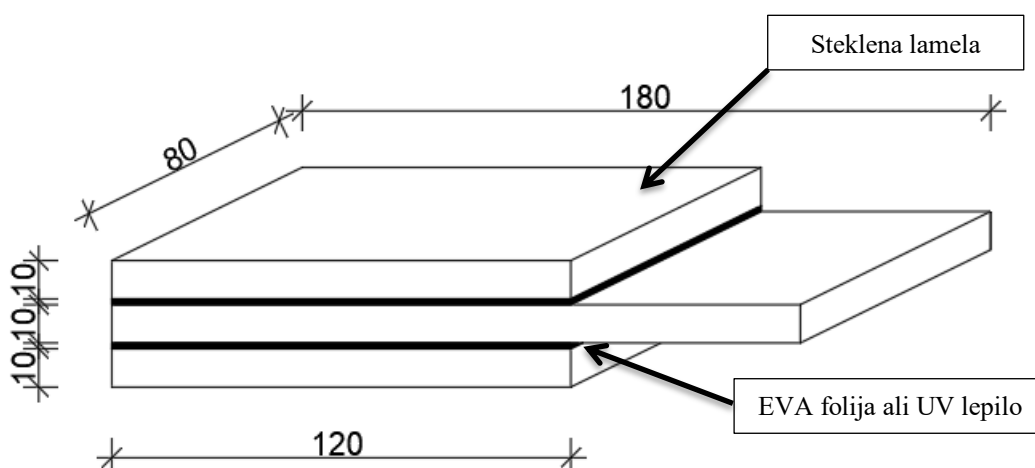
Slika 17: Geometrija steklenega nosilca z obtežbo in podpiranjem [mm].

5 IDEJA SPREMLJEVALNIH PREISKAV IN NJIHOVA IZVEDBA

Vzporedno z izdelavo numeričnega modela sem izvajal tudi določene eksperimentalne preiskave, ki so mi s svojimi rezultati pomagale ustvariti smiselni numerični model. Prvotni plan je obsegal tlačni test steklene kocke, strižni test lepila oz. vmesne povezovalne plasti, natezni test steklenih vlaken ter test elastičnega modula na stekleni prizmi. Zaradi finančno tehničnih omejitev sem moral preiskave nekoliko poenostaviti. Test elastičnega modula na prizmi sem ovrgel. Tlačne teste na steklenih kockah sem zamenjal s tlačnimi testi na steklenih ploščah, ki so bile dimenzijsko enake steklenim ploščam, ki so bile predvidene za izdelavo steklenega nosilca. Strižni test lepila oz. vmesne povezovalne plasti ter natezne teste steklenih vlaken pa sem obdržal.

5.1 Namen in izvedba strižnih testov vmesne povezovalne plasti

V prvotno zasnovanem nosilcu se ob podporah in mestih vsiljevanja pomika razvijejo največje strižne sile. Ob zasnovi eksperimenta se je pojavilo vprašanje, kako bo vmesna povezovalna plast (EVA folija ali UV lepilo) prenesla omenjene strižne obremenitve. Odločil sem se, da je potencialni porušni mehanizem potrebno dodatno raziskati in analizirati. Zasnoval sem relativno preprost model, s katerim smo lahko preizkusili, kako dobro vmesne povezovalne plasti prenašajo strižne obremenitve. Preizkušane na sliki 18 sem testiral tako, da sem na srednjo, daljšo stekleno lamelo vnašal pomik in meril zdrs notranje daljše šipe z zdrsom zunanjih krajših šip. Poleg tega pa sem meril tudi silo, ki je bila potrebna, da se je zdrs med šipami zgodil.



Slika 18: Skica preizkušanca za analizo nosilnosti povezave EVA folije ali UV lepila s steklom.

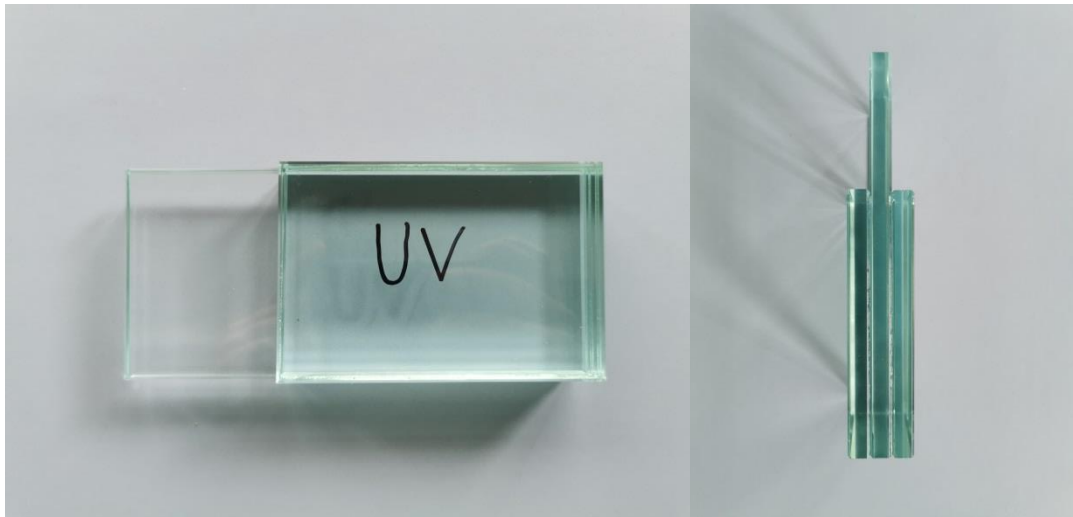
Sliki 19 in 20 prikazujeta dva strižna preizkušanca. Eden je spojen z EVA folijo, drugi pa z UV lepilom. Gre za dve različni vmesni povezovalni plasti, kateri sem predstavil že v točki 2.5. Preglednica 3 prikazuje dimenzije posameznih elementov preizkušanca. Skupna debelina preizkušanca z EVA folijo je znašala 31,34 mm, skupna debelina preizkušanca z UV lepilom pa 30,09 mm. V primeru UV lepila lahko govorimo o praktično zanemarljivi debelini povezovalne plasti, medtem ko v primeru EVA folije njena debelina ni zanemarljiva. Na sliki 21 je jasno vidna tudi debelina ene in druge vmesne povezovalne plasti.

Preglednica 3: Dimenzije posameznih sestavnih elementov strižnih preizkušancev.

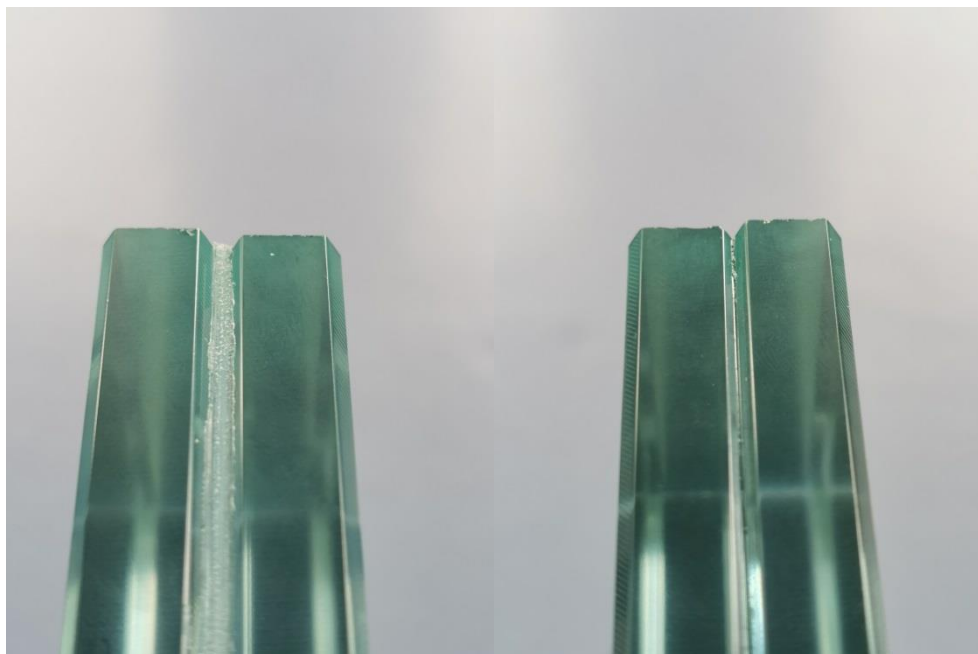
Vrsta vmesne plasti	Širina [mm]	Dolžina [mm]	Debelina [mm]
UV lepilo			
stranska plošča 1	80,95	120,27	10,03
stranska plošča 2	81,01	120,74	9,98
vmesna plošča	80,78	179,26	10,01
EVA folija			
stranska plošča 1	80,98	119,72	9,99
stranska plošča 2	80,79	120,18	10,04
vmesna plošča	81,06	180,41	10,03



Slika 19: Strižni preizkušavec z EVA folijo.

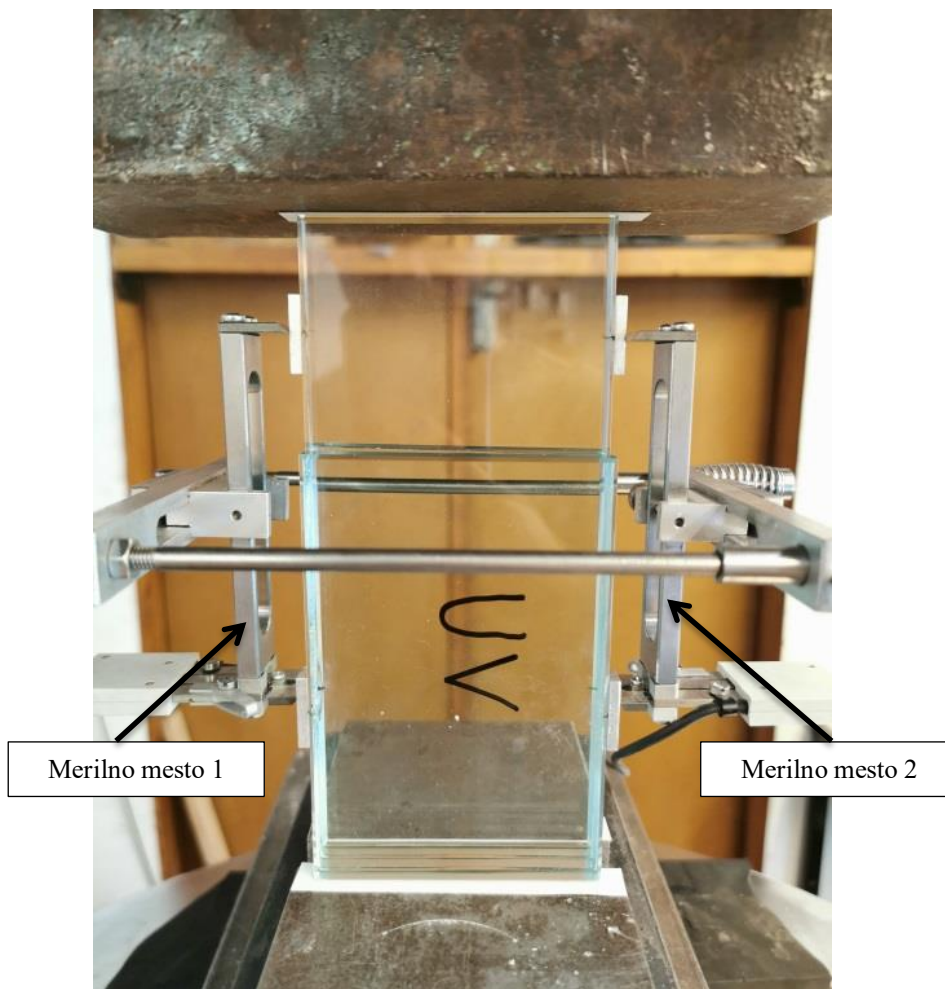


Slika 20: Strižni preizkušanelec z UV lepilom.



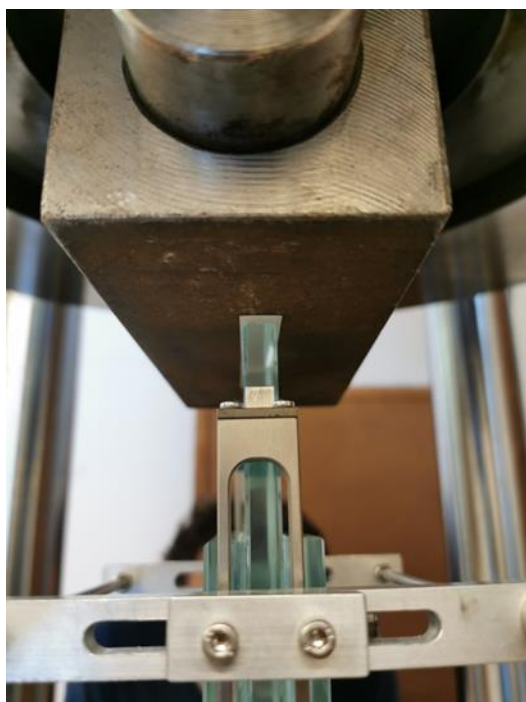
Slika 21: Debelina vmesne povezovalne plasti: EVA folija (levo) in UV lepilo (desno).

Na sliki 22 vidimo postavitev strižnega testa vmesnih povezovalnih plasti. Z zgornje strani sem vsiljeval pomik s pomočjo bata, preko katerega sem lahko meril tudi silo. Na spodnji strani sta bili stranski stekleni plošči podprti, vmesna steklena plošča pa je imela omogočen prost vertikalni pomik. Pomike sem v obeh primerih vsiljeval s hitrostjo 0,05 mm/s. Preizkušanci niso bili obremenjeni horizontalno oz. pravokotno na testirano strižno površino, čeprav bo v sklopu nosilca obstajala takšna horizontalna obremenitev zaradi prednapetja.



Slika 22: Pogled na postavitev strižnega testa pred izvedbo preiskave.

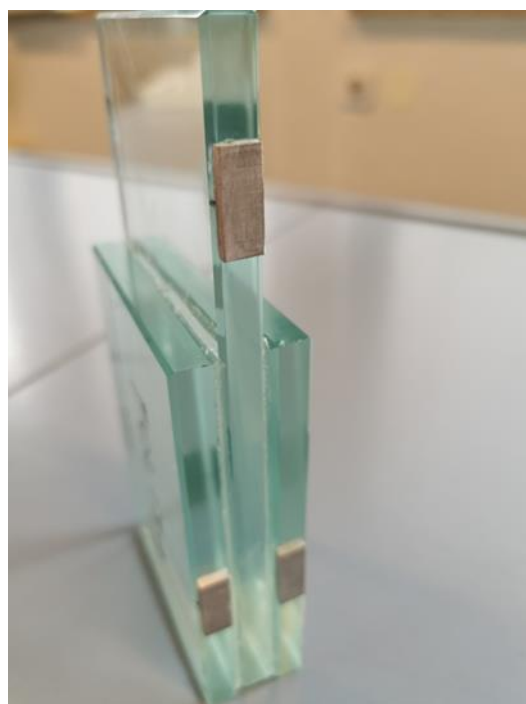
Na zunanje stranice obeh preizkušancev so bile nalepljene aluminijaste ploščice, kjer smo z deformetri merili deformacije (baza 100 mm). Kot je razvidno s slike 18, sem pri testiranju beležil rezultate o zdrsu na dveh merilnih mestih (merilno mesto 1 levo in merilno mesto 2 desno). Pozicija aluminijastih ploščic je prikazana na slikah 23 b), 23 c) ter 23 d). Zaradi problematike stekla okrog lokalnih konic napetosti smo preizkušance dodatno podložili s tankimi lističi papirja in s tem preprečili neposreden stik stekla z jeklenimi podporami: upali smo, da bomo zagotovili najboljše možne pogoje za testiranje preizkušancev. Podlaganje preizkušancev je razvidno s slik 23 a) in 23 b).



a)



b)



c)



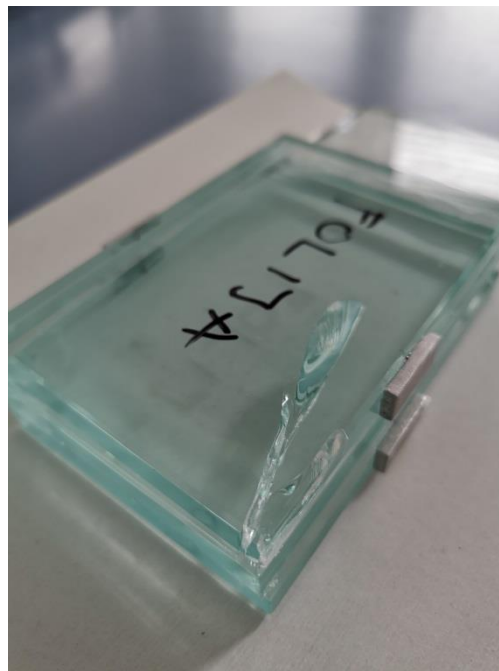
d)

Slika 23: Prikaz detajlov strižnega testiranja preizkušancev.

