

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Bolarič, D., 2015. Vpliv vzdolžnih ojačitev na obnašanje upogibno obremenjenih lesenih nosilcev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentor Antolinc, D.): 35 str.

Datum arhiviranja: 05-10-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Bolarič, D., 2015. Vpliv vzdolžnih ojačitev na obnašanje upogibno obremenjenih lesenih nosilcev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisor Antolinc, D.): 35 pp.

Archiving Date: 05-10-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

DEJAN BOLARIČ

**VPLIV VZDOLŽNIH OJAČITEV NA OBNAŠANJE
UPOGIBNO OBREMENJENIH LESENIH NOSILCEV**

Diplomska naloga št.: 216/B-GR

**INFLUENCE OF LONGITUDINAL STRENGTHENING
ON THE FLEXURAL BEHAVIOUR OF TIMBER BEAMS**

Graduation thesis No.: 216/B-GR

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

asist. dr. David Antolinc

Ljubljana, 22. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

IZJAVE

Podpisani Dejan Bolarič izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Vpliv vzdolžnih ojačitev na obnašanje upogibno obremenjenih lesenih nosilcev«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Komenda, 7.8.2015

Dejan Bolarič

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.11:624.072.2(043.2)
Avtor:	Dejan Bolarič
Mentor:	izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Somentor:	asist. dr. David Antolinc
Naslov:	Vpliv vzdolžnih ojačitev na obnašanje upogibno obremenjenih lesenih nosilcev
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	35 str., 9 pregl., 33 sl., 10 en., 3 pril.
Ključne besede:	leseni nosilci, umetni kompoziti, upogibna ojačitev, upogibni preizkus, NSM metoda

Izveleček

Predvsem v historičnih objektih so starejši leseni nosilci v primeru večjih deformacij potrebni sanacije, ki je lahko izvedena bodisi z nadomestitvijo poškodovanega elementa bodisi z ojačitvijo na obstoječ poškodovan element. V stroki obstaja več metod ojačevanja za povečanje togosti oz. upogibne nosilnosti lesenih nosilcev. Proučili smo nekatere pretekle ugotovitve tujih avtorjev, nato pa zasnovali lastno preiskavo na lesenih preizkušancih v merilu 1:1. V okviru preiskave smo preizkusili različne konfiguracije ojačitev v natezni coni. Poleg preizkušancev z ojačitvami iz umetnih kompozitov smo v preiskavo vključili tudi dva primerjalna preizkušanca z jeklenima ojačitvama in dva referenčna brez ojačitev. Na vseh preizkušancih je bil izveden standardni štiri-točkovni upogib, ob katerem smo računalniško vodeno merili pomike, na podlagi njih pa določili module elastičnosti elementov. Na podlagi porušne obremenitve smo določili upogibno nosilnost elementov. Izračunane vrednosti togosti in nosilnosti smo primerjali in ugotovili, kako posamezen sistem ojačevanja vpliva na nosilnost oz. togost.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	691.11:624.072.2(043.2)
Author:	Dejan Bolarič
Supervisor:	Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor:	Assist. David Antolinc, Ph.D.
Title:	Influence of Longitudinal Strengthening on Flexural Behaviour of Timber Beams
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	35 p., 9 tab., 33 fig., 10 eq., 3 ann.
Keywords:	timber beams, FRP, bending reinforcement, four point bending test, NSM method

Abstract

In historic objects, timber beams are often heavily damaged due to various reasons and demand sanitation or strengthening. In structural engineering, various applications of fiber composite or steel reinforcement have been developed in order to achieve higher values of timber beam flexural stiffness or strength. Based on the existing research papers we designed our research plan in order to evaluate the influence of reinforcement on full-scale specimens with different reinforcement configurations. Besides FRP reinforced beams, two beams were reinforced with longitudinal steel strips and tested for comparison. To compare the reinforcement effectiveness, we additionally conducted the four point test on bare timber beams. All of the specimens were tested using standard four-point bending test to capture the beam deflections for elastic moduli evaluation. Flexural strength values of the tested beams were determined based on the failure loads. The comparison of obtained values led us to evaluate the optimal reinforcement configuration and showed us how each configuration influenced the stiffness or strength of the beam. A simplified analytical model of non-linear plastic behaviour is presented and implemented to calculate bending moments at which failures of strengthened beams occur.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Vlatku Bosiljkovu, za izkazano iniciativnost, strokovne nasvete pri zasnovi diplomskega dela ter pomoč pri naročanju materialov, in somentorju, asist. dr. Davidu Antolincu, za svetovanje, spodbudo ter pripravljenost razlage manj razumljivih pojmov ter postopkov. S pomočjo sodelavcev v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Francija Čepona in Boštjana Jursinoviča je preiskava potekala časovno usklajeno, zaradi česar si oba zaslužita zahvalo. Hvala tudi g. Luku Božiču za svetovanje glede detajlov izvedbe ojačitev in podjetju Mapei, d.o.o., za dobavo kompozitov.

Iskrena hvala tudi vam, starša Helena in Darko, sestra Anja, stari starši, ki ste me tekom študija venomer spodbujali, mi v težjih trenutkih namenili prijetne besede in me gmotno podpirali.

Hvala tudi Republiki Sloveniji za večletno štipendiranje in visokošolski sistem, v katerem mi je bilo omogočeno študirati – podrobneje spoznati čudoviti svet gradbene stroke.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	V
BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
ZAHVALA	IX
1 UVOD.....	1
1.1 Opis problema	1
1.2 Poškodbe lesa	2
2 PREGLED LITERATURE	4
3 VLAKNATI KOMPOZITI	6
3.1 Umetna vlakna za ojačevanje gradbenih konstrukcij	7
3.1.1 Ogljikova vlakna	7
3.1.2 Aramidna vlakna	8
3.1.3 Steklena vlakna	9
3.2 Sistemi ojačitev gradbenih konstrukcij z umetnimi kompoziti	10
3.2.1 Ojačitev lesenih konstrukcij	11
4 PREISKAVE UPOGIBNE NOSILNOSTI LESENIH NOSILCEV	12
4.1 Osnovne preiskave konstrukcijskega masivnega lesa	12
4.1.1 Gostota	12
4.1.2 Tlačna trdnost v smeri vlaken	13
4.1.3 Tlačna trdnost v smeri prečno na vlakna.....	14
4.1.4 Upogibna trdnost.....	15
4.2 Preiskave lesenih nosilcev z ojačitvami	18
4.2.1 Priprava preizkušancev	18
4.2.2 Upogibni preizkus ojačanih nosilcev	23
4.3 Rezultati upogibnega preizkusa	26
4.3.1 Lokalni in globalni modul elastičnosti	26
4.3.2 Strižni modul.....	26
4.3.3 Upogibna natezna trdnost.....	27
4.4 Analiza in komentar rezultatov	29
5 ANALITIČNI RAČUN ODPORNOSTI ELEMENTA	34
ZAKLJUČEK.....	35
VIRI.....	36