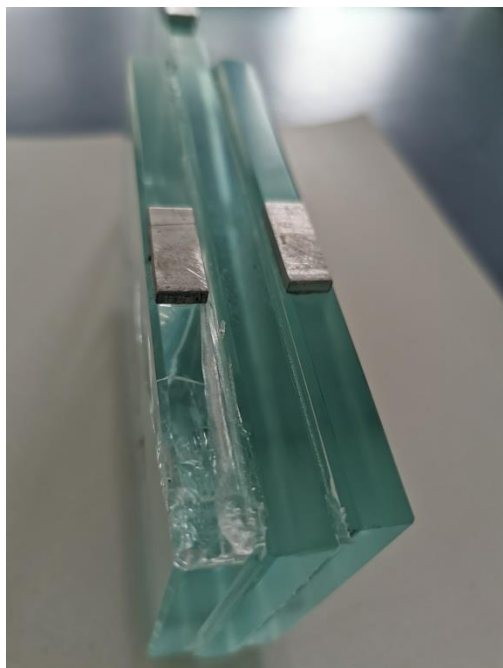
Med eksperimentom smo merili čas obremenjevanja, silo in pomik na batu ter zdrs ene steklene plošče v primerjavi z drugo. V obeh primerih so se porušitve zgodile zaradi lokalnih koncentracij napetosti. Slika 24 prikazuje porušitev preizkušanca z EVA folijo, slika 25 pa porušitev preizkušanca z UV lepilom.



a)



b)



c)



d)

Slika 24: Porošitev strižnega preizkušanca, lepljenega z EVA folijo.



a)



b)



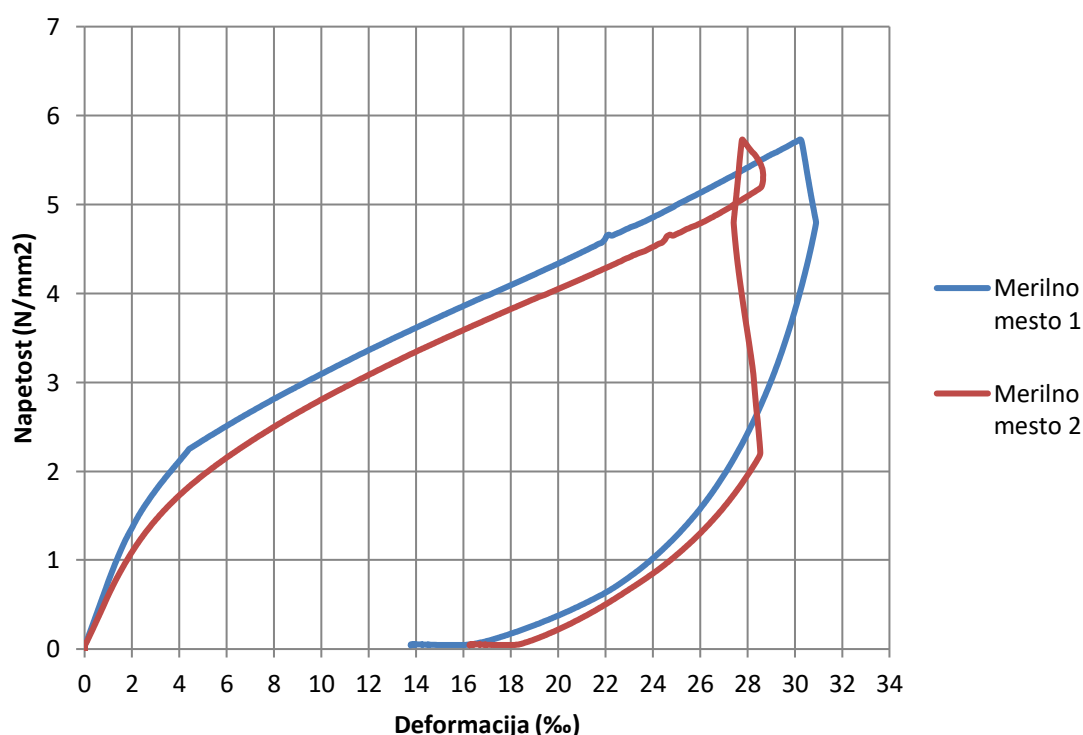
c)



d)

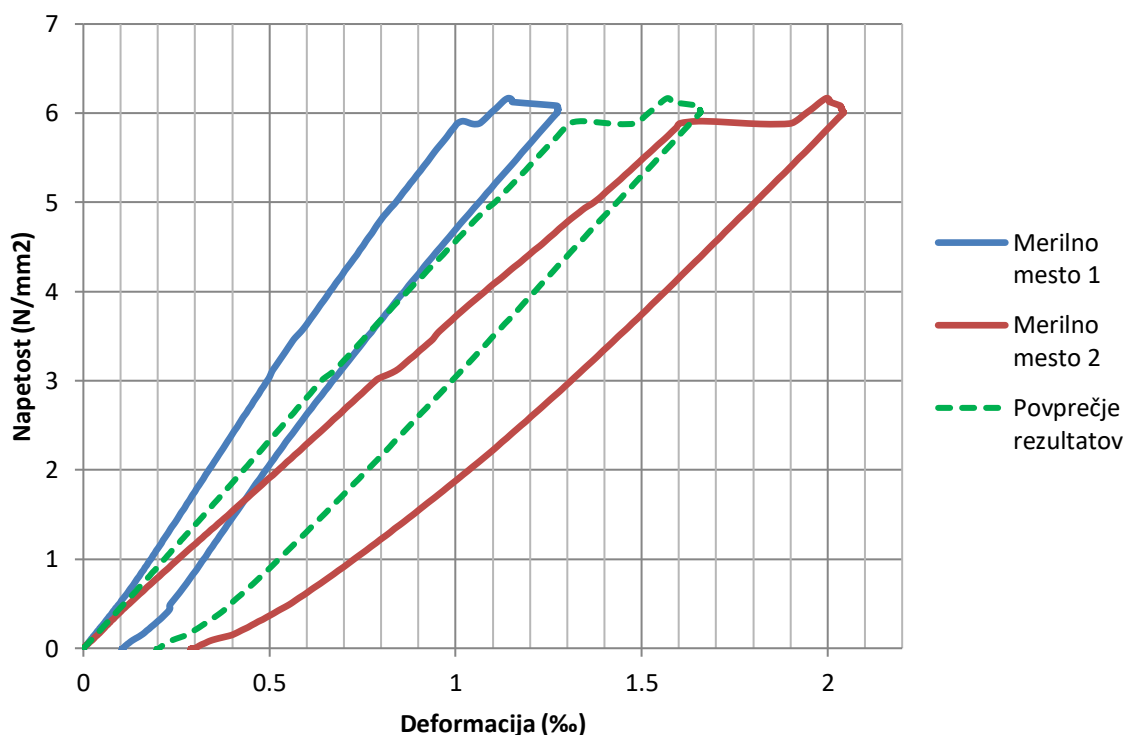
Slika 25: Strižna porušitev preizkušanca z UV lepilom.

EVA folija se je, kot pričakovano, izkazala za zelo podajno, a kljub temu zelo nosilno. Na sliki 26 lahko vidimo rezultat strižnega preizkušanja preizkušanca z EVA folijo. Posamezna črta prikazuje napetosti v odvisnosti od deformacij na eni in drugi stranici preizkušanca (merilni mesti 1 in 2). EVA folija je sicer ob velikih deformacijah prenesla precej veliko strižno silo: več, kakor sem pred pričetkom eksperimenta predvideval. Sila, merjena na dinamometru, je v času porušitve znašala 110,0 kN, ob spremljajočih deformacijah 30,25 ‰ oz. 27,78 ‰, odvisno od opazovanega merilnega mesta. Ob opazovanju rezultatov lahko opazimo tudi, da je v začetnem delu obremenjevanja obnašanje EVA folije v strigu linearno. O začetni linearnosti lahko govorimo do razvoja napetosti okrog 1,2 MPa oz. do razvoja sile okoli 23 kN (pripadajoča deformacija okoli 2,2 ‰). Izračunan začetni strižni modul znaša $G = 4028$ kPa. Po začetnem linearnem obnašanju sledi del, kjer je obnašanje izrazito nelinearno, a v nadaljevanju lahko zopet opazimo linearnost tako na eni kot drugi stranici preizkušanca. V specifičnem primeru strižnega testa z EVA folijo lahko torej govorimo o nekem bilinearnem odzivu z vmesno nelinearno vejo.



Slika 26: Rezultat strižnega preizkušanja za preizkušanece z EVA folijo.

UV lepilo se je, po pričakovanjih, obnašalo kot zelo togo. Na sliki 27 lahko vidimo rezultat strižnega preizkušanja preizkušanca z UV lepilom. Posamezna črta prikazuje napetosti v odvisnosti od deformacij na eni in drugi stranici preizkušanca (merilno mesto 1 in 2), skupaj s črtkano črto, ki prikazuje povprečje dobljenih rezultatov. UV lepilo se obnaša kot bistveno bolj togo v primerjavi z EVA folijo. Preizkušanec z UV lepilom je sicer izkazal zelo podobno odpornost kot preizkušanec z EVA folijo, in sicer 118,4 kN, a ob bistveno manjših deformacijah. Odvisno od mesta meritev so deformacije ob sili v času porušitve znašale 1,14 ‰ na stranici 1 oz. 1,99 ‰ na stranici 2. Edino smiselno pa je v tem primeru opazovati povprečne vrednosti deformacij, ki so ob porušitvi znašale 1,56 ‰. V primerjavi z EVA folijo lahko vidimo tudi, da je obnašanje UV lepila izrazito linearno, podobno, kakor je izrazito linearno obnašanje stekla.



Slika 27: Rezultat strižnega preizkušanja za preizkušanec z UV lepilom.

Po primerjavi rezultatov strižnega testa preizkušancev, lepljenih z EVA folijo in UV lepilom, lahko sprva sklepamo, da je UV lepilo morda bolj primerno za zagotavljanje izbrane strižne povezave. EVA folija se na prvi pogled obnaša preveč podajno, poleg tega pa se UV lepilo obnaša tudi bolj linearno, podobno, kakor se linearno obnaša steklo. Razmišljati pa je potrebno tudi o celotnem sistemu steklenih elementov, iz katerih bo stekleni nosilec sestavljen. V natezni coni bo pojav prvih razpok v steklu pomenil porušitev. Če na stikih uporabimo EVA folijo, ki omogoča velike deformacije, lahko s tem v

natezni coni omogočimo večje deformacije (simulacija pojava razpok) in s tem izboljšamo nosilnost samega nosilca, saj bomo lahko neproblematično tlačno cono še bolj obremenili. Natezne napetosti v spodnji coni lahko tako popolnoma prenesemo na steklena vlakna, ki zdržijo bistveno višje natezne obremenitve.

Ob zaključku rezultatov je potrebno dodatno poudariti, da v omenjenih testih sila, ki deluje v smeri pravokotno na lepljeno površino, ni bila prisotna. V primeru steklenega prednapetega nosilca (za katerega so bili omenjeni testi narejeni) pa so sile, ki delujejo pravokotno na lepljeno površino, prisotne in dodatno pripomorejo k strižni nosilnosti takšnega sistema.

5.2 Namen in izvedba nateznih testov steklenih vlaken

Za potrebe prednapenjanja steklenega nosilca sem predvidel uporabo steklenih vlaken. Namen nateznih testov steklenih vlaken je bil spoznati obnašanje steklenih vlaken in dobiti občutek za uporabo tega materiala. V eksperimentih sem uporabil steklena vlakna oz. vrv iz steklenih vlaken Direct Roving 469P z linearno gostoto 2400 g/km, za katero proizvajalec navaja nosilnost > 840 N.

Najprej je bilo potrebno razmisliti o tem, kako steklena vlakna sploh obremeniti, oz. vpeti v napravo, ki mi bo omogočala izvedbo nateznega testa. Zaradi zelo majhnega premera posameznega steklenega vlakna, v mojem primeru le okoli 22 μm , je manipulacija steklenih vlaken brez prisotnosti neke matrice, ki vlakna med seboj povezuje in varuje, precej neugodna. Posamezno vlakno namreč zaradi njegove majhnosti zelo hitro poškodujemo oz. pretrgamo. Vlakna sem se odločil z epoksidnim lepilom na koncih zlepiti med aluminijaste ploščice (slika 28), ki so mi omogočile vpetje tako ustvarjenega preizkušanca v čeljusti, s katerimi sem lahko vsiljeval pomik in ob tem meril silo.



Slika 28: Preizkušavec za testiranje nosilnosti steklenih vlaken.

Na sliki 29 a) je prikazan preizkušavec vpet v čeljusti, s katerimi sem lahko vsiljeval pomik in hkrati meril silo. Na sliki 29 b) pa lahko vidimo še detajl vpetja v čeljust.



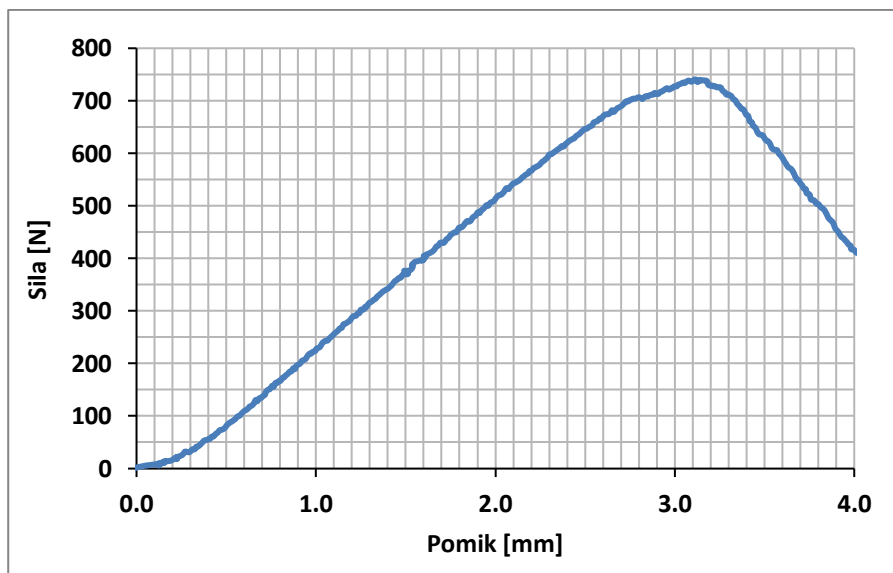
a)



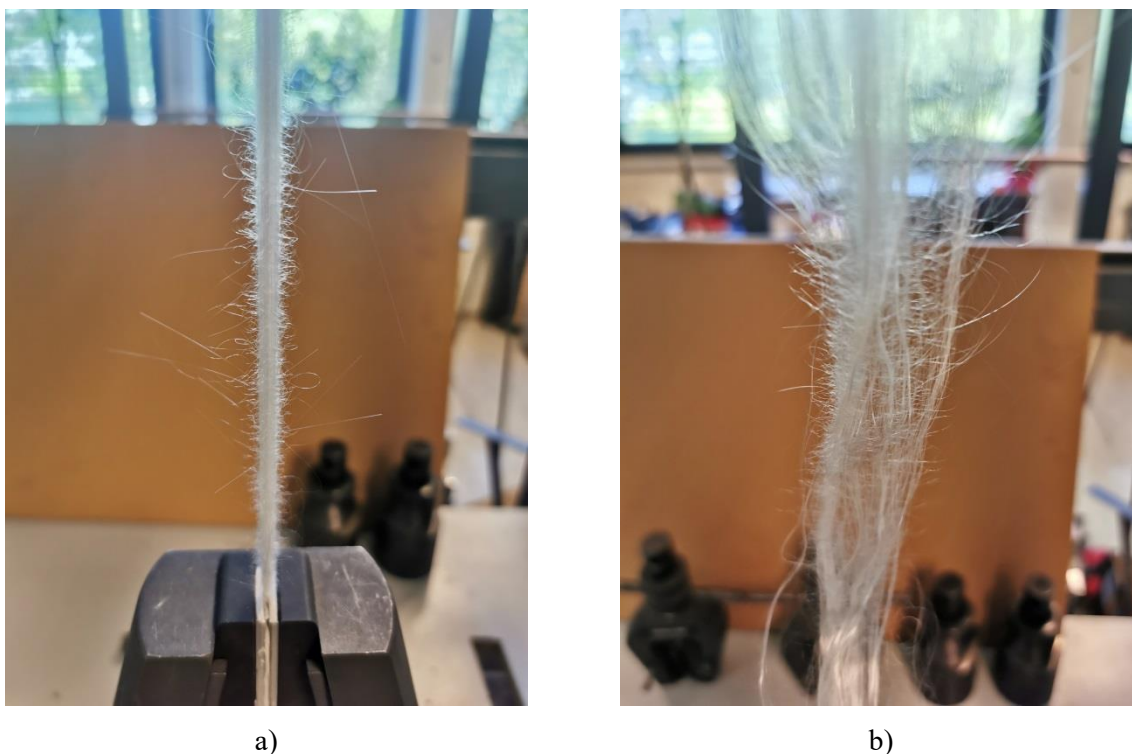
b)

Slika 29: Vpetje preizkušanca za natezni test steklenih vlaken a) in detajl vpetja b).

Na sliki 30 lahko vidimo odziv preizkušanca, in sicer silo v odvisnosti od pomika. Opazujemo lahko pričakovano linearno obnašanje. Preizkušanec je izkazal nosilnost 740 N, kar je okoli 100 N manj kakor navaja proizvajalec. Do odstopanj je najverjetneje prišlo zaradi načina testiranja, ki v splošnem ni primeren za preizkušanje takšnih vrvi oz. vlaken. Ob lepljenju vlaken med aluminijaste ploščice, predvsem pa ob vpetju preizkušanca, vlakna lokalno poškodujemo. Dodaten problem je bil tudi, kako hkrati obremeniti vsa vlakna v sklopu steklene vrvi. Pravilno testiranje v takem primeru bi bilo z uporabo posebnih valjev, na katere se vlakna lahko navijejo, sistem valjev pa omogoča vpetje vlaken, ne da bi jih lokalno poškodovali. Slika 31 a) prikazuje preizkušanec takoj po začetku odpovedi prvih vlaken, slika 31 b) pa dokončno porušitev. Dejansko je šlo za relativno postopno trganje posameznih vlaken, ki so se po pretrganju razcvetela, porušitev celotnega preizkušanca pa zaradi tega ni bila eksplozivna.



Slika 30: Odziv steklenih vlaken v nateznem preizkusu.

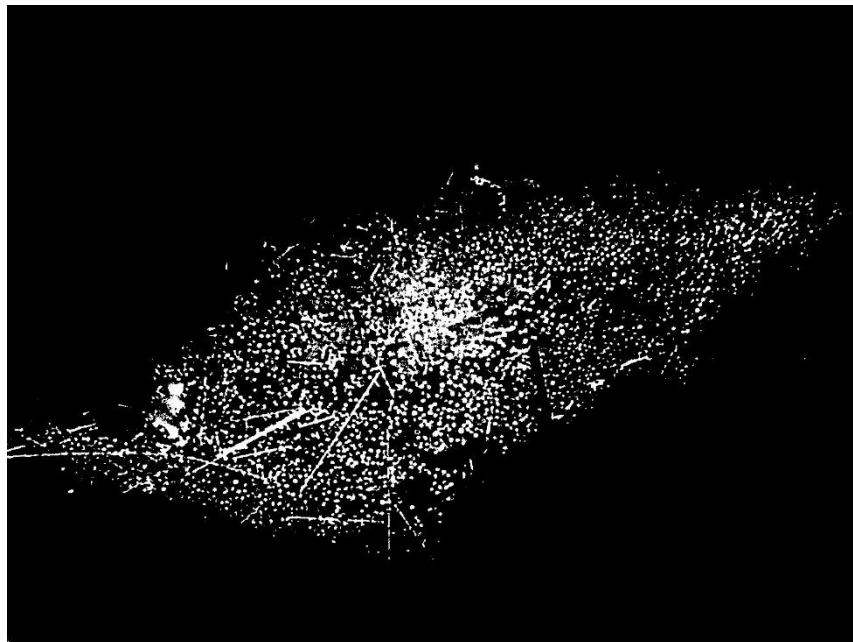


Slika 31: Začetek trganja steklenih vlaken a) in dokončna porušitev steklenih vlaken b).

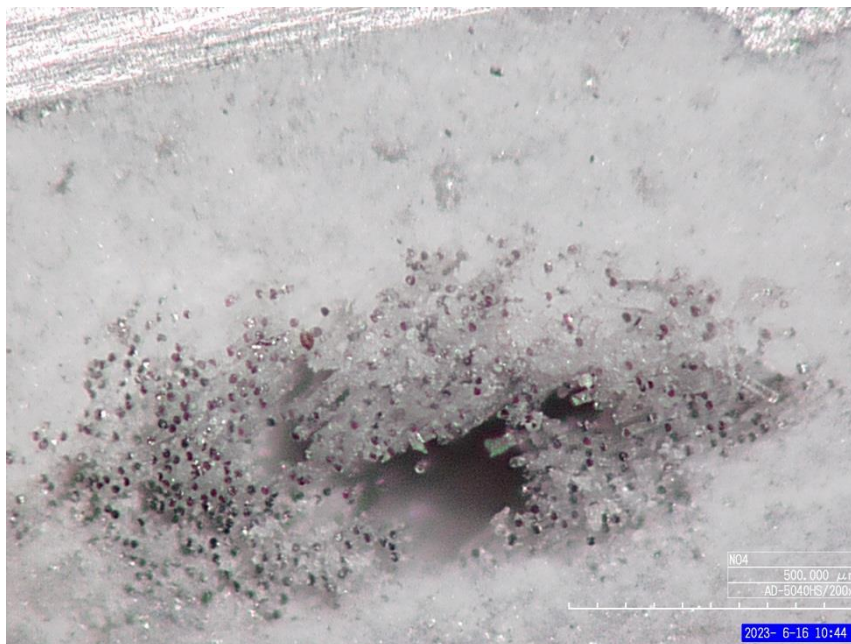
Proizvajalec steklenih vlaken v svojih specifikacijah podaja le podatek premera posameznega vlakna, ne pa tudi števila steklenih vlaken, ki jih vsebuje vrv, ki sem jo preizkušal. Navaja le linearno gostoto in nosilnost za specifičen izdelek. Iz nabora podatkov tako ne morem direktno pridobiti podatka o trdnosti uporabljenih vlaken. Da sem lahko pridobil podatke o prerezu preizkušanca, s pomočjo katerega sem lahko določil nosilnost, sem preizkušanece na mestu aluminijastih ploščic prerezal ter opazoval pod mikroskopom. Slika 32 prikazuje opazovan preizkušanca iz steklenih vlaken, slika 33 pa prikazuje enako sliko, ki je računalniško obdelana v negativ. Na slikah lahko vidimo prereze posameznih vlaken skupaj z nekaj poškodovanimi vlakni. Opazimo lahko, da je med posameznimi vlakni veliko praznega prostora (dobro vidno na sliki 34) in da je takšna vlakna možno med seboj še precej stisniti. Ta fenomen lahko opazimo tudi s prostim očesom, ko takšna steklena vlakna držimo v rokah in poskušamo vlakna med seboj stisniti. S pomočjo mikroskopa in računalniške obdelave fotografije sem poskušal oceniti dejansko skupno površino prereza vseh steklenih vlaken v primeru testiranega preizkušanca. Ocena skupne površine tako znaša okoli $0,397 \text{ mm}^2$. Ob upoštevanju ocenjene površine in podatkih nosilnosti iz eksperimentalne analize lahko ocenimo natezno trdnost steklenih vlaken na 1864 MPa oz. na 2116 MPa , če upoštevamo podatek nosilnosti proizvajalca. Glede na splošne podatke iz literature o nosilnosti steklenih vlaken lahko sklepamo o eni izmed naslednjih možnosti: prva možnost je, da sem preizkušal steklena vlakna nižje nosilnosti in so moji rezultati merodajni, druga in bolj verjetna možnost pa je, da sem pri oceni skupne površine preizkušanca naredil veliko napako (cca. 25 %) in da je natezna trdnost preizkušenih vlaken precej višja.



Slika 32: Slika prereza preizkušanca iz steklenih vlaken pod mikroskopom.



Slika 33: Računalniško obdelana slika prereza preizkušanca iz steklenih vlaken pod mikroskopom.



Slika 34: Povečan prikaz prereza preizkušanca iz steklenih vlaken.

5.3 Namen in izvedba tlačnih testov steklenih ploščic

Tlačna trdnost stekla je zelo visoka, a dejstvo je, da je izkoriščanje izjemno visoke tlačne trdnosti v primeru stekla lahko zelo težavno. Za izkoriščanje polnega potenciala stekla v tlaku moramo, kot že omenjeno, biti izjemno pozorni na lokalne koncentracije napetosti, ki povzročijo porušitev elementa. Potrebno je zagotoviti enakomeren prenos tlačne sile. Kljub poznavanju problema in rešitev za problem (npr. uporaba različnih vmesnih plasti, predstavljenih v točki 3.3) je zagotavljanje izvedbe kakovostne vmesne plasti lahko težavno. V okviru tlačnih testov steklenih plošč sem želel ugotoviti, kakšno tlačno silo lahko prenesejo steklene plošče dimenzij 120 mm x 80 mm x 10 mm, ki so med seboj povezane preko UV lepila ali EVA folije. Šlo je torej za preizkušanje steklenih elementov, ki dimenzijsko sledijo elementom, ki bi jih uporabil pri izdelavi steklenega nosilca polne velikosti. Hkrati pa gre za testiranje obnašanja vmesnih povezovalnih plasti v tlaku, v prav tako enakih dimenzijskih okvirjih. Zaradi želje po opazovanju deformacij v steklu in vmesni povezovalni plasti ter zaradi relativno majhne debeline preizkušancev (cca. 20 mm) bi bilo meritve nemogoče izvajati s pomočjo klasičnih deformetrov. Edina možnost za opazovanje deformacij v okvirih tehnične opreme, ki je bila na razpolago, je bilo opazovanje deformacij s pomočjo fotogrametrije. Sliki 35 a) in 35 b) prikazujeta pripravo preizkušancev na izvedbo tlačnega testa, pri katerem se je obnašanje preizkušancev spremljalo s pomočjo fotogrametrije.

Opazovana površina mora biti za pravilno delovanje pobarvana v kontrastno barvo in nato obdelana še s pikčastim vzorcem. Na zgornjem in spodnjem robu pa je bila med steklo in čeljusti naprave za izvedbo tlačnega testa vstavljena neoprenska guma. Žal je pri testih prišlo do, prej omenjenih,

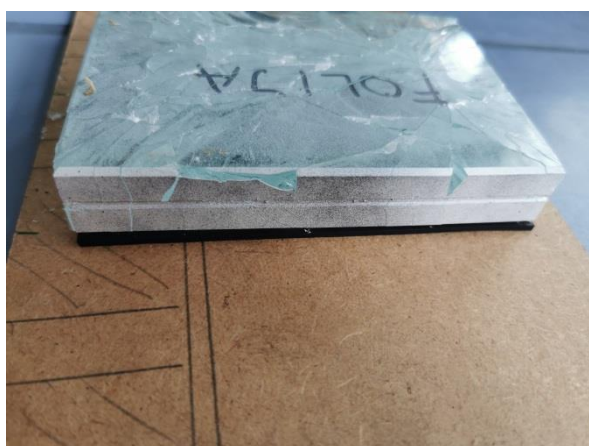
problematičnih lokalnih koncentracij tlačnih oz. nateznih napetosti, ki so povzročile zgodnjo porušitev preizkušancev. Sliki 35 c) in 35 d) prikazujeta porušene testne vzorce. Zabeležena tlačna sila je v trenutku porušitve v primeru preizkušanca z EVA folijo znašala le okoli 400 N, v primeru UV lepila pa 260 N. Glede na površino preizkušancev (9600 mm^2) je bila sila izmerjena na batu še bistveno prenizka, da bi lahko pričakovali porušitev zaradi tlačne obremenitve. Posledica zelo zgodnje porušitve pa je, da so rezultati takšnega tlačnega testa neuporabni. Menim, da je eden izmed razlogov za spodleteli poizkus tudi preveliko razmerje med ploščino in debelino preizkušanca. Tlačne teste bi moral izvajati na preizkušancih, pri katerih bi uporabil večje število posameznih steklenih plasti. S tem bi zagotovil boljše razmerje med površino in debelino preizkušanca. Žal je bila izvedba takšnega testa zaradi zelo visoke cene stekla v določenem finančnem okvirju nemogoča. Kljub temu pa nam spodleteli test daje dober občutek in nas opozarja, kako previdni moramo biti ob uporabi stekla, še posebej, če želimo steklo uporabiti kot konstrukcijski material.



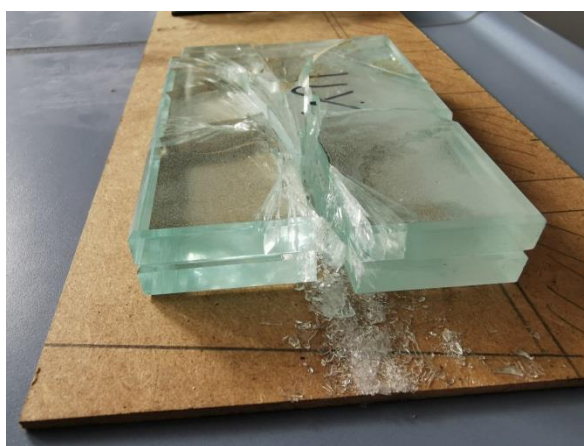
a)



b)



c)



d)

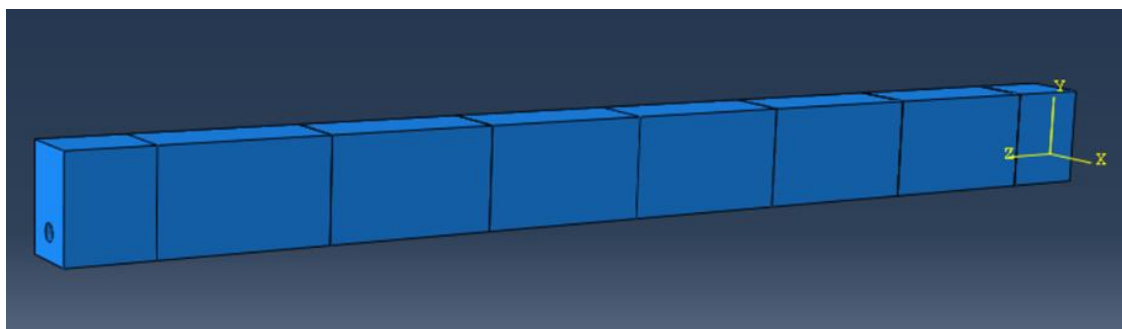
Slika 35: Priprava preizkušancev na tlačni test ter porušeni vzorci.

6 NUMERIČNA ANALIZA

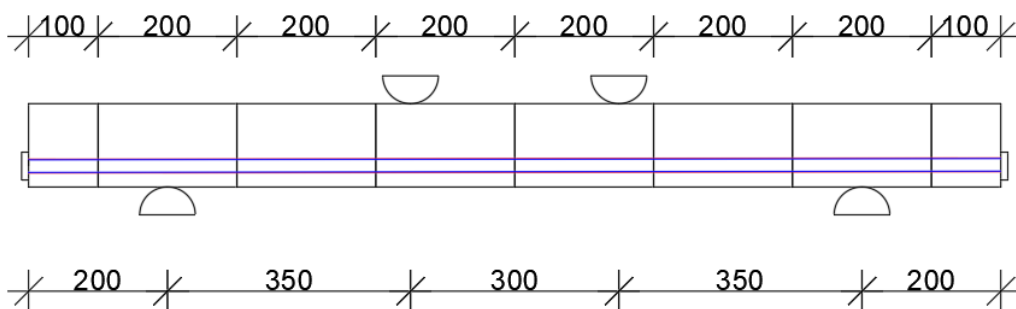
Za izvedbo numerične analize sem se odločil uporabiti program Abaqus, ki velja za enega izmed boljših programov na širšem področju numeričnega modeliranja.

6.1 Modeliranje geometrije

Najprej sem se moral odločiti, na kakšen način želim sestaviti numerični model. Gre za definiranje geometrije posameznih sestavnih kosov numeričnega modela. Stekleni nosilec sem sestavil iz posameznih kosov stekla prereza 80 mm x 120 mm (glej sliko 16, kjer je prerez že definiran) ter različnih debelin steklenih segmentov, in sicer 200 mm in 100 mm. Za ravno takšne kose stekla sem se odločil po večkratnem testiranju modela s kosi različnih debelin. Omenjene dimenzije kosov so mi namreč omogočile kar najboljši vpogled v dogajanje na posameznih delih nosilca, ne da bi za to bilo potrebno izdelati več različnih numeričnih modelov in brez nepotrebnega numeričnega obremenjevanja modela. Izdelava numeričnega modela z velikim številom steklenih plošč prvotno predvidene debeline 10 mm namreč ni bila primerna (več v nadaljevanju). Sliki 36 in 37 prikazujeta sestavo nosilca z omenjenimi kosi stekla. Gre torej za nosilec, sestavljen iz šestih kosov dolžine 200 mm in dveh kosov dolžine 100 mm, in sicer namesto nosilca, sestavljenega iz 140-tih kosov stekla debeline 10 mm.

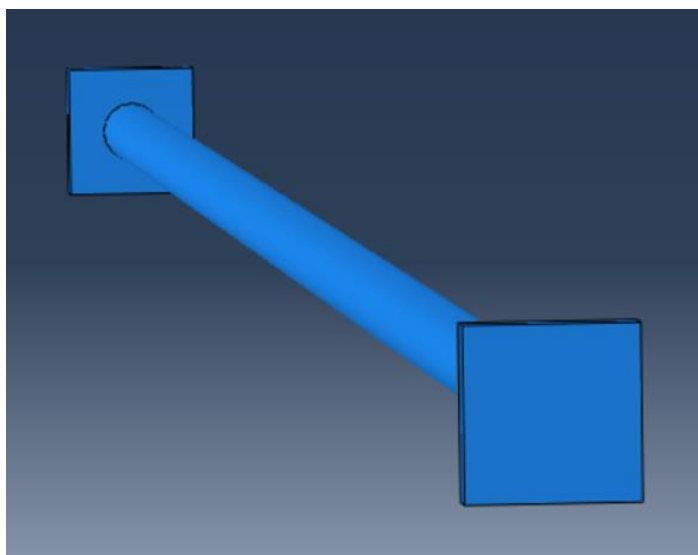


Slika 36: Stekleni nosilec, sestavljen iz posameznih steklenih elementov.