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Povprečne gostote vzorcev iz preizkušancev.....	13
Preglednica 2:	Rezultati preiskave tlačne trdnosti v smeri vlaken	13
Preglednica 3:	Rezultati preiskave tlačne trdnosti v smeri pravokotno na vlakna	14
Preglednica 4:	Rezultati preiskave upogibne trdnosti vzorcev osnovnega materiala	15
Preglednica 5:	Konfiguracije ojačitev lesenih nosilcev	22
Preglednica 6:	Rezultati porušnega testa preizkušancev brez ojačitev	28
Preglednica 7:	Rezultati porušnega testa preizkušancev z ojačitvami.....	28
Preglednica 8:	Primerjava razmerij nosilnosti osnovnega materiala in nosilnosti ojačanih elementov.....	32
Preglednica 9:	Primerjava razmerij elast. modulov osn. materiala in elast. modulov ojačanih elementov.....	33
Preglednica 10:	Računske in dejanske porušne sile za štiri-točkovni upogib preizkušancev.....	34

KAZALO SLIK

Slika 1.1:	Vzdolžna razpoka v nosilcu kot posledica sušenja in porušitev nosilca zaradi dolgotrajne izpostavljenosti vlagi (Hoath, 2006).....	1
Slika 1.2:	Nosilci, poškodovani v požaru, detajl poškodovanega nosilca s slabim prezračevanjem ob naleganju na zid (Harte, 2013).....	2
Slika 1.3:	Nosilec z izrazito načeto lesno maso po napadu lesnih škodljivcev (Hoath, 2006)	3
Slika 2.1:	Ojačitev lepljenega nosilca z jekleno palico (De Luca, Marano, 2011)	4
Slika 3.1:	Delitev vlaknatih materialov glede na njihov izvor (povzeto po Velkavrh, 2010).....	6
Slika 3.2:	Shema procesa proizvodnje ogljikovih vlaken	7
Slika 3.3:	Cevi iz ogljikovih vlaken, tkanina iz ogljikovih vlaken	8
Slika 3.4:	Svitek aramidnih vlaken, zaščitne rokavice iz aramidnih vlaken	8
Slika 3.5:	Shema procesa proizvodnje steklenih vlaken	9
Slika 3.6:	Posamični snopi steklenih vlaken in tkanina iz steklenih vlaken	9
Slika 3.7:	Ojačevanje <i>gaiole</i> , tradicionalnega lesenega okvirja v historičnem objektu na Portugalskem (Poletti et al., 2014).....	10
Slika 3.8:	Primeri EBR in NSM ojačitev (povzeto po Karimi et al., 2011): (a) vijačena lamela, (b) utori za palice oz. lamele po NSM metodi, (c) lepljena lamela.....	11
Slika 4.1:	Preiskava tlačne trdnosti v smeri vlaken.....	13
Slika 4.2:	Shema preizkusa za določitev tlačne trdnosti v smeri prečno na vlakna (Žarnić et al., 2014), določitev trdnosti iz diagrama pomik-sila (Žarnić et al., 2014), prikaz na enem od vzorcev	14
Slika 4.3:	Shema preizkusa za določitev upogibne trdnosti vzorcev (Žarnić et al., 2014), prikaz na enem od vzorcev	15
Slika 4.4:	Primerjalni diagram normiranih povprečnih lastnosti preizkušancev	16
Slika 4.5:	Jeklena trakova z izvrtanimi luknjami, vijačenje ojačitve na nosilec.....	18
Slika 4.6:	Materiali, uporabljeni za ojačitve po metodi NSM: palice iz steklenih vlaken, ovojna tkanina iz steklenih vlaken, epoksidna lepilna pasta	19
Slika 4.7:	Priprava utorov: vgradnja epoksidne paste, nameščanje palice.....	20

Slika 4.8:	Odmerjanje dimenzij trakov tkanine, nanos začetnega sloja impregnacijskega sredstva po obodu nosilca	21
Slika 4.9:	Ovijanje tkanine, končni izgled ovitega nosilca	21
Slika 4.10:	Shema uporabljenih konfiguracij ojačitev v raziskavi	22
Slika 4.11:	Mehanizem za merjenje pomikov z LVDT merilci	23
Slika 4.12:	Detajl diagonalno nameščenih deformetrov za merjenje strižnih deformacij	23
Slika 4.13:	Prikaz celotne situacije pri štiri-točkovnem upogibu.....	24
Slika 4.14:	Detajl podpiranja preizkušanca z vijačenim jeklenim trakom na spodnjem robu.....	24
Slika 4.15:	Dispozicija štiritočkovnega upogiba z razdaljami po EN 408 (povzeto po Antolinc, 2014)	25
Slika 4.16:	Statični model nosilca pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu	27
Slika 4.17:	Zveze med silami in vertikalnimi pomiki preizkušancev.....	28
Slika 4.18:	Porušitev preizkušanca P5 zaradi razpokanja v oslabljeni natezni coni z utori, detajl globokega prodiranja natezne razpoke in odprtega utora s palicami	29
Slika 4.19:	Porušitev v tlačni coni v obliki uklona vlaken preizkušanca P3, detajl več kot centimeter široke razpoke v tlačni coni	30
Slika 4.20:	Detajl deformiranih podajnih veznih sredstev	30
Slika 4.21:	Porušitev preizkušanca P8 zaradi pretrega ovojne tkanine, detajl porušitve GFRP palice	31

1 UVOD

1.1 Opis problema

Leseni nosilci so tekom svoje življenjske dobe izpostavljeni različnim obtežbam in zunanjim vplivom, najpogosteje lastni in koristni obtežbi, spremembam vlažnosti, temperature ali škodljivcem (glivam oz. žuželkam). Poleg zunanje obremenitve na stanje elementov vpliva tudi reologija lesa v obliki krčenja, lezenja in nabrekanja – posledica reoloških pojavov je delovanje lesa, ki se odraža v časovno odvisnem zmanjšanju trdnosti in povečevanju deformabilnosti elementov (Srpčič, 2008). Dlje trajajoči vplivi lahko privedejo do razpokanosti, povosov ali celo porušitve (slika 1.1), elementom nosilne konstrukcije pa se odvisno od trajanja obtežbe slabšajo mehanske lastnosti. Trdnostne karakteristike materiala so ključne za zagotavljanje odpornosti proti obremenitvam, t.j. za preprečitev prekoračitve mejnih stanj v skladu z zbirko evropskih standardov Evrokod.