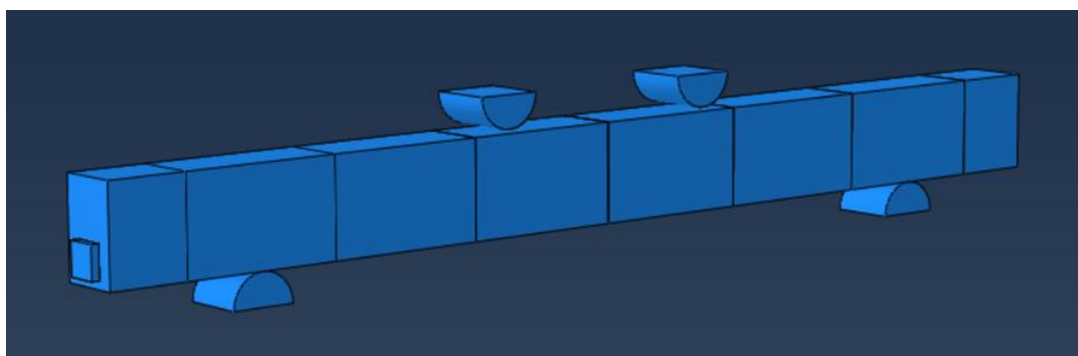
Slika 37: Načrt steklenega nosilca, sestavljenega iz posameznih steklenih elementov.

Za izvedbo prednapetja sem moral modelirati sama steklena vlakna in končne plošče, preko katerih se lahko sila prednapetja v vlaknih prenaša na nosilec. Kot že omenjeno in obrazloženo v točki 4, sem se odločil za končne plošče dimenzije 40 mm x 40 mm x 10 mm ter vrvi iz steklenih vlaken s premerom 19 mm (vidno na sliki 38).



Slika 38: Steklена vlakna ter končne plošče za prednapetje.

Numerični model nosilca je bilo potrebno še ustrezno podpreti ter pripraviti elemente, preko katerih bom lahko vsiljeval pomike nosilcu. Odločil sem se za modeliranje na pol prerezanih valjev s premerom 80 mm, ki so na sliki 39 prikazani skupaj s celotnim modelom steklenega nosilca.



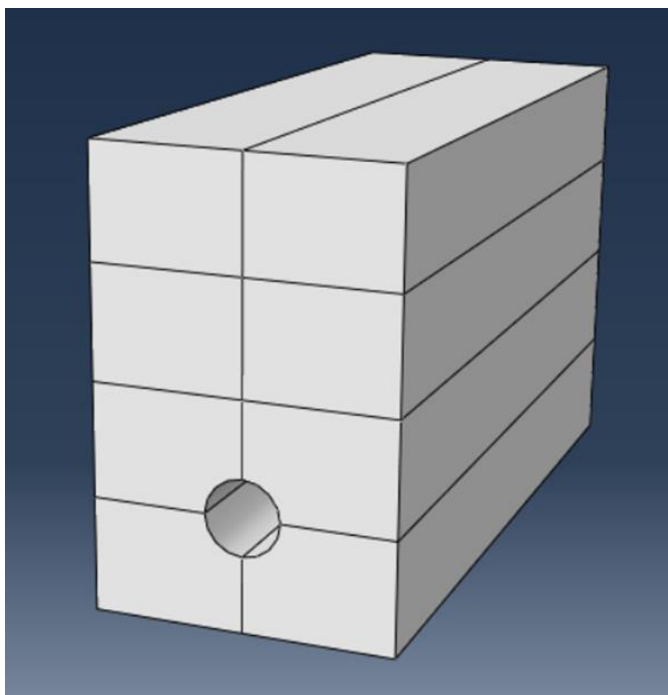
Slika 39: Celoten model steklenega nosilca, skupaj s podporami.

Vsi uporabljeni elementi za sestavo numeričnega modela so definirani kot 3D deformacijski solid elementi.

6.2 Material, particije in koraki analize

Za delovanje modela sem določil tri različne vrste materiala: najprej seveda steklo: za modeliranje steklenih elementov nosilca, kateremu sem pripisal izotropne lastnosti, elastični modul $E = 70 \text{ GPa}$ ter Poissonov količnik 0,23. Posebej sem definiral steklo za steklena vlakna, katerim sem prav tako pripisal elastični modul $E = 70 \text{ GPa}$ ter Poissonov količnik 0,23. Poleg steklenih elementov pa sem definiral še jeklo, ki sem ga uporabil pri definiranju elementov za podpiranje ter končnih plošč za prednapenjanje nosilca. Tudi jeklo sem definiral kot izotropen material, in sicer z elastičnim modulom $E = 200 \text{ GPa}$ ter Poissonovim količnikom 0,30.

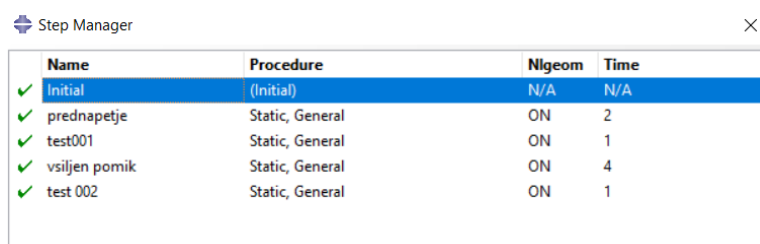
Zaradi lažjega kasnejšega vzpostavljanja mreže končnih elementov, ki ne vsebuje napak in deluje kar se da optimalno, je potrebno posamezne sestavne dele modela razdeliti na particije. Največ pozornosti je potrebno nameniti predelom z odprtinami ter predelom, kjer se posamezni sestavni kosi numeričnega modela stikajo. V mojem primeru govorimo torej o odprtini, skozi katero bodo potekala steklena vlakna, o steklenih vlaknih samih ter o vseh stičnih mestih (stik vlakna – končna plošča, stik podpore – nosilec, itd.). Slika 40 prikazuje delitev enega steklenega segmenta na ustrezne particije.



Slika 40: Delitev enega izmed steklenih elementov na ustrezne particije.

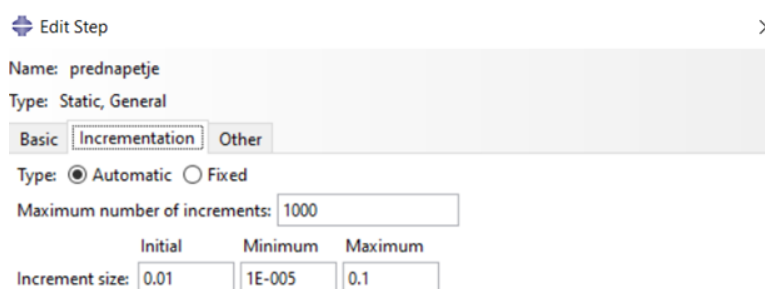
Zaradi narave problema je bilo najlažje analizo prednapetega steklenega nosilca razdeliti na več posameznih korakov (slika 41). Prvi korak je po definiciji programa vedno korak z imenom Initial, v katerem predpišemo robne pogoje (v mojem primeru podpiranje nosilca) in je njegova dejanska dolžina 0 sekund. Nato sem definiral korak prednapetje, v katerem sem steklena vlakna prednapel do

predvidene sile za prednapetje 500 kN. Za izbrano silo sem se odločil po večkratnem testiranju modela z različnimi nivoji prednapetja, saj sem želel čim bolj izkoristiti nosilec. Hkrati je izbrana sila znotraj meja nosilnosti izbranih steklenih vlaken že ob upoštevanju rezultatov mojega eksperimentalnega testiranja. Ob upoštevanju dejanskih podatkov proizvajalca (ali ob izbiri steklenih vlaken neke druge vrste) pa sem popolnoma na varni strani glede nosilnosti steklenih vlaken. Dolžina koraka prednapetje je 2 sekundi. Sledil je korak test001, ki sem ga vpeljal zgolj zaradi pregledovanja rezultatov in zagotavljanja pravilnega delovanja modela. V tem koraku ni bilo vpeljane nobene nove obtežbe, sile zaradi prednapetja so se v ta korak le prenesle iz prejšnjega koraka. Sledi definicija koraka vsiljen pomik, v katerem se zgornja priskana valja pomikata navzdol. Dolžina koraka je 4 sekunde: s tem dobimo več posameznih točk izračuna (pomik se vsiljuje počasneje). Temu sledi testni korak test002, ki zopet služi le kontroli numeričnega modela. V vsakem izmed korakov je potrebno definirati, v kakšnih inkrementih se problem posameznega koraka rešuje. Inkremente reševanja sem za vse korake definiriral enako in so prikazani na sliki 42.



	Name	Procedure	Nlgeom	Time
✓	Initial	(Initial)	N/A	N/A
✓	prednapetje	Static, General	ON	2
✓	test001	Static, General	ON	1
✓	vsiljen pomik	Static, General	ON	4
✓	test 002	Static, General	ON	1

Slika 41: Posamezni koraki reševanja numeričnega problema.



Name: prednapetje
Type: Static, General

Basic Incrementation Other

Type: ☒ Automatic ☐ Fixed

Maximum number of increments: 1000

Increment size: Initial 0.01 Minimum 1E-005 Maximum 0.1

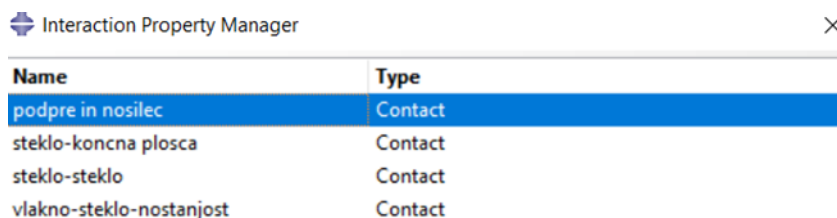
Slika 42: Definicija posameznih inkrementov znotraj koraka.

6.3 Interakcije med površinami

Interakcije med posameznimi površinami, ki so v stiku, so zelo pomemben del priprave numeričnega modela. V točki 6.1 sem omenil, da modeliranje 140-tih steklenih plošč debeline 10 mm ni primerno. Pri modeliranju interakcij med površinami sem namreč ugotovil, da tolikšno število medsebojnih interakcij med površinami precej poveča računski čas, iskane rezultate pa sem kasneje vseeno dobil na

bolj učinkovit način: posledica premišljenih sprememb v dimenziji (dolžini) posameznih steklenih elementov (geometrija predstavljena v točki 6.1).

V numeričnem modelu sem skupno definiral 4 različne tipe interakcij (glej sliko 43). Prva interakcija je med podporami in nosilcem oz. med valji za vsiljevanje pomika in nosilcem, kjer sem definiral stik s koeficientom trenja 0,6. Druga interakcija je interakcija med steklom in jeklenimi končnimi ploščami, kjer sem definiral koeficient trenja 1,0 (končne plošče so prilepljene na konec nosilca). Podobno sem naredil za tretjo interakcijo med steklenimi elementi, ki bodo v realnosti med seboj zlepljeni z UV lepilom ali EVA folijo. V numeričnem modelu je ustrezen koeficient trenja, v kombinaciji z možnostjo razmikanja med plastmi (omogočanja razpok), poskrbel za simulacijo odziva vmesne plasti. Ne smemo namreč pozabiti, da na nosilec ves čas deluje velika osna sila prednapetja, ki steklene elemente tišči skupaj. Četrta interakcija pa je interakcija med steklenimi vlakni in steklenim nosilcem, kjer sem predpisal majhen koeficient trenja 0,1. Pri vseh interakcijah sem predpisal, da površine ne morejo prodreti ena v drugo. Povezavo med steklenimi vlakni in končnimi ploščami pa sem definiral kot togo povezavo, zato med njima tudi ni bilo potrebno definirati nobenega drugega posebnega tipa interakcije.



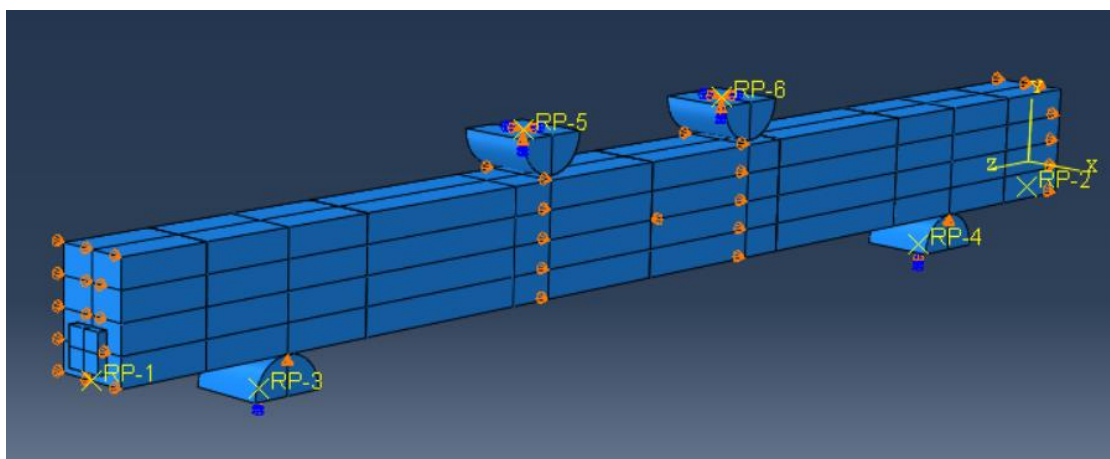
Name	Type
podpre in nosilec	Contact
steklo-končna plošča	Contact
steklo-steklo	Contact
vlakno-steklo-nostanjost	Contact

Slika 43: Vrste posameznih interakcij med površinami.

6.4 Robni pogoji, obtežbe in mreža končnih elementov

Ustrezno definiranje robnih pogojev je v numeričnih modelih zelo pomembno in lahko bistveno vpliva na rezultate. Najprej sem predpisal robne pogoje v točkah RP-3 in RP-4, ki opisujejo obnašanje podpor. Na teh mestih sem preprečil vse pomike in zasuke. Zaradi numerične stabilnosti problema sem nato moral na več mestih definirati dodatne robne pogoje. Na obeh skrajnih koncih nosilca ter na mestu prereza, kjer vsiljujem pomik, sem predpisal robne pogoje, ki preprečujejo pomike nosilca izven svoje ravnine. Po zagonu analize pa sem ugotovil, da moram definirati tudi robne pogoje, ki bodo preprečili, da se nosilec zapelje po podporah. To sem zagotovil z robnimi pogoji v središčnem prerezu nosilca, kjer sem omejil pomike v smeri osi nosilca. Prav tako sem po zagonu analize ugotovil, da

moram nosilec pripeti na podpore, saj ga sicer nič ne omejuje, da se v celoti dvigne v koraku prednapetja. To sem storil tako, da sem na liniji stika nosilca s podporo preprečil vertikalne pomike nosilcu. V zadnjem koraku vsiljevanje pomika pa sem točkam RP-5 in RP-6, ki opisujeta obnašanje prisekanih valjev za vsiljevanje pomika, predpisal vertikalni pomik. Na sliki 44 so z oranžno barvo označena vsa mesta, na katerih so predpisani posamezni robni pogoji.

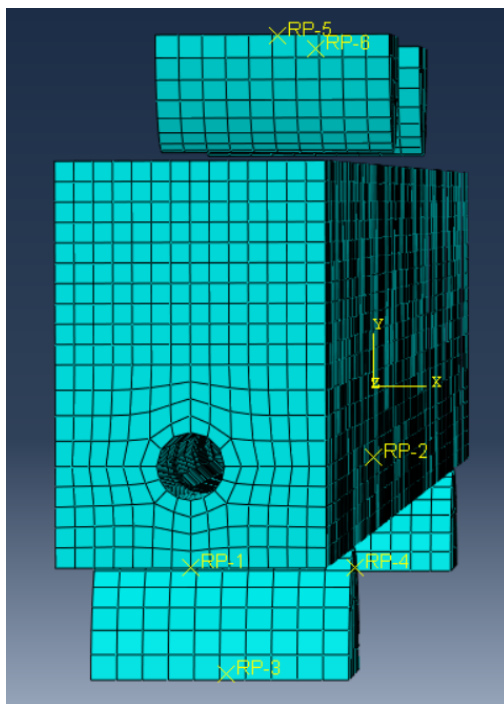


Slika 44: Mesta predpisanih robnih pogojev.

V koraku prednapetja sem s pomočjo funkcije Bolt Load prednapel steklena vlakna. Premer prereza steklenih vlaken znaša 19 mm oz. površina prereza znaša $283,53 \text{ mm}^2$. Z upoštevanjem natezne trdnosti steklenih vlaken 1864 MPa, pridobljene iz izvedenih nateznih testov, oz. z upoštevanjem natezne trdnosti proizvajalca 2116 MPa, lahko izračunamo, da bodo vlakna tega prereza prenesla natezno silo 529 kN oz. 600 kN. Zaradi iskanja maksimalne možne obremenitve steklenega nosilca sem tudi vlakna maksimalno obremenil (500 kN). Kljub visoki obremenitvi steklenih vlaken pa ta ne predstavlja večjega problema, saj bi lahko v primeru potrebe po večji varnosti uporabil steklena vlakna višjih nosilnosti, npr. 3000 MPa. Takšna vlakna bi omogočala vnos sile velikostnega reda 850 kN, oz. bi predstavljal dovolj veliko zalogo varnosti pri izvedbi prednapetja. Po fazi prednapenjanja sledi obtežba nosilca, izvedena preko vsiljevanja pomika. Pomike vsiljujem preko dveh prisekanih jeklenih valjev in opazujem napetosti na posameznih delih nosilca vse, dokler ne dosežejo kritičnih tlačnih ali nateznih napetosti.