Predvsem v historičnih objektih so starejši leseni nosilci v primeru večjih deformacij potrebni sanacije, zato so smiselne raziskave učinkovitosti ukrepov. Tovrstne metode pripomorejo k ohranitvi visoke estetske in tehnične vrednosti objektov. Z leti oslavljen material zahteva, da se v izogib porušitvi ali prekoračitvi povosov, ki bi ogrozili zaupanje v konstrukcijo ali onemogočali varno uporabo, elemente nadomesti ali obnovi. Kadar dodatna statična analiza pokaže, da je nadomestitev konstrukcijskega elementa neizvedljiva oz. neekonomična, je bolj smiselno ojačevanje obstoječega elementa s ciljem preprečiti nadaljnje zmanjševanje nosilnosti oz. povečevanje povosov in morebitno porušitev. Na tržišču so razpoložljive številne metode ojačevanja iz naravnih ali umetno pridobljenih materialov (Velkavrh, 2010).



Slika 1.1: Vzdolžna razpoka v nosilcu kot posledica sušenja (levo) in porušitev nosilca zaradi dolgotrajne izpostavljenosti vlagi (desno) (Hoath, 2006)

V zadnjih desetletjih se drastično povečuje uporaba kompozitov t.i. sistema FRP (*fibre-reinforced polymers*), ki predstavlja alternativo dlje znanim tehnologijam ojačevanja z jeklenimi trakovi. Umetni

kompoziti iz ogljikovih, steklenih oz. aramidnih vlaken, vezanih v matrico poliestra, epoksidne smole ali cementa, so se skozi številne raziskave v zadnjem času izkazali kot produkti z velikim potencialom in več prednostmi (Tajnik et al., 2008).

1.2 Poškodbe lesa

Poškodbe na lesu izvirajo iz abiotskih in biotskih vplivov. Med abiotske vplive štejemo predvsem padavine, temperaturne ekstreme in cikle ter UV svetlobo. Večina poškodb zaradi abiotskih vplivov postane vidnih šele po nekaj letih v obliki obarvanosti, reliefnosti in razpok, ki pa ne dosegajo večjih dimenzij (Pohleven, 2008). Spremembe vlažnosti in požar pa povzročijo drastično spremembo prvotnega videza in uporabne vrednosti elementov.



Slika 1.2: Nosilci, poškodovani v požaru (levo, <http://bjornmoren.com/Moving-into-Kullfallet.html>),
detajl poškodovanega nosilca s slabim prezračevanjem ob naleganju na zid (desno, Harte, 2013)

Zelo pogosto je degradacija lesa dosežena pri nosilcih, podprtih na zidove, kjer ni zagotovljenega zadostnega prezračevanja (Harte, 2013).

Biotski oz. biološki vplivi pa že po nekaj tednih povzročijo vidnejše poškodbe, ki lahko rezultirajo v uničenju lesenih elementov. Mednje spadajo lesni škodljivci – glive in insekti (Pohleven, 2008), ki so pogost krivec za uničenje dediščine v vlažnih prostorih starejših objektov. Videz nosilca po napadu škodljivcev je značilen; objedeni so robovi, zmanjšane dimenzije prereza, zaradi česar se zmanjša odpornostni moment elementa oz. njegova nosilnost (Hoath, 2006).



Slika 1.3: Nosilec z izrazito načeto lesno maso po napadu lesnih škodljivcev (Hoath, 2006)

2 PREGLED LITERATURE

V splošnem ima gradbeni les relativno dobro tlačno in natezno trdnost, zato je pri njegovem dimenzioniranju pogosto meordajen kriterij povesov in vibracij. V primerih zmanjšane nosilnosti prerezov ali izrazito povečanih obtežb na nosilce pa je potrebna presoja o izvedbi ojačitvenih ukrepov z eno od razpoložljivih metod. Te se razlikujejo v uporabljenih materialih, tehnologijah vgradnje, načinom povezave in posledično v učinkovitosti. Osnovno načelo ojačevanja je uporaba dodatnega materiala z boljšimi mehanskimi lastnostmi (togost, natezna trdnost) od lesa, s čimer se zagotovi odpornost v natezni coni (Tajnik, 2008). Pri izbiri materialov je potrebno upoštevati njihovo kompatibilnost z lesom, s čimer minimiziramo nadaljnje stroške vzdrževanja.



Slika 2.1: Ojačitev lepljenega nosilca z jekleno palico (De Luca, Marano, 2011)

Prvotno so ukrepi za povečevanje togosti elementov temeljili na kovinskih sredstvih, najpogosteje jeklenih pločevinastih trakovih ali palicah. Mark (1961) in Sliker (1962) sta aluminijaste plošče povezala z lesenim jedrom, a so eksperimenti pokazali, da se ob koncentrirani obtežbi plošče zvrnejo, povezava pa prekine. Lantos (1970) je jekleno palico vgradil v vsek na robovih lepljenega nosilca in dosegel povečanje trdnosti in togosti proporcionalno s stopnjo armiranja. Te metode se zaradi kompleksne in dolgotrajne vgradnje niso pojavile v praksi (Gentile, 2000). Razvoj tehnologije polimerov je prinesel nove možnosti za kompatibilna lepila, ki so postala vezno sredstvo v kompozitu jeklo-les. Kot primerna so se razvila poliuretanska, epoksidna in resorcinol-formaldehidna lepila (Tajnik, 2008). Za vgradnjo le-teh je vrezan vsek vzdolž nosilca, kjer se palico oblije z lepilom. Jekleni trakovi so lahko pritrjeni neposredno na stranski rob nosilca z mehansko povezavo (vijačeni), kar pa ne zahteva uporabe lepila. Ena izmed slabosti omenjenih izvedb je korozija jeklenih ojačitev, ki

se dogaja ob stiku nosilca s povečano vlažnostjo. Z uporabo cenejših, korozijsko nezaščitenih trakov, metode s kovinskimi ojačitvami niso najbolj optimalne.