Pred zagonom analize je potrebno definirati še mrežo končnih elementov. Pri snovanju 3D končnih elementov sem iz Abaqus-ove zbirke končnih elementov izbral tip elementa C3D8I. Oznaka C3D8 pomeni, da gre za 3D volumski element z osmimi vozlišči in s po tremi prostostnimi stopnjami v smeri x, y in z vsakem vozlišču. Oznaka I pa pomeni, da imajo izbrani končni elementi omogočene nekompatibilnostne oblike, ki omogočajo izboljšanje obnašanja upogibno obremenjenih elementov [3].

Glede velikosti končnih elementov sem se odločil za način definiranja okvirne želene velikosti posameznega končnega elementa in nato programu prepustil, da velikost znotraj nekaj definiranih okvirjev samostojno prilagaja glede na geometrijo modela. Končnim elementom sem predpisal okvirno globalno velikost 6 mm. S temi pogoji sem ustvaril model s 83688 končnimi elementi ter 433006 vozlišči. Na sliki 45 lahko vidimo razporeditev končnih elementov po prerezu nosilca ter v okolici odprtine za steklena vlakna.

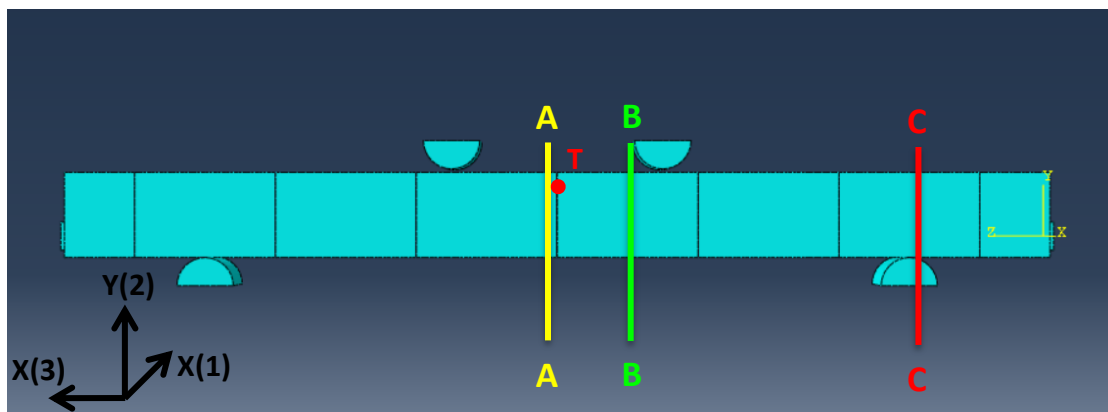


Slika 45: Razporeditev končnih elementov po prerezu nosilca.

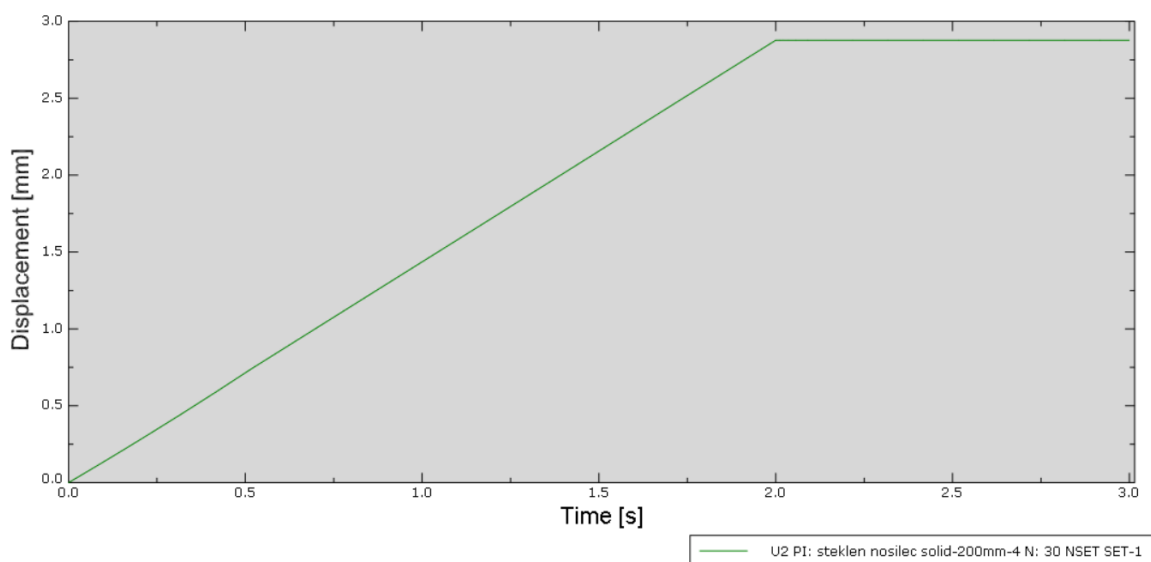
6.5 Analiza in rezultati

Analiza problema je bila precej obsežna, saj je izračun trajal okoli štiri ure. Kot že omenjeno, je bil prvi korak analize prednapenjanje steklenega nosilca s silo 500 kN. Sila je bila glede na geometrijo prereza vnesena ekscentrično, zato sta se kot posledica prednapenjanja zgodili dve stvari: nosilec se je nekoliko dvignil in skrčil, hkrati pa so se v nosilcu pojavili tudi negativni momenti.

Na sredini nosilca sem si izbral točko T, ki je prikazana na sliki 46 (skupaj s pomembnejšimi prerezi in koordinatnim sistemom nosilca za lažje prikazovanje rezultatov), v kateri sem opazoval predvsem vertikalne pomike nosilca. V izbrani opazovani točki za izbrano silo prednapetja se je nosilec dvignil za 2,88 mm. Na sliki 47 lahko vidimo odvisnost vertikalnega pomika od časovnega koraka. V času 2,0 sekunde je korak prednapetja končan, sila je konstantna, pomik več ne narašča. V času od 2,0 sekunde do 3,0 sekunde je pravzaprav prikazan korak test001.

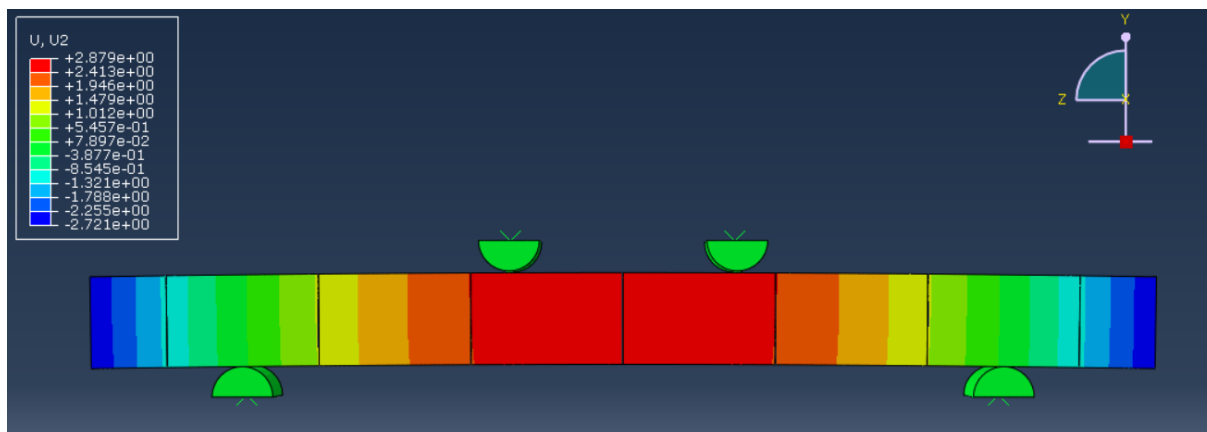


Slika 46: Opazovana točka pomikov **T** ter pomembni prerezi **A-A**, **B-B** in **C-C**.

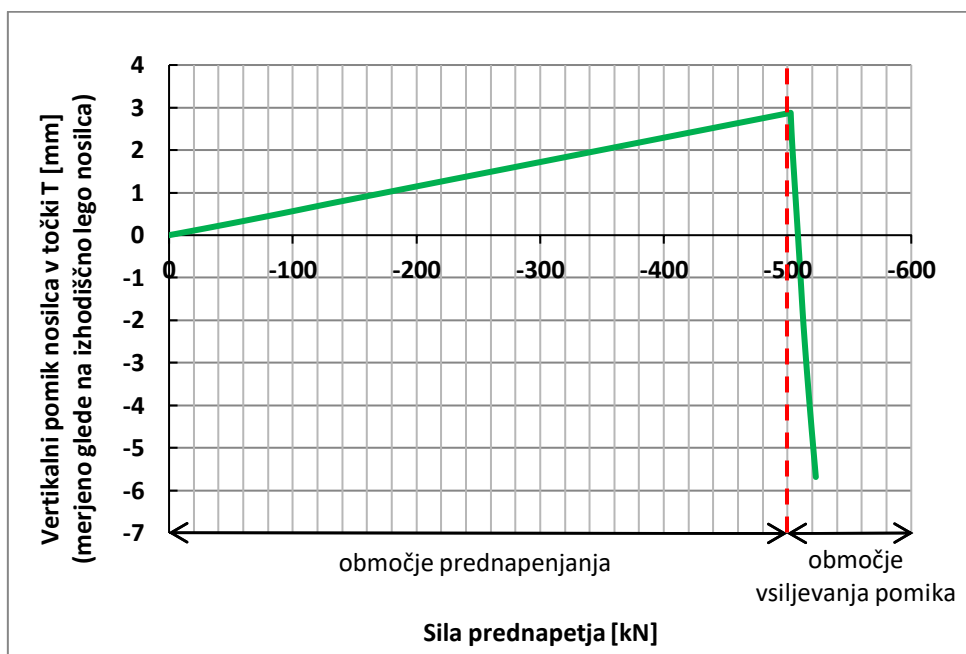


Slika 47: Vertikalni pomik nosilca v odvisnosti od časa v točki **T** (do časovnega koraka 3,0 s).

Na sliki 48 je s pomočjo barvnih kontur prikazan vertikalni pomik nosilca. Vidimo lahko, da se sredina nosilca dvigne, medtem ko se krajna konca nosilca spustita. Na sliki 49 pa lahko opazujemo vertikalne pomike nosilca v odvisnosti od sile prednapetja. Nosilec se ob prednapenjanju na silo 500 kN najprej dvigne. Ob kasnejšem vsiljevanju pomika pa se nosilec seveda spušča, medtem ko osna sila v vlaknih še dodatno naraste.

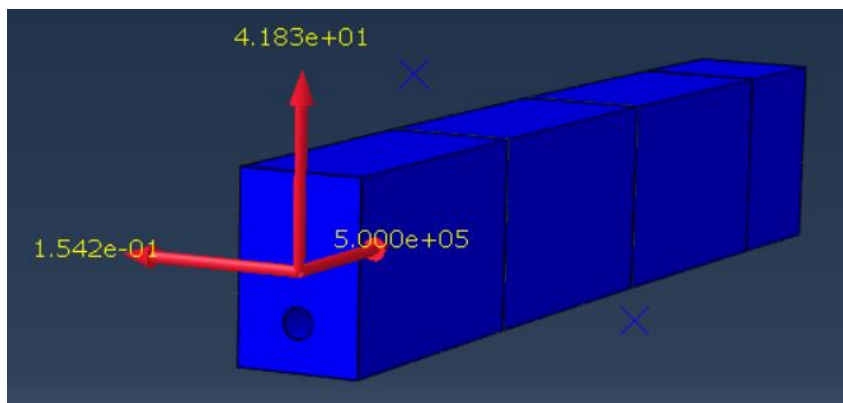


Slika 48: Vertikalni pomiki U2 [mm] nosilca po prednapenjanju.

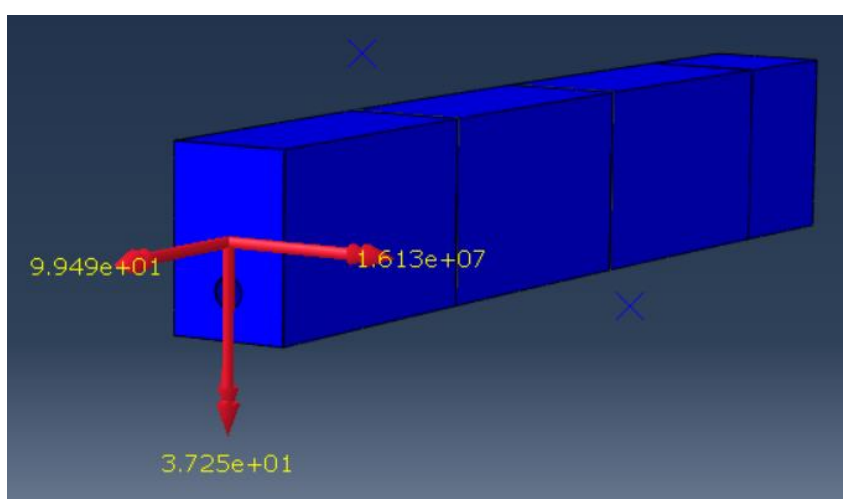


Slika 49: Sila prednapetja v odvisnosti od vertikalnega pomika nosilca v točki T.

Slika 50 prikazuje prerez nosilca A-A (tik ob središčnem prerezu nosilca na razdalji 701 mm od roba nosilca) in pripadajoče sile. Skladno s predpisano obtežbo lahko v nosilcu opazujemo osne sile, ki znašajo 500 kN. Vidimo pa lahko, da se pojavijo tudi strižne sile v preostalih dveh smereh. Strižne sile izven ravnine nosilca znašajo okoli 0,15 N, so zanemarljive in le posledica numeričnih napak. Strižne sile v ravnini nosilca, na specifičnem mestu, znašajo okoli 42 N in so zanemarljive v primerjavi s strižno nosilnostjo preko 100 kN, izkazano v eksperimentalni analizi (kjer osne sile niti niso bile upoštevane). Slika 51 prikazuje prerez nosilca na istem mestu (prerez A-A) ter pripadajoče momente. Prednapenjanje nosilca je povzročilo negativen moment 16,13 kNm okrog osi X.



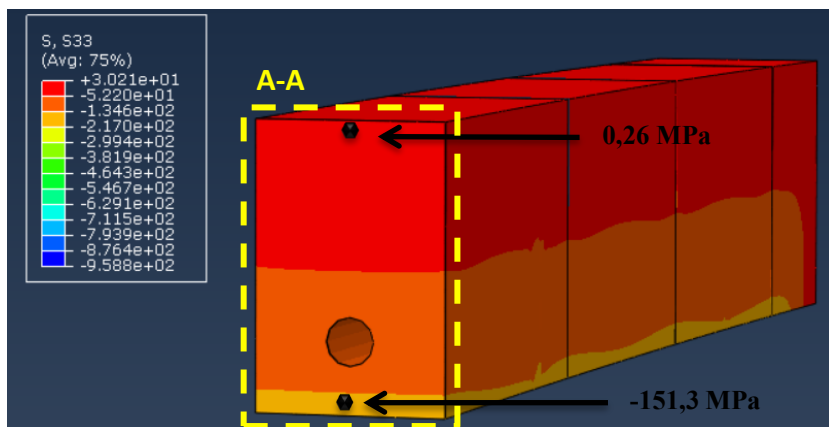
Slika 50: Sile [N] v prerezu nosilca A-A po prednapenjanju.



Slika 51: Momenti [Nmm] v prerezu nosilca A-A po prednapenjanju.

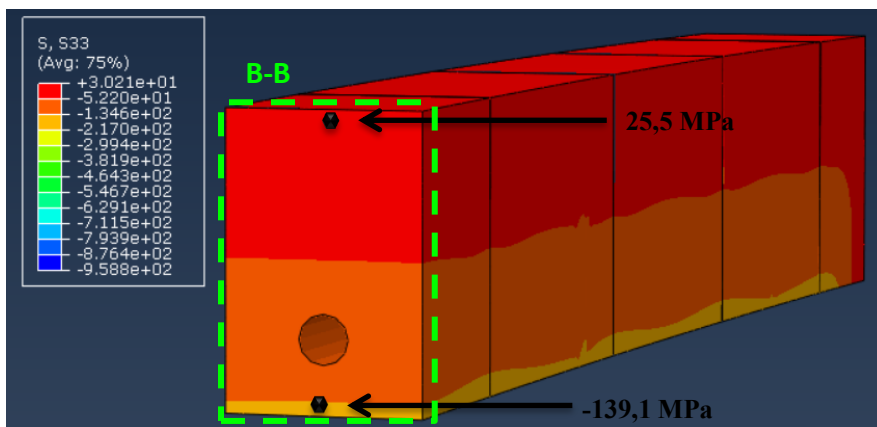
Opazovanje strižnih sil v prerezu nosilca A-A pa ni merodajno. Za njihovo preverjanje je potrebno preveriti še druga mesta po nosilcu. Izkaže se, da maksimalna strižna obremenitev v koraku prednapetja nikjer ne preseže sile 5 kN, kar pomeni, da smo z uporabljenimi povezovalnimi plastmi (EVA folija ali UV lepilo) ali pa samo v primeru prereza stekla znotraj vseh meja, ki jih je nosilec sposoben prenesti.

Za potrditev, da je sila prednapetja 500 kN primerna, si moramo ogledati še napetosti po nosilcu. Slika 52 prikazuje napetosti v smeri osi nosilca (S33). Na točnem izpisu napetosti za posamezne končne elemente vidimo, da tlačne napetosti na spodnjem robu v prerezu A-A znašajo okoli 151,3 MPa, na zgornjem robu pa so na tem mestu natezne napetosti praktično enake 0 MPa. Na mestu stikovanja steklenih elementov se natezne napetosti ne morejo razviti. Edini način za razvoj nateznih napetosti na zgornjem robu je preko oz. s pomočjo vmesne povezovalne plasti, ki v izdelanem numeričnem modelu ni upoštevana.