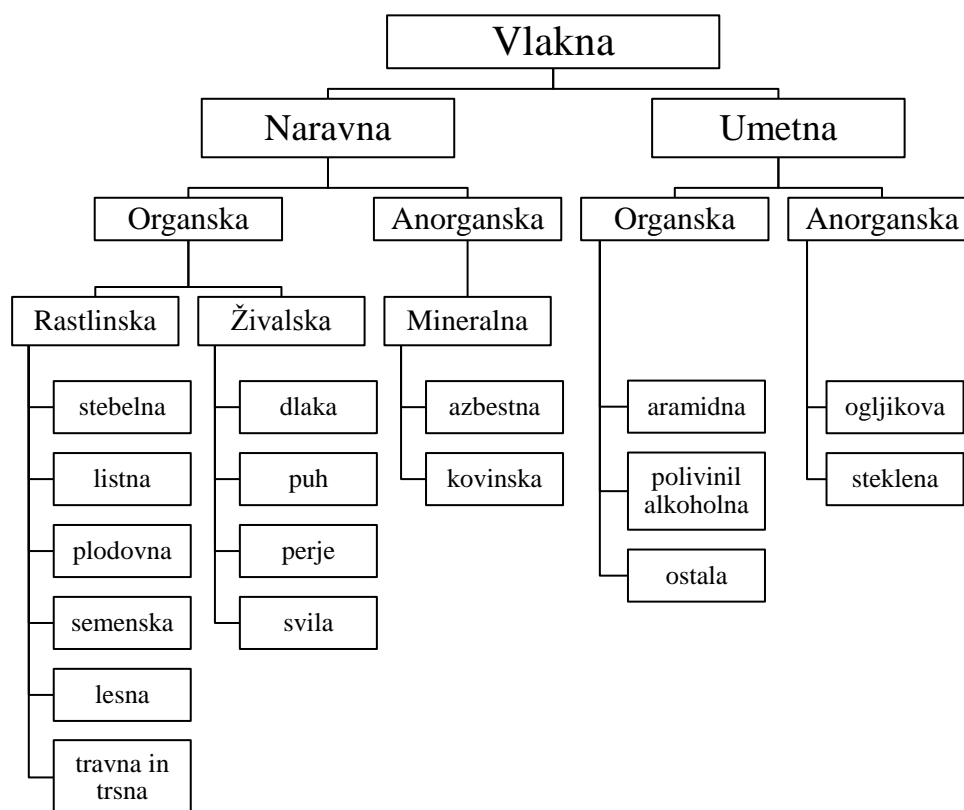
Posledično so nastale tendence po uveljavitvi korozijsko odpornih ojačitev. Pojavile so se polimerne matrice umetnih in naravnih vlaken. Sodobni umetno pridobljeni materiali temeljijo na kompozitni sestavi iz vlaken visoke trdnosti, obdanih z matrico, ki predstavlja šibkejši člen. Dosegajo zelo visoke trdnosti, zaradi česar so postali precej bolj uveljavljeni od kovin. V osemdesetih letih so se pojavile prve raziskave ojačitev v obliki FRP lamel.

V evropskem prostoru se je na področju materialov izoblikovala težnja po razvoju naravi prijaznih materialov. Tudi na področju ojačevanja elementov so se razvili kompoziti iz naravnih vlaken v obliki tkanin iz lanenih in konopljinih vlaken. V primerjavi z umetnimi vlakni dosega nižje trdnosti, hkrati pa vpijajo vlago. Kljub precej nižji ceni (steklena vlakna so npr. približno 4-krat dražja od lanenih) in možnosti recikliranja se v namen ojačevanja v gradbeništvo naravni proizvodi niso razširili tako intenzivno kot umetni (Velkavrh, 2010).

3 VLAKNATI KOMPOZITI

Materiale, ki jih sestavlja več jasno razločljivih komponent, imenujemo kompoziti. Praktično vsi materiali, uporabljeni v gradbeništvu, so mešanica različnih osnovnih materialov (armirani beton, les, asfalt,...). Nekateri od kompozitov so proizvod narave, njihova uporabna vrednost za namene industrije ali gradbeništva je bila spoznana precej kasneje od njihovega odkritja. Zanje je značilna vlaknata sestava, ki je lahko organska ali anorganska. Organska vlakna so rastlinskega ali živalskega izvora. Med rastlinska vlakna sodijo stebelna, listna, plodovna, semenska, lesna, travna in trsna, med živalska pa dlaka, puh, perje in svila. Anorganska vlakna so mineralnega izvora. (Velkavrh, 2010).

V 20. stoletju so se pojavile zahteve po togih, trdnih in lahkih materialih za namene vesoljske, vojaške in letalske industrije. Odprlo se je široko področje umetnih kompozitov, katerih osnovni gradniki so umetna vlakna, povezana v polimerno matrico. Glavni predstavniki teh so ogljikova oz. karbonska (CFRP), aramidna in steklena (GFRP) vlakna. V strukturi kompozita delujejo kot sredstvo zaščite šibkejše matrice pred zunanjimi vplivi in dajejo visoko natezno trdnost in togost.

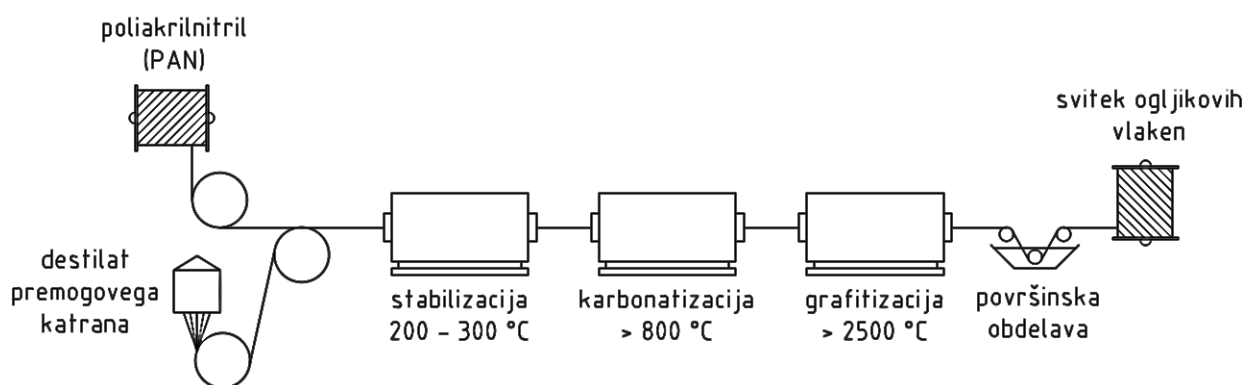


Slika 3.1: Delitev vlaknatih materialov glede na njihov izvor (povzeto po Velkavrh, 2010)