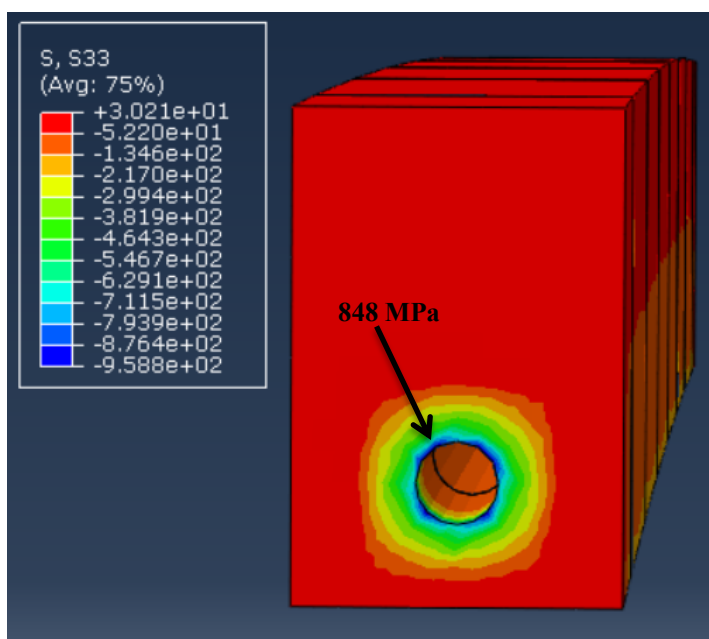
Slika 52: Napetosti S_{33} [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza A-A po prednapenjanju.

Dodatno pa je potrebno napetosti preveriti na mestih, kjer se natezne napetosti lahko razvijejo, npr. na razdalji 800 mm oz. prerezu B-B, ki predstavlja sredino enega izmed 200 mm velikih segmentov. Ravno tu pridemo do primera, ko nam numerični model omogoča vpogled v več različnih scenarijev dejanske izvedbe nosilca. Če bi bil nosilec izdelan iz 140-tih kosov stekla in povezan z npr. EVA folijo, ki omogoča velike deformacije (ali pa, če nosilec niti ne bi imel vmesnih povezovalnih plasti), bi dejansko v tem primeru lahko opazovali samo tlačne napetosti v steklu in natezne napetosti v steklenih vlaknih. V drugem primeru, ko pa bi bil stekleni nosilec izdelan iz večjih posameznih segmentov stekla, npr. 200 mm veliki kosi, pa se (odvisno od mesta obremenitev) na teh delih lahko razvijejo natezne napetosti v steklu, ki bodo predstavljale omejitev nosilnosti steklenega nosilca. Slika 53 prikazuje napetosti na zgornjem in spodnjem robu nosilca v koraku prednapetja v prerezu B-B (sredina enega izmed 200 mm velikih steklenih elementov). Vidimo lahko, da tlačne napetosti na spodnji strani nosilca znašajo 139,1 MPa, natezne napetosti na zgornji strani pa so tudi znotraj meje natezne trdnosti stekla in znašajo 25,5 MPa. Sila prednapetja 500 kN je torej popolnoma ustrezna in znotraj vseh mejnih napetosti za modeliran nosilec.



Slika 53: Napetosti S_{33} [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza B-B po prednapenjanju.

Zaradi velike občutljivosti stekla na lokalne konice napetosti je smiselno preveriti še, kaj se dogaja na mestu vnosa sile prednapetja na začetku oz. koncu nosilca. Slika 54 prikazuje razporeditev napetosti okoli odprtine, skozi katero potekajo steklena vlakna. Po pregledu napetosti za posamezne končne elemente ugotovimo, da največja tlačna napetost lokalno znaša 848 MPa, kar je ravno v bližini mejne tlačne napetosti v steklu (torej smo izvedli maksimalno možno prednapetje ob upoštevanju kasnejšega dodatnega prirastka napetosti ob obremenjevanju).

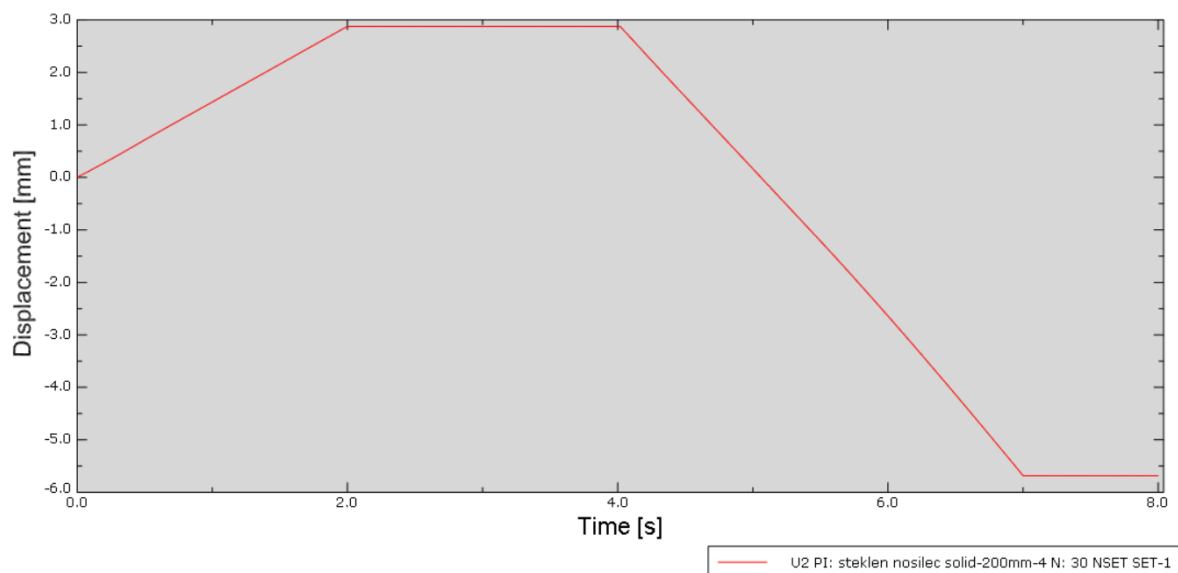


Slika 54: Napetosti S33 [MPa] na mestu nosilca, kjer preko končnih plošč vnašamo silo prednapetja v fazi končanega prednapenjanja.

Kot že omenjeno, se je nosilec zaradi ekscentrične sile prednapetja na sredini dvignil za 2,88 mm. Na mestu, na katerem v koraku vsiljevanje pomika začnem vnašati pomik, pa se je nosilec dvignil nekoliko manj, in sicer 2,605 mm. Prisekani valji, preko katerih vsiljujem pomik, pa so bili globalno pred začetkom analize definirani 5 mm nad nosilcem. Po izvedenem prednapetju je tako vertikalna razdalja med elementom za vsiljevanja pomika in nosilcem 2,395 mm. V analizi sem definiral vsiljevanje pomika velikosti 10 mm, vendar se v prvih 2,395 mm pomika nosilec in prisekani valji še ne dotikajo.

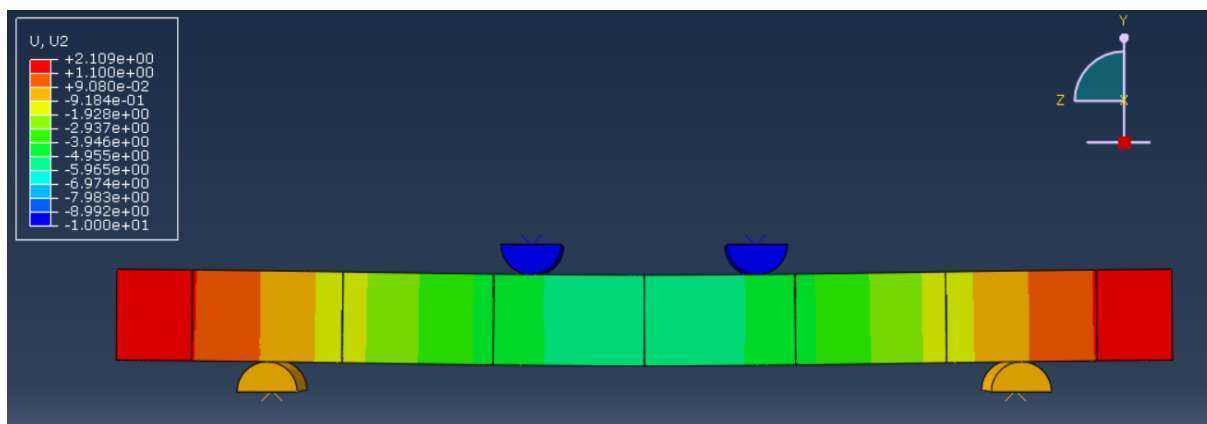
Slika 55 prikazuje pomike v izbrani točki T (prikazani na sliki št. 46) v odvisnosti od časa za celotno numerično analizo. Od 0,0 sekunde do 2,0 sekund je korak prednapetja. Sledi časovni korak dolžine 1,0 sekunde, v katerem le vzdržujem silo prednapetja. Nato od 3,0 sekunde do 7,0 sekunde vsiljujem pomike. Do časovne točke 4,02 sekunde se praktično nič ne dogaja, saj se prisekani jekleni valji še niso dotaknili nosilca. Šele po preteku 4,02 sekunde se začne dejansko vsiljevanje pomika za 7,605

mm glede na mesto vsiljevanja pomika oz. 8,564 mm glede na točko T. V času 7,0 sekunde pa se začne še korak test002 dolžine 1,0 sekunde, v katerem se le vzdržuje izveden pomik in je namenjen preverjanju pravilnega delovanja numeričnega modela.

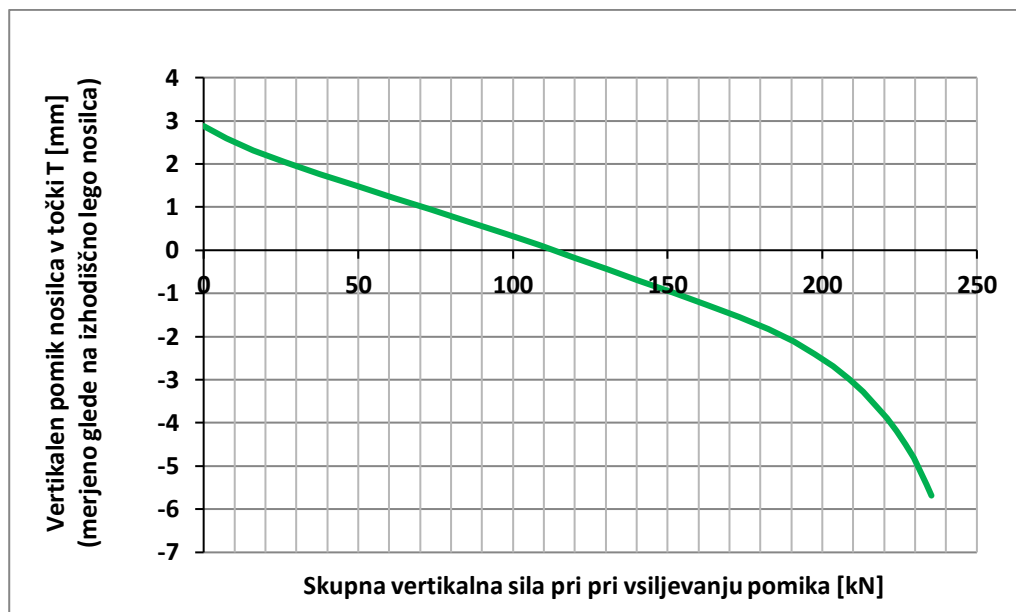


Slika 55: Vertikalni pomik nosilca v odvisnosti od časa v točki T.

Na sliki 56 je s pomočjo barvnih kontur prikazan vertikalni pomik nosilca. Vidimo lahko, da se sredina nosilca pomakne navzdol, medtem ko se krajni konci nosilca dvignejo. Slika 57 prikazuje vertikalne pomike točke T v odvisnosti od vertikalne sile, ki je potrebna, da se pomik zgodi. Slika prikazuje čas od začetka vsiljevanja pomikov naprej, ko je nosilec dvignjen za 2,88 mm. Vidimo lahko, da je za izvedbo limitnega pomika, nosilec potrebno na posamezno točko obremeniti s silo 117 kN oz. s skupno obtežbo 234 kN.

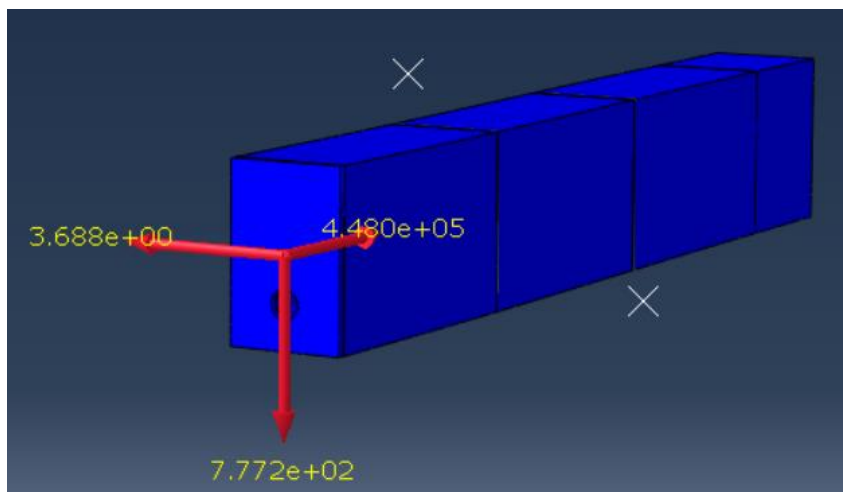


Slika 56: Vertikalni pomiki U2 [mm] nosilca po vsiljevanju pomikov.

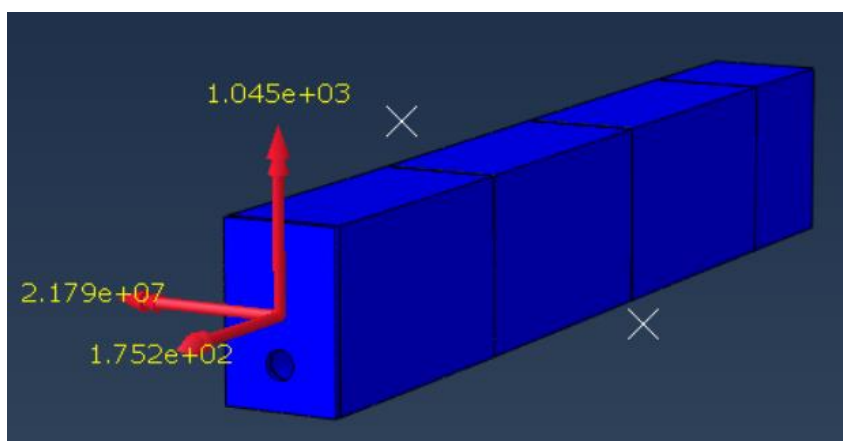


Slika 57: Vertikalni pomik nosilca v točki T, v odvisnosti od sile, ki je za izvedbo pomika potrebna.

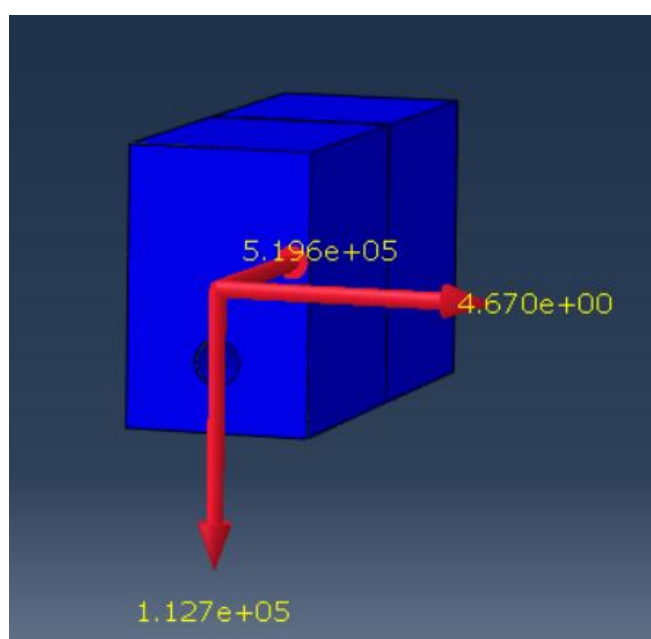
Slika 58 prikazuje prerez steklenega nosilca A-A, kjer vidimo razpored in velikost osnih in strižnih sil. Slika 59 pa prikazuje razpored in velikost momentov v istem prerezu. Opazimo lahko, da osna sila ni več enaka 500 kN, ampak se je nekoliko spremenila. Sprememba je najverjetneje posledica stika med steklenimi vlakni in notranjim delom steklenih elementov ter med prisekanimi valji za vsiljevanje pomika in steklenimi elementi. Zopet (kot pričakovano) so strižne sile izven ravnine nosilca na tem mestu prereza zanemarljivo majhne, le 3,7 N. Strižne sile v ravnini nosilca pa na tem mestu znašajo 777 N, kar še vedno ni veliko in ne predstavlja problema. Ob pregledu preostalega dela nosilca in strižnih napetosti se pričakovano pojavijo večje strižne sile na mestih podpor in vsiljenih pomikov in dosežejo vrednosti okrog 112,7 kN (v prerezu C-C), kar je ravno nekje v bližini mejne nosilnosti EVA folije in UV lepila glede na izvedene eksperimentalne teste (brez upoštevanje osne sile). Na sliki 60 lahko vidimo razpored osnih in strižnih sil na mestu 200 mm od roba nosilca, na mestu podpore oz. v prerezu C-C. Vsiljevanje pomika pa je sicer povzročilo pozitiven moment 21,79 kNm okrog osi X.