3.1 Umetna vlakna za ojačevanje gradbenih konstrukcij

3.1.1 Ogljikova vlakna

Proizvodnja ogljikovih oz. karbonskih vlaken poteka s kontrolirano pirolizo nekaterih predhodnih vlaknatih materialov, najpogosteje poliakrilnitrila (PAN) in produkta destilacije premogovega katrana (t.i. mezofaza tekočih kristalov). PAN je sintetično pridobljen vlaknat polimer, čigar filamenti so tekom proizvodnje ogljikovih vlaken raztegnjeni in obdelani v več fazah (Bončina, 2005). Prva faza je faza oksidacije, v kateri potujejo skozi oksidacijsko peč pri 200 do 300 °C za doseganje dimenzijske stabilnosti. Sledi faza karbonizacije, v kateri so na 800 °C vse prvine razen ogljika izločene, kar pretvori polimerna rebra v trakove karbonskih kristalitov, orientiranih v smeri vlaken. Tretja faza je grafitizacija v inertni atmosferi na 2000 do 3000 °C (običajno z argonom), ki povzroči rast kristalitov in večjo usmerjenost vlaken. Proces se zaključi z obdelavo površine vlaken in navijanje v svitke (Hollaway, 1993).



Slika 3.2: Shema procesa proizvodnje ogljikovih vlaken (povzeto po Hollaway, 1993)

Pri različnih temperaturah obdelave se razvijejo strukture z različno kristaliničnostjo, iz česar sledi delitev štirih značilnih vrst ogljikovih vlaken glede na njihovo kakovost (Bončina, 2005):

- Visokotrдна vlakna (HT)
- Vlakna visokih togosti (HM),
- Vlakna srednjih togosti (IM),
- Visokotrдна vlakna visokih togosti (HMS).

V gradbeništvu se uporabljajo predvsem vlakna, ki dosežejo vrednosti elastičnega modula okoli 230 GPa, na višjih temperaturah obdelana vlakna pa dosegajo vrednosti modulov prek 400 GPa – ti visokotehnološki proizvodi se uporabljajo npr. v letalski in vesoljski industriji. Natezne trdnosti vlaken znašajo med 3,5 in 6,0 GPa (Cripps, b. d.).



Slika 3.3: Cevi iz ogljikovih vlaken (levo), tkanina iz ogljikovih vlaken (desno)

(Vir: <http://www.rockwestcomposites.com/products/samples-shaped-tubes>,
http://www.alibaba.com/product-detail/200g-Plain-3k-Carbon-Fiber-Fabric_1756219959.html)

3.1.2 Aramidna vlakna

V svetu si nekatera podjetja lastijo patent za aramidna vlakna: najbolj znan je poli-para-fenilen tereftalamid z zaščitenim imenom Kevlar® ameriškega podjetja Du Pont. Na tržišču obstajajo različne različice Kevlarja za različne namene, npr. Kevlar z visoko togostjo za kable, obarvani za ogrodja koles in loparjev, visokoodporni za neprebojne, negorljive oklepe in čelade. Poznani sta še zaščiteni komercialni imeni Twaron® nizozemskega podjetja AkzoNobel in Technora® japonskega podjetja Teijin (Hollaway, 1993). Gradniki vlaken so organske makromolekule, povezane z amidnimi vezmi. Imajo visoko stopnjo kristaliničnosti, togost pa zagotavljajo ponavljajoči se obročasti aromati, povezani z vodikovimi vezmi. Modul elastičnosti aramidnih vlaken je nižji kot pri ogljikovih vlaknih, znaša med 60 in 170 GPa (Bončina, 2005).

Proizvodnja aramidnih vlaken običajno poteka s procesom vlečenja makromolekul raztopine v topilu, ki se izvede na temperaturi med $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hollaway, 1993). Verige makromolekul se z zvišanjem temperature uredijo v piramidalno strukturo, topilo pa v segretem valju izhlapi, kar omogoči pripravo aramidnih vlaken za raztegotvanje, ki poveča njihovo trdnost in togost. Poleg dobrih mehanskih karakteristik odlikujejo aramidna vlakna še nizka električna prevodnost, nizek koeficient termičnega raztezanja, visoka dimenzijska stabilnost in negorljivost (Ryan, b. d.).



Slika 3.4: Svitek aramidnih vlaken (levo), zaščitne rokavice iz aramidnih vlaken (desno)

(Vir: <http://powderfactory.com/construction/>,
<http://www.superiorglove.com/contender-cruiserweight-7-gauge-composite-knit-gloves>)

3.1.3 Steklana vlakna

Glavni gradniki stekla so kovinski oksidi: silicijev oksid SiO_2 , kalcijev oksid CaO , natrijev oksid Na_2O , magnezijev oksid MgO , aluminijev oksid Al_2O_3 in druge primesi (Antolinc, 2014). Proizvodnja nepretrganih steklenih vlaken se izvaja s taljenjem stekla na temperaturi okrog $1400\text{ }^\circ\text{C}$, ki poteka v električnih, regenerativnih pečeh ali pečeh, kurjenih s kisikom. Iz talilne enote steklo teče v predpečico, od koder izteka skozi platinaste šobe – tako nastali filamenti so vlečeni na rotirajoč valj oz. trak, kjer se jih površinsko obdela z vodno prevleko. Obdelana vlakna se poveže v snope predpisanih dimenzij, tako da se zagotovi učinkovito kemijsko povezavo med steklenimi vlakni in polimerno matrico, zmanjšanje abrazije med vlakni ter zmanjšanje poškodb tekom logistike (Hollaway, 1993).