Slika 58: Sile [N] v prerezu nosilca A-A po vsiljevanju pomikov.

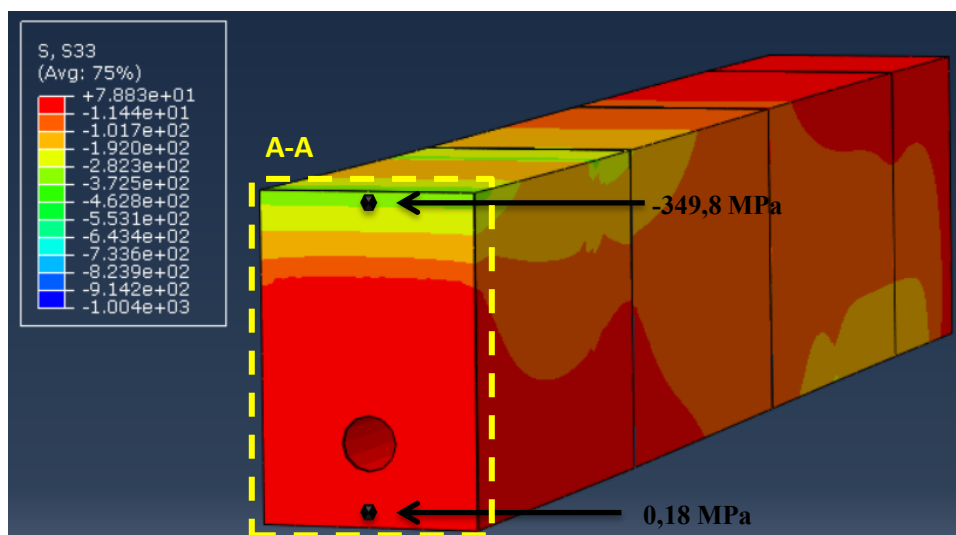


Slika 59: Momenti [Nmm] v prerezu nosilca A-A po vsiljevanju pomikov.

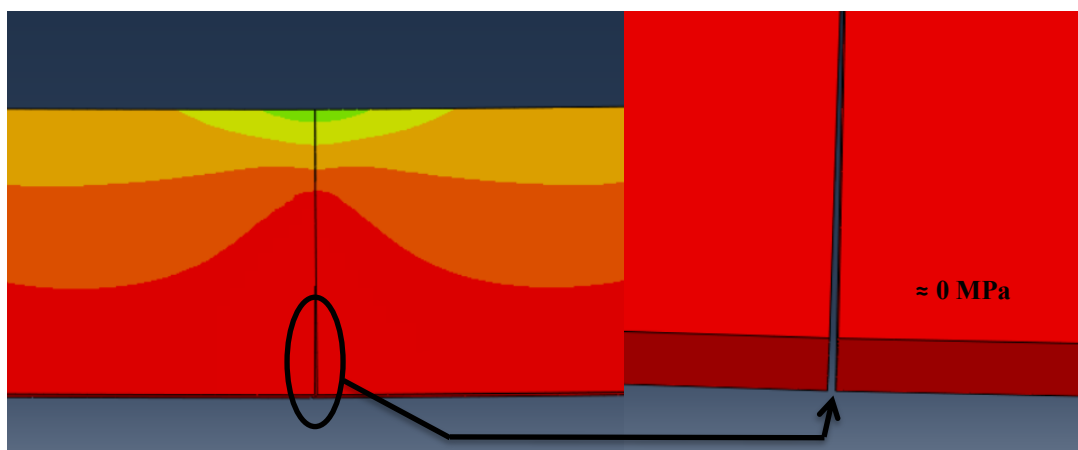


Slika 60: Sile [N] v prerezu nosilca C-C po vsiljevanju pomikov.

Potrebno je preveriti še stanje z nivoji napetosti na zgornjem in spodnjem robu nosilca. Za potrditev, da je obtežba, oz. da so vsiljeni pomiki znotraj meje nosilnosti, si moramo ogledati še napetosti po nosilcu. Slika 61 prikazuje napetosti v smeri osi nosilca (S33). Na točnem izpisu napetosti za posamezne končne elemente vidimo, da tlačne napetosti na zgornjem robu v prerezu A-A znašajo okoli 349,8 MPa, na spodnjem robu pa so na tem mestu natezne napetosti praktično enake 0 MPa. Na mestu stikovanja steklenih elementov se natezne napetosti ne morejo razviti. Opazujemo podobne pojave kot pri koraku prednapetje, vse napetosti pa se nahajajo znotraj mejnih vrednosti. Slika 62 prikazuje, kako se stekleni nosilec na mestu prereza A-A (točka stikovanja steklenih elementov) na spodnji coni odpre. Poleg opazovanega prereza tik ob stikovanju elementov (enako velja za vse točke stikovanja v primeru nosilca s 140-timi kosi stekla) lahko preverimo še dogajanje v primeru nosilca, sestavljenega iz večjih (200 mm velikih) segmentov stekla, kjer so merodajne tudi natezne napetosti v steklu.

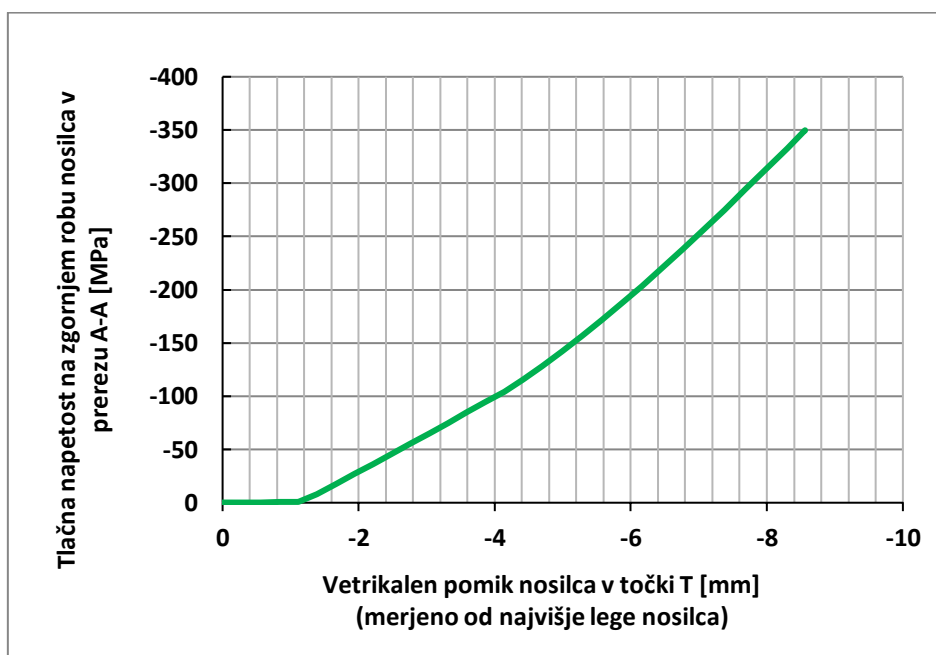


Slika 61: Napetosti S33 [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza A-A po vsiljevanju pomikov.



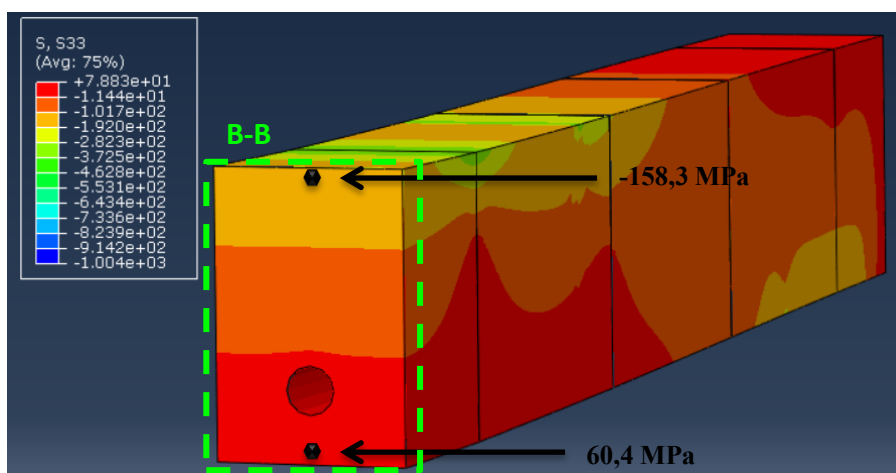
Slika 62: Odpiranje spodnje cone na mestu stikovanja steklenih elementov v prerezu A-A.

Na sliki 63 lahko vidimo prikazano odvisnost med vertikalnim pomikom nosilca v točki T ter tlačno napetostjo na skrajnem zgornjem robu nosilca v prerezu A-A. Graf prikazuje odziv nosilca v časovnem koraku vsiljevanja pomika. V samem začetku je napetost na zgornjem robu v obravnavanem prerezu enaka nič, saj se elementi nosilca v tem prerezu po prednapetju ne dotikajo (zgornja cona se odpira).



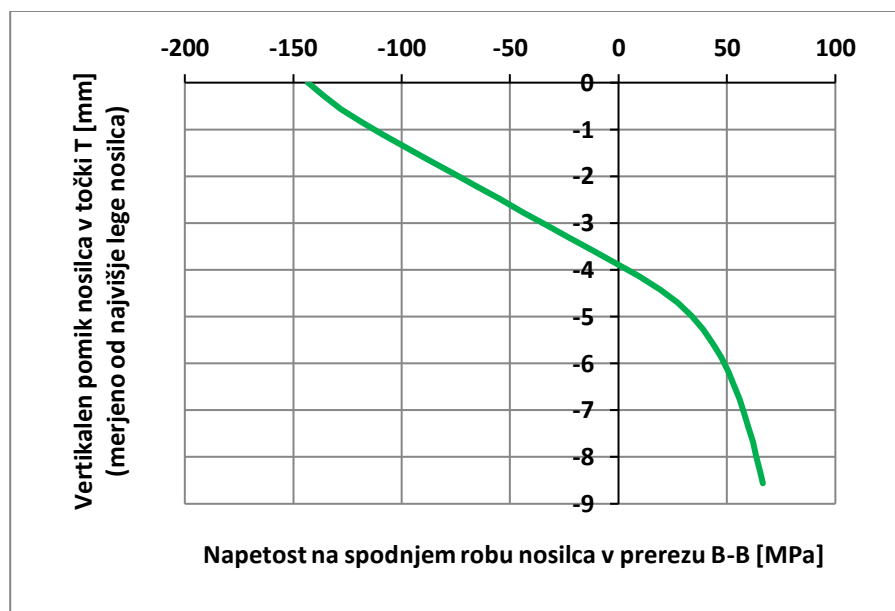
Slika 63: Tlačna napetost na zg. robu nosilca v prerezu A-A v odvisnosti od vertikalnega pomika v točki T.

Slika 64 prikazuje prerez nosilca B-B, ki predstavlja sredino 200 mm velikega segmenta stekla. Vidimo lahko, da tlačne napetosti na zgornjem robu znašajo 158,3 MPa, kar je znotraj tlačne nosilnosti stekla. Natezne napetosti na spodnji strani pa znašajo 60,4 MPa, kar pa je že na meji natezne nosilnosti stekla.



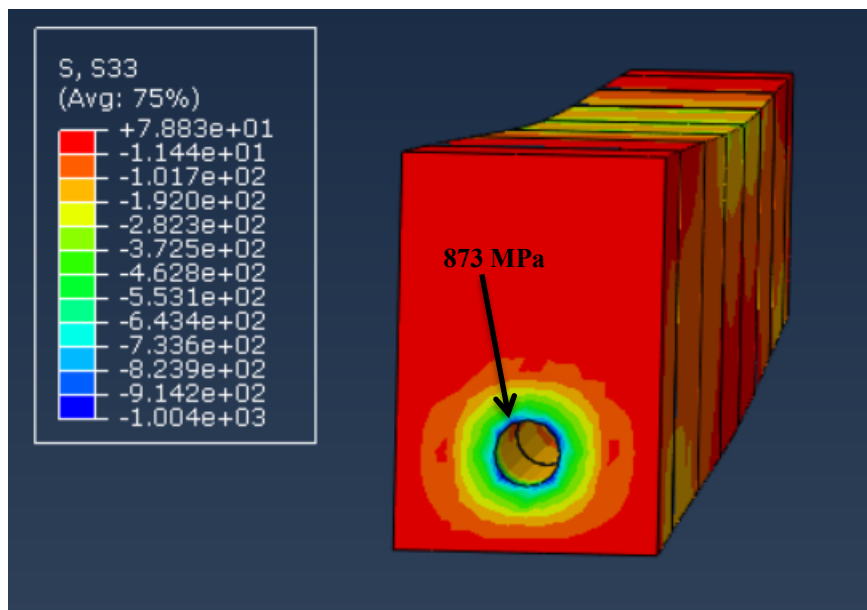
Slika 64: Napetosti S33 [MPa] na zg. in sp. robu nosilca na mestu prereza nosilca B-B po vsiljevanju pomikov.

Slika 65 prikazuje odnos med vertikalnim pomikom nosilca v točki T ter razvojem napetosti na spodnjem robu nosilca v prerezu B-B. Graf prikazuje odziv nosilca v časovnem koraku vsiljevanja pomika. V najvišji legi nosilca se na spodnjem robu pojavljajo tlačne napetosti, ki se skozi obremenjevanje nosilca zmanjšujejo in prevesijo v natezne napetosti.



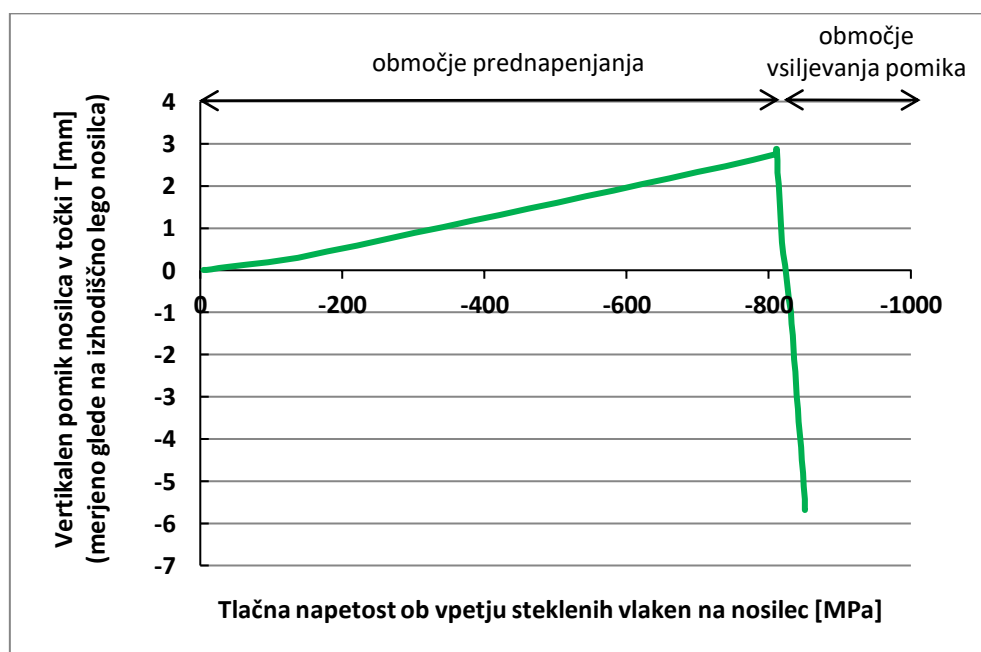
Slika 65: Razvoj napetosti na sp. robu nosilca v prerezu **B-B** v odvisnosti od vertikalnega pomika v točki **T**.

Zopet je smiselno preveriti stanje napetosti na koncu nosilca, na mestu, kjer se preko končnih ploščic vsiljuje sila prednapetja, preveriti pa moramo tudi stanje napetosti v steklenih vlaknih. Sila v vlaknih se je zaradi deformiranja nosilca povečala za 19,7 kN na 519,7 kN, kar za nosilnost steklenih vlaken ni problematično. Zaradi relativno majhnega povečanja sile v vlaknih tudi povečanje koncentriranih napetosti na koncih nosilca ni prav veliko. Na sliki 66 lahko vidimo novo razporeditev napetosti v okolici odprtine na koncu nosilca. Maksimalna konica na posameznem elementu znaša 873 MPa.



Slika 66: Napetosti S33 [MPa] na mestu nosilca, kjer preko končnih plosč vnašamo silo prednapetja v fazi končnega vsiljevanja pomikov.

Slika 67 prikazuje razvoj konice tlačne napetosti ob vpetju steklenih vlaken v nosilec v odvisnosti od vertikalnega pomika nosilca v točki T. V grafu lahko vidimo, da se v koraku prednapenjanja nosilec dvigne, tlačne napetosti pa narastejo. V koraku prednapetja se zgodi največji del prirastka tlačnih napetosti. V koraku obremenjevanja oz. vsiljevanja pomika pa je prirastek k napetostim relativno majhen.



Slika 67: Razvoj napetosti ob vpetju steklenih vlaken v odvisnosti od vertikalnega pomika nosilca v točki T.

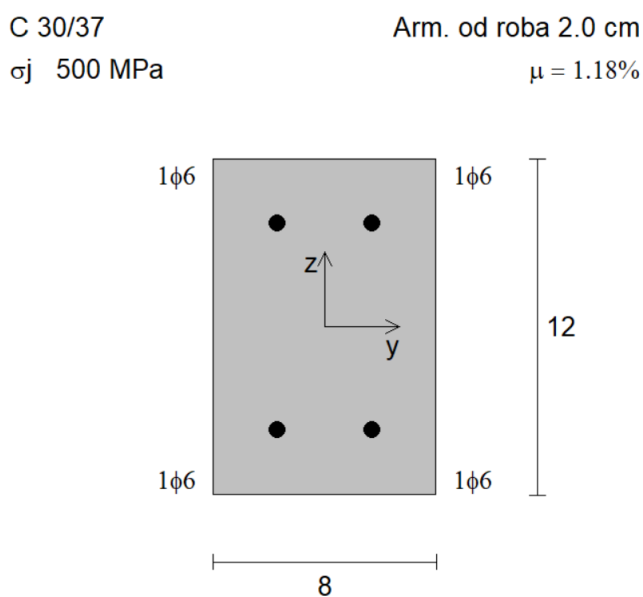
6.6 Kritični komentarji rezultatov in primerjava z nosilnostjo primerljivega AB prereza

Stekleni nosilec, ki sem ga modeliral v numerični analizi, skupaj z izvedenim prednapetjem in vsiljenim pomikom kot obtežbo, predstavlja model praktično maksimalno obremenjenega steklenega nosilca s takšno geometrijo (nosilec iz večjih 200 mm velikih segmentov). Steklена vlakna so izkoriščena do skoraj maksimalnih zmožnosti. Seveda je maksimalna možna obremenitev vlaken odvisna tudi od tega, katere vrste steklenih vlaken uporabljamo. Lahko trdim, da sem (celostno gledano) steklena vlakna precej dobro izkoristil. V tlaku s steklom v numerični analizi nisem imel problemov, saj tudi na območju lokalno koncentriranih napetosti nisem presegel maksimalno možnih tlačnih napetosti. Nekoliko večji problem so predstavljale natezne napetosti, čeprav je natezna trdnost stekla veliko večja od natezne trdnosti drugih materialov, npr. betona. Problem pri nategu v steklu je predvsem v skoraj gotovi poškodbi celotnega elementa, če lokalno dosežemo natezno trdnost stekla. Podobno velja sicer tudi za tlačne napetosti, a tam imamo nekoliko večje rezerve.

Dejstvo je, da je začetek raziskave steklenega prednapetega nosilca obetal tudi realen eksperiment steklenega nosilca polne velikosti. Ravno zaradi tega je bil prvotni prerez steklenega nosilca zasnovan na osnovi že dobro preučenega AB nosilca. Zaradi finančnih omejitev takšni testi niso bili mogoči. Sledilo je zmanjšanje in optimiziranje dimenzij steklenega nosilca zato, da bi lahko kljub vsemu eksperimentalno testiral nekoliko pomanjšan stekleni nosilec. Kasneje pa sem ugotovil, da tudi takšnega eksperimenta ne bo mogoče izvesti. Numerični model je bil v tej fazi že izdelan na osnovi pomanjšanega prereza. Posledica tega pa je, da stekleni nosilec takšnih dimenzij težko primerjam z omenjenim AB nosilcem. Vsaj za razumevanje nivoja nosilnosti stekla v primerjavi z betonom pa sem kljub vsemu poskusil na poenostavljen način izvesti neko primerjavo.

Numerični model steklenega nosilca je v mojem specifičnem primeru sposoben prenesti moment 21,79 kNm, kar za prerez tako majhnih dimenzij, 120 mm x 80 mm, nikakor ni zanemarljivo. Betonski prerez brez dodatne utrditve, s katerim sem želel primerjati rezultate, je velik 240 mm x 120 mm ter je bil sposoben prenesti okoli 45 kNm. Prerez steklenega nosilca s 4-krat manjšo površino je bil sposoben prenesti polovičen moment neutrenega betonskega nosilca. Nosilnosti prereзов različnih dimenzij pa zelo težko primerjamo, zato sem v programu DIAS-P modeliral prerez, katerega sem lahko uporabil za neko osnovno primerjavo nosilnosti prereзов. Slika 68 prikazuje uporabljen prerez za primerjavo nosilnosti prereзов. Gre za betonski prerez dimenzij 120 mm x 80 mm, iz betona trdnostnega razreda C30/37, ki je armiran s štirimi armaturnimi palicami $\phi 6$. Tlačna in natezna armatura sta od robov odmaknjeni enako, in sicer za 2 cm. Z uporabljen količino armature pa je prerez 1,18 % armiran. Vsi materialni in obtežni varnostni faktorji so bili nastavljeni na faktor 1,0, saj sem želel pridobiti podatek o realni maksimalni nosilnosti betonskega prereza (podobno, kakor sem maksimalno nosilnost določil obravnavanemu steklenemu nosilcu). Zasnovan betonski prerez je

izkazal upogibno nosilnost 5,86 kNm in je v primerjavi z obravnavanim steklenim nosilcem zmožen prenesti cca. 4-krat manjšo obremenitev. Potrebno pa je poudariti, da je bil modeliran armiranobetonski prerez zasnovan le za grobo oceno primerjave nosilnosti in nikakor ni bil optimiziran in proučen do takšnih razsežnosti, kakor sem to storil s steklenim nosilcem. S povečanjem armature na $\phi 8$ in s tem povečanjem procenta armiranosti na 2,09 % se sicer nosilnost prereza poveča na 6,6 kNm, a dejstvo je, da je za tako majhen prerez količina armature zelo velika. Problematična pa je tudi krovna plast betona, ki je v tem primeru zelo majhna oz. premajhna.



Slika 68: AB prerez, zasnovan za primerjavo nosilnosti s steklenim nosilcem.

Glavna teoretična omejitev obravnavanega steklenega nosilca se pravzaprav skriva v natezni trdnosti stekla v večjih posameznih segmentih. Če bi segmente zares razdelili na steklene lamele debelin 10 mm ali manj in jih med seboj ne bi spojili (skupaj bi jih držala le sila prednapetja in trenje med posameznimi kosi), ne bi več imeli problemov z natezno trdnostjo stekla in bi v izbranem sistemu obravnavali le tlačno trdnost stekla in natezno trdnost steklenih vlaken. Pripravljen numerični model mi je omogočil, da sem tudi to možnost z nekaj popravki numeričnega modela za neko grobo oceno lahko preveril. Potrebno je poudariti, da se na tej točki nisem več ukvarjal z lokalnimi konicami napetosti, ampak sem opazoval le nosilnost na nivoju prereza. Ocena upogibne nosilnosti je v takem primeru znašala kar 42,3 kNm. Tlačne napetosti na zgornjem robu v takem primeru znašajo okrog 943 MPa, natezne napetosti na spodnjem robu pa se ne morejo razviti in so enake 0 MPa. V teoriji je takšno nosilnost prereza mogoče doseči, a v praksi menim, da bi prišlo do lokalnih konic napetosti, ki bi dosegle tlačno ali natezno trdnost stekla že bistveno prej (predvsem na mestih vnosa sile prednapetja). Menim pa, da bi v realnosti z npr. 10 mm debelimi segmenti stekla z lahkoto dosegli nosilnost okrog 22 kNm, tudi ob dodatnem upoštevanju vseh materialnih in obtežnih varnostnih faktorjev.

7 ZAKLJUČEK

S pojmom steklo definiramo katerokoli nekristalinično trdnino (amorfno trdnino), ki izkazuje lastnost steklastega prehoda, kadar jo segrevamo. Najbolj poznano in širše uporabljeno steklo je natrij kalcijevo silikatno steklo oz. natrijevo steklo (Na-Ca-SiO_4). Steklo je material, ki se obnaša linearno elastično skoraj do porušitve. Ima zelo visoko tlačno trdnost, okrog 1000 MPa, ter visoko teoretično natezno trdnost, ki je zaradi površinskih nepravilnosti in mikro razpok ne moremo v celoti izkoristiti. Dejanska natezna trdnost stekla, na katero lahko računamo, tako znaša med 30 MPa in 120 MPa (odvisno od vrste stekla ter načina obdelave). V posebnem primeru, ko steklo uporabimo v obliki steklenih vlaken, pa lahko dosežemo natezne trdnosti tudi preko 3000 MPa.

Koncept upogibnega prednapetega steklenega nosilca temelji na visoki tlačni trdnosti stekla in visoki natezni trdnosti steklenih vlaken. Poleg numerične analize steklenega nosilca sem želel izdelati in preizkusiti stekleni nosilec še v polni velikosti ter ga primerjati s primerljivim AB nosilcem. Zaradi časovnih, izvedbenih in finančnih okvirjev se je taka analiza izkazala kot nemogoča. Optimizirani prednapeti stekleni nosilec je tako obravnavan le numerično, skupaj s spremljevalnimi preiskavami.

V okviru spremljevalnih preiskav sem analiziral vmesne povezovalne plasti ter steklena vlakna. Stekla v prvi vrsti lepimo oz. spajamo s pomočjo vmesnih povezovalnih plasti zaradi nosilnosti po nastanku razpok. Ker sem jaz obravnaval izdelavo steklenega nosilca, pa je bilo potrebno razmisliti o lepljenju steklenih elementov tudi zaradi finančno-tehničnih in izvedbenih razlogov glede velikosti oz. debeline posameznih steklenih elementov. Obravnaval sem dva možna načina spajanja steklenih elementov, in sicer EVA folijo ter UV lepilo. Oba načina spajanja sta bila sposobna prenesti podobno visoke strižne obremenitve, a ob zelo različnih deformacijah. EVA folija se je obnašala zelo podajno z bilinearnim odzivom, medtem ko se je UV lepilo obnašalo kot zelo togo in linearno elastično. Testi steklenih vlaken so potrdili, da se steklena vlakna obnašajo pričakovano linearno elastično. Zaradi zelo majhnega premera posameznega steklenega vlakna, v mojem primeru le okoli 22 μm , je manipulacija steklenih vlaken brez prisotnosti neke matrice, ki vlakna med seboj povezuje in varuje, precej neugodna. Posamezno vlakno namreč zaradi njegove majhnosti zelo hitro poškodujemo. Tlačni testi steklenih plošč so bili, žal, neuspešni in dodatno ozaveščajo problem krhkosti stekla.

Numerična analiza je bila izdelana v programskem okolju Abaqus, omogočila pa mi je poglobljen vpogled v razvoj napetosti po nosilcu. Pri obravnavi stekla kot konstrukcijskega materiala je namreč opazovanje lokalnih konic napetosti zelo pomembno. Steklo je namreč krhek material, ki ni sposoben plastičnega deformiranja. Lokalno doseganje nateznih oz. tlačnih trdnosti lahko pomeni porušitev prereza. Obravnavan prerez steklenega nosilca je bil, v primerjavi z enako velikim in tipično armiranim betonskim prerezom, sposoben prenesti skoraj 4-krat večji upogibni moment.

Steklo je zelo zanimiv material, ki ponuja določene prednosti pred ostalimi materiali, ki se običajno uporabljajo v gradbeništvu. Kot že omenjeno, izstopa tlačna trdnost stekla in natezna trdnost steklenih vlaken. Žal pa ima steklo tudi številne slabosti, kot so krhkost, cena, neznanje uporabe materiala ter manjkajoči predpisi projektiranja s tega področja. Menim, da je steklo material z ogromno potenciala za aplikacije, kjer se želi doseči posebne arhitekturne in estetske zahteve. Hkrati sem tudi mnenja, da bo steklo zelo težko kadarkoli preseglo okvire svoje običajne uporabe in prodrlo na trg konstrukcijskih materialov do takšne mere, kot sta na primer beton in jeklo.

8 VIRI IN LITERATURA

- [1] Žarnić, R. 2005, Lastnosti gradiv, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- [2] Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. 2008. Structural Engineering Documents 10. Structural use of Glass. Zürich, Switzerland, IABSE – AIPC – IVBH.
- [3] Antolinc, D. 2014. Uporaba steklenih panelov za potresno varno gradnjo objektov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Antolinc).
- [4] Feldmann, M., Kasper, R., idr. 2014. Guidance for European Structural Design of Glass Components. Luxemburg, Publications Office of the European Union.
- [5] Natrijevo steklo – Tehnični podatki.
<https://www.structuralglass.org/single-post/2016/11/26/glass-physical-properties>
(Pridobljeno 20. 6. 2023.)
- [6] Borosilikatno steklo – Tehnični podatki.
<https://www.saidaglass.com/sl/news/what-is-borosilicate-glass-and-its-characteristics>
(Pridobljeno 14. 7. 2023.)
- [7] Srivastava, P. J., Kumar, P. 2022. Introduction to Glass Fiber – Based Composites and Structures. Telangana, SR University, Department of Mechanical Engineering, Center for Materials and Manufacturing.
- [8] Lopatič, J. 2012. Betonske konstrukcije II B-UNI. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. str.: 23–26
- [9] Strato EVA vmesne povezovalne plasti – Splošni podatki o izdelkih proizvajalca Satinal.
<https://www.satinal.it/en/glass-interlayers-strato/> (Pridobljeno 2. 7. 2023.)
- [10] Proost, K., Moeyersons, L. 2021. Architectural Glass – Laminating Guide.
<https://lami-solutions.medium.com/introduction-to-the-use-of-eva-in-glass-lamination-de6952548ece>
(Pridobljeno 10. 6. 2023.)

- [11] EVA folija, Strato Extra chiaro - Tehnični podatki.
<https://www.satinal.it/en/s-lab-documentation/> (Pridobljeno 10. 7. 2023.)
- [12] Slikovni prikaz različnih pristopov « Peel off» testa.
https://www.china-floor-inspection.com/blog/what-is-180-peel-tensile-test-_b10
(Pridobljeno 14. 7. 2023.)
- [13] Predstavitev uporabe UV lepila <https://steklarstvo-stoiljkovic.si/uv-lepljenje/>
(Pridobljeno 15. 6. 2023.)
- [14] Tehnične smernice za uporabo UV lepila.
<https://www.technologylk.com/images/TechnicalDrawings/UVinstruction.pdf>
(Pridobljeno 12. 7. 2023.)
- [15] UV lepilo Bohle LV740 - Tehnični podatki.
<https://www.bohle.com/en-gb/products/glass-bonding/adhesives/2474/uv-adhesive-verifix-lv-740>
(Pridobljeno 10. 7. 2023.)
- [16] Aurik, M., Snijder, A., Noteboom, C., Nijse, R., Louter, C. 2018. Experimental analysis on the glass-interlayer system in glass masonry arches. Delft, University of Technology, Faculty of Architectural Engineering and Technology, Springer International Publishing AG.
- [17] Klun, M. 2017. Utrditev upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca s kompozitnimi CFRP lamelami. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Klun).
- [18] Yost, J. R., Cregan, M., Bolhassani, M., Akbarzadeh, M., Lu, Y., Chhadeh, P. A., Schneider, J. 2022. Experimental Investigation of a Transparent Interface Material for Glass Compression Members. Ghent University, Belgium. Challenging Glass Conference Proceedings – Volume 8.
- [19] Dimas, M., Oikonomopoulou, F., Bilow, M. 2022. An Interlayer Material Study Towards Circular, Dry-Assembly, Interlocking Cast Glass Block Structures. Ghent University, Belgium. Challenging Glass Conference Proceedings – Volume 8.

[20] Slikovni prikaz običajnega steklenega lameliranega nosilca.

<https://www.better-glass.com/sgp-laminated-glass1/13.52mm-clear-tempered-laminated-glass,-13.52mm-toughened-glass,-6mm-1.52pvb-6mm-tempered-glass.html>

(Pridobljeno 9. 12. 2023.)

[21] 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*, Volume 22.

[22] Silvestru, V.-A., Deng, Z., Michels, J. and Taras, A. 2022. Enabling a Ductile Failure of Laminated Glass Beams with Iron-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) Strips. *ce/papers*, 5: 948–956.

[23] Riddel – Smith, L., Mandal, P., Cunningham, L. 2019. Effective Thickness Design Methods for Lateral-Torsional Buckling of Laminated Glass. University of Manchester. *Journal of Structural Engineering*, Volume 145, Issue 12.

[24] SIST-TS CEN/TS 19100-1:2022

Projektiranje steklenih konstrukcij – 1. del: Osnove projektiranja in materiali

(Design of glass structures – Part 1: Basis of design and materials)

SIST-TS CEN/TS 19100-2:2022

Projektiranje steklenih konstrukcij – 2. del: Projektiranje steklenih elementov pod vplivom obtežb izven ravnine elementov

(Design of glass structures – Part 2: Design of out-of-plane loaded glass components)

SIST-TS CEN/TS 19100-3:2022

Projektiranje steklenih konstrukcij – 3. del: Projektiranje steklenih elementov pod vplivom obtežb, ki delujejo v ravnini elementov in njihovih mehanskih spojev

(Design of glass structures – Part 3: Design of in-plane loaded glass components and their mechanical joints)