Slika 3.5: Shema procesa proizvodnje steklenih vlaken (povzeto po Hollaway, 1993)

Steklana vlakna se delijo v razrede uporabnosti:

- A-steklo, vlakna z nizko električno upornostjo za izdelavo okenskih šip,
- E-steklo, najpogosteje uporabljena in najcenejša steklena vlakna za ojačitve s kompoziti,
- S-steklo, močnejša vlakna z visoko temperaturno in korozijsko odpornostjo za uporabo v vojaški industriji,
- R-steklo, modifikacija S-stekla za uporabo v elektroindustriji,
- C-steklo, vlakna z odpornostjo proti agresivnim kislim okoljem,
- AR-steklo oz. »Cemfil«, vlakna za uporabo v proizvodnji Portland cementa.



Slika 3.6: Posamični snopi steklenih vlaken (levo) in tkanina iz steklenih vlaken (desno)
(Vir: http://textilelearner.blogspot.com/2011/08/glass-fiber-types-of-glass-fiber_3834.html)

3.2 Sistemi ojačitev gradbenih konstrukcij z umetnimi kompoziti

Ena izmed šestih bistvenih zahtev Zakona o graditvi objektov (ZGO-1, Uradni list RS, št. 102/04) je mehanska odpornost in stabilnost objekta. Za doseganje nosilnosti elementov so poleg primerne dimenzioniranja možni tudi ukrepi za njihovo ojačitev. Pogosta je izvedba v obliki pritrditve dodatnega materiala z boljšimi mehanskimi karakteristikami. Kot izjemno primerni se za ta namen izkažejo umetni kompoziti, njihova izbira pa je odvisna od vrste in namena ojačitve ter vrste osnovnega materiala gradbenega elementa. Glede na osnovni material gradbenega elementa ločimo sisteme za ojačitev armiranobetonskih, zidanih, jeklenih in lesenih konstrukcij, glede na vrsto elementa pa sisteme za ojačitev zidov, stebrov, okvirjev, stropov, nosilcev in stikov.

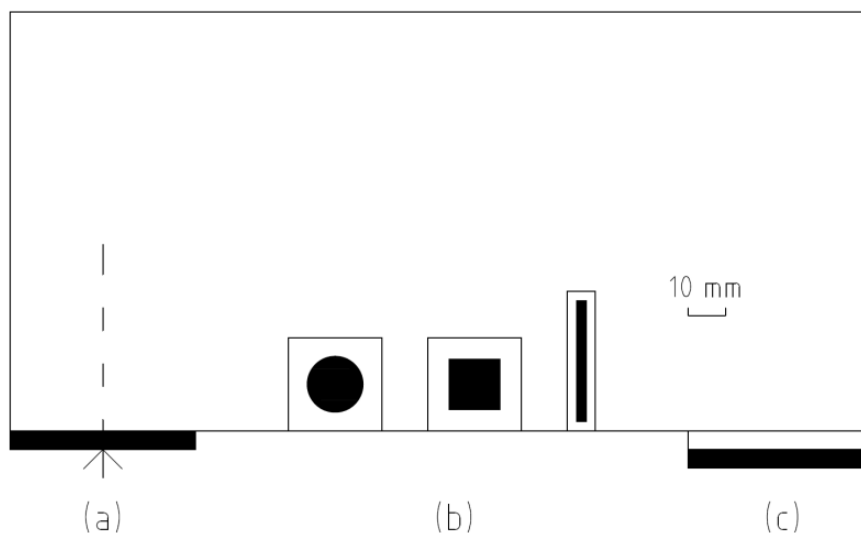


Slika 3.7: Ojačevanje *gaiole*, tradicionalnega lesenega okvirja v historičnem objektu na Portugalskem (Poletti et al., 2014)

Ojačitev elementov je izjemno uporabna predvsem pri sanacijah obstoječih konstrukcijskih elementov, saj z mehansko pritrditvijo ojačitev zagotovimo povečanje nosilnosti elementa, pri čemer se izognemo menjavi elementa, poleg tega je mogoče ohraniti dimenzije prereзов za doseganje povečanih obremenitev, zahtevane korozijske odpornosti oz. odpornosti na agresivna okolja. Menjava konstrukcijskega elementa vedno niti ni smiselna, saj se v začasnem stanju spremeni statični sistem konstrukcije: menjava nosilca lahko ogrozi varnost celotne konstrukcije. Poleg situacij, ko menjava elementov ni mogoča, so v projektih obnove stavbne dediščine (starejši objekti kulturno-zgodovinskega pomena) pogoste zahteve po ohranjanju dimenzij historičnih elementov. V nekaterih državah, npr. na Tajvanu, pravne norme narekujejo, da je »poškodovan lesen element v historično pomembnih objektih lahko nadomeščen le z lesenim elementom, ta pa mora biti iste lesne vrste kot je bil prejšnji – poleg tega se jih mora ojačati za preprečitev poškodb v prihodnje« (Yeou-Fong et al., 2007). V praktični rabi se je na področju ojačitev z umetnimi kompoziti najbolj uveljavila ojačitev armiranobetonskih ter zidanih konstrukcij – te metode so opisane v številnih objavah (npr. Karimi et al., 2011 in Witzany et al., 2014).

3.2.1 Ojačitev lesenih konstrukcij

Podobno kot v primeru armiranega betona in zidovja, tudi metode za ojačitev lesenih elementov temeljijo na osnovni logiki, da z umetnim kompozitom zagotovimo zadostno nosilnost in togost elementa (Tajnik et al., 2008). Možno je pritrjevanje FRP v natezni coni (za upogibno obremenitev) oz. ovijanje s tkanino (za upogibno, tlačno ali strižno obremenitev). Specifični za les sta vpojnost in ortotropnost, zaradi česar je potrebno posvetiti dodatno pozornost načinu pritrjevanja ojačitve. Kot ugotavljata Juvandes in Barbosa (2011), je pritrjevanje lamel z lepili neposredno na rob lesenega elementa (EBR – *externally bonded reinforcement*) manj učinkovito, saj se prenese 40% manj sile, ki bi se prenesla z istim ojačevanjem na betonskem elementu. Ostanje torej možnosti mehanske povezave ojačitve, ovijanje z ovojno tkanino ali alternativna izvedba adhezijskega stika. Kot alternativa se je v zadnjih letih razvila t. i. NSM (*near-surface mounted*) metoda brez lepljenja neposredno na rob elementa. S tem je dosežena večja učinkovitost ojačitve in boljša zaščita ojačitve pred okoljskimi vplivi (Karimi et al., 2011). Metoda predpisuje, da se po dolžini elementa izdelata utor, v katerega se namesti lepilo ter FRP lamele oz. palice. Smiselno je vgrajevanje v natezni coni, pri čemer so možne različne variante položaja in stopnje armiranja. Različni proizvajalci na tržišču ponujajo palice, lamele in tkanine v več izvedbah, npr. palice okroglih in kvadratnih prerezov ali tkanine z enosno oz. večosno nosilnostjo.



Slika 3.8: Primeri EBR in NSM ojačitev (povzeto po Karimi et al., 2011):
(a) vijačena lamela, (b) utori za palice oz. lamele po NSM metodi, (c) lepljena lamela

4 PREISKAVE UPOGIBNE NOSILNOSTI LESENIH NOSILCEV

Na področju konstrukcijskih ojačitev z umetnimi kompoziti zavezujočega ali vsaj splošno priznanega evropskega standarda, ki bi predpisoval računske postopke, še ni. Mehanizem porušitve adhezijskega oz. mehanskega stika med ojačitvijo in lesom je razmeroma zapleten, saj je načinov porušitve več, npr. prestrig vijaka ali strižna porušitev po lepilu, zato je za spoznavanje obnašanja (spremembe togosti ter nosilnosti) elementov smiselna izvedba preiskave. Z eksperimentalnim pristopom želimo pridobiti primerjavo mehanizmov in ugotovitve, na podlagi katerih se dimenzionira ojačitve. Poznan je tudi analitični pristop s poenostavljenim upoštevanjem nelinearne prerazporeditve napetosti. Izvedemo osnovni račun največje obremenitve, ki jo element z ojačitvijo prenese. Za evalvacijo analitičnega pristopa primerjamo eksperimentalno dobljene in računske vrednosti upogibnih momentov ob porušitvi.

4.1 Osnovne preiskave konstrukcijskega masivnega lesa

Kot najbolj pogosto uporabljen gradbeni konstrukcijski les smo za preiskave uporabili masiven smrekov les. S strani dobavitelja nismo dobili podatkov o kvaliteti lesa oz. kontroli proizvodnje, zato smo s preiskavami za vsakega izmed osmih preizkušancev določili lastnosti osnovnega materiala:

- a) povprečno gostoto,
- b) tlačno trdnost v smeri vlaken po DIN 52 180,
- c) tlačno trdnost prečno na smer vlaken po DIN 52 192,
- d) upogibno trdnost in elastični modul pri statični obtežbi po DIN 52 186,
- e) lokalni modul elastičnosti $E_{m,l}$ po EN 408,
- f) globalni modul elastičnosti $E_{m,g}$ po EN 408,
- g) upogibno natezno trdnost $f_{m,l}$ po EN 408.

4.1.1 Gostota

Iz vsakega izmed preizkušancev od P1 do P7¹ smo odvzeli 9 vzorcev za preiskave lastnosti osnovnega materiala. Pred preiskavo smo vzorce izmerili s kljunastim merilom in stehtali. Iz dimenzij in mas smo določili gostote vzorčenega lesa. Iz vrednost koeficienta variacije (COV) je mogoče sklepati, da so razlike v gostotah vzorcev nezanemarljive.

¹ Oznake preizkušancev so pojasnjene v poglavju 4.2. Preizkušanec P8 je bil ovit s tkanino, zato iz njega po opravljenem upogibnem preizkusu, ko je bila vezna pasta polno strjena, ni bilo mogoče odvzeti manjših vzorcev za osnovne preiskave lesa.

Preglednica 1: Povprečne gostote vzorcev iz preizkušancev

Preizkušanec	ρ_{mean} [kg/m ³]
P1	517,6
P2	556,2
P3	490,3
P4	490,4
P5	444,5
P6	435,5
P7	422,3
povprečje	479,5
COV	10,1%

4.1.2 Tlačna trdnost v smeri vlaken

Iz vsakega izmed preizkušancev od P1 do P7 so bili izžagani trije vzorci dimenzij 50×50×100 mm. Ti so bili s stalno hitrostjo tlačno obremenjeni v stiskalnici do porušitve, za katero je značilen vzorec lokalno uklonjenih vlaken v smeri obremenjevanja. Tlačna trdnost se določi kot povprečna vrednost treh epruвет.

Preglednica 2: Rezultati preiskave tlačne trdnosti v smeri vlaken

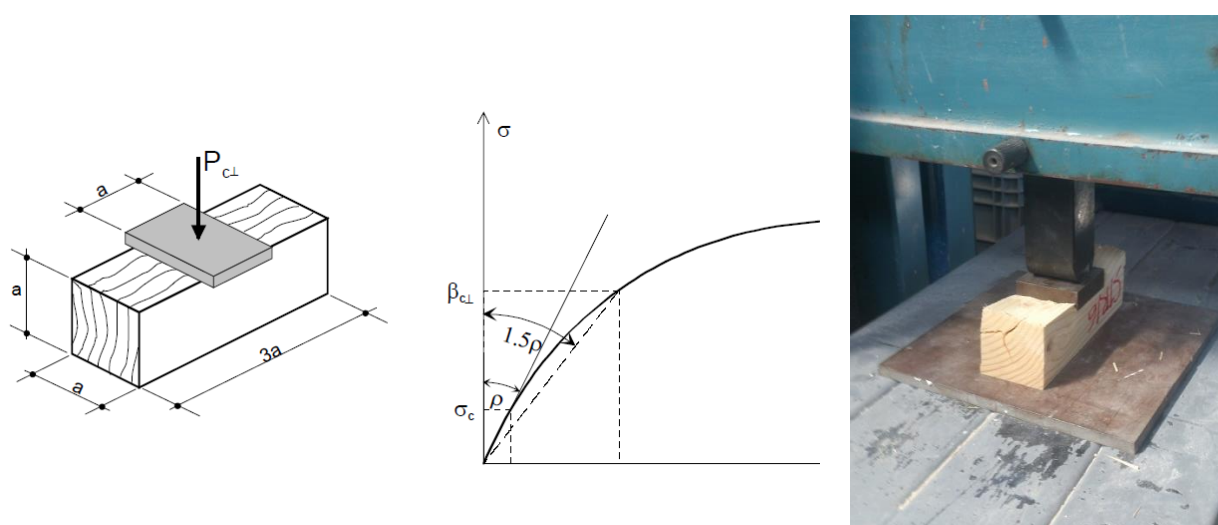
Preizkušanec	F_{max} [kN]	$f_{c,0,k}$ [N/cm ²]
P1/7	101,9	4076
P1/8	105,8	4232
P1/9	95,3	3812
povprečje		4040
P2/7	96,4	3854
P2/8	81,4	3256
P2/9	107,7	4308
povprečje		3806
P3/7	99,5	4029
P3/8	114,7	4588
P3/9	110,2	4408
povprečje		4342
P4/7	102,2	4088
P4/8	99,3	3971
P4/9	108,9	4356
povprečje		4138
P5/7	69,7	2789
P5/8	73,5	2941
P5/9	73,1	2926
povprečje		2885
P6/7	68,2	2728
P6/8	65,3	2611
P6/9	82,6	3304
povprečje		2881
P7/7	83,4	3335
P7/8	85,8	3431
P7/9	82,3	3292
povprečje		3352



Slika 4.1: Preiskava tlačne trdnosti v smeri vlaken

4.1.3 Tlačna trdnost v smeri prečno na vlakna

Preizkus tlačne trdnosti v smeri prečno na vlakna se izvaja na vzorcu dimenzij $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$. Preko jeklene ploščice na vzdolžno ploskev vzorca deluje obremenitev, pri čemer merimo pomike na dolžini med ploščico in podlago. Standard predpisuje, da tlačno trdnost določimo tako, da kot, ki ga z ordinatno osjo oklepa tangenta na krivuljo v točki ničelnega pomika, povečamo za 50%. Odčitana vrednost na presečišču kraka povečanega kota in diagrama napetost-deformacija se privzame kot tlačna trdnost v smeri prečno na vlakna (Žarnić et al., 2014).



Slika 4.2: Shema preizkusa za določitev tlačne trdnosti v smeri prečno na vlakna (levo, Žarnić et al.), določitev trdnosti iz diagrama pomik-sila (v sredini, Žarnić et al.) ter prikaz na enem od vzorcev (desno)

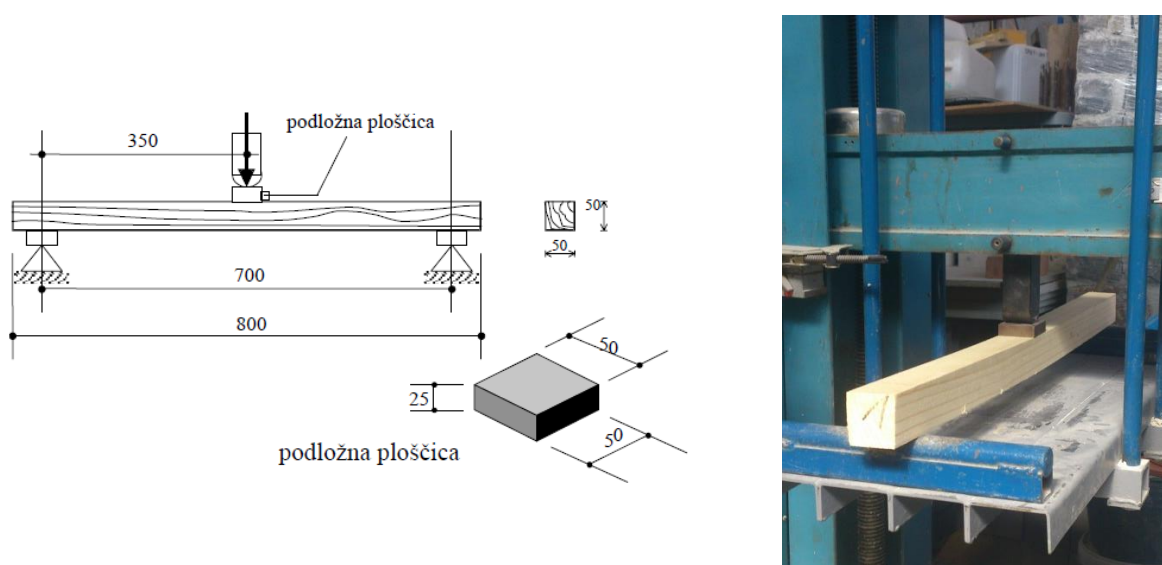
Preglednica 3: Rezultati preiskave tlačne trdnosti v smeri pravokotno na vlakna

Preizkušanelec	$F_{c\perp}$ [kN]	$f_{c,90}$ [N/cm ²]
P1/4	20,9	836,0
P1/5	22,5	900,0
P1/6	17,2	688,0
povprečje		808,0
P2/4	17,9	716,0
P2/5	16,0	640,0
P2/6	18,5	740,0
povprečje		698,7
P3/4	15,1	500,0
P3/5	15,2	504,0
P3/6	15,6	560,0
povprečje		521,3
P4/4	14,0	508,0
P4/5	12,5	480,0
P5/6	12,7	496,0
povprečje		494,7

Preizkušanelec	$F_{c\perp}$ [kN]	$f_{c,90}$ [kN/cm ²]
P5/4	13,8	552,0
P5/5	12,7	508,0
P5/6	13,8	552,0
povprečje		537,3
P6/4	12,7	560,0
P6/5	12,0	500,0
P6/6	12,4	508,0
povprečje		522,7
P7/4	12,5	604,0
P7/5	12,6	608,0
P7/6	14,0	624,0
povprečje		612,0

4.1.4 Upogibna trdnost

Upogibno trdnost določimo s standardnim tritočkovnim preizkusom na vzorcu dimenzij 50 mm × 50 mm × 800 mm, ki je na obeh straneh podprt z razdaljo med podporama 700 mm. Za določitev upogibne trdnosti upoštevamo največjo doseženo silo ob porušitvi. Izračunana je povprečna vrednost trdnosti, prikazana v preglednici 4.



Slika 4.3: Shema preizkusa za določitev upogibne trdnosti vzorcev (levo, Žarnić et al., 2014), prikaz na enem od vzorcev (desno)

Elastični upogibni modul izrazimo iz enačbe za pomik na sredini vzorca in dobimo izraz, odvisen od naklona v elastičnem delu diagrama sila pomik. Na podoben način izračunamo tudi upogibno trdnost vzorca.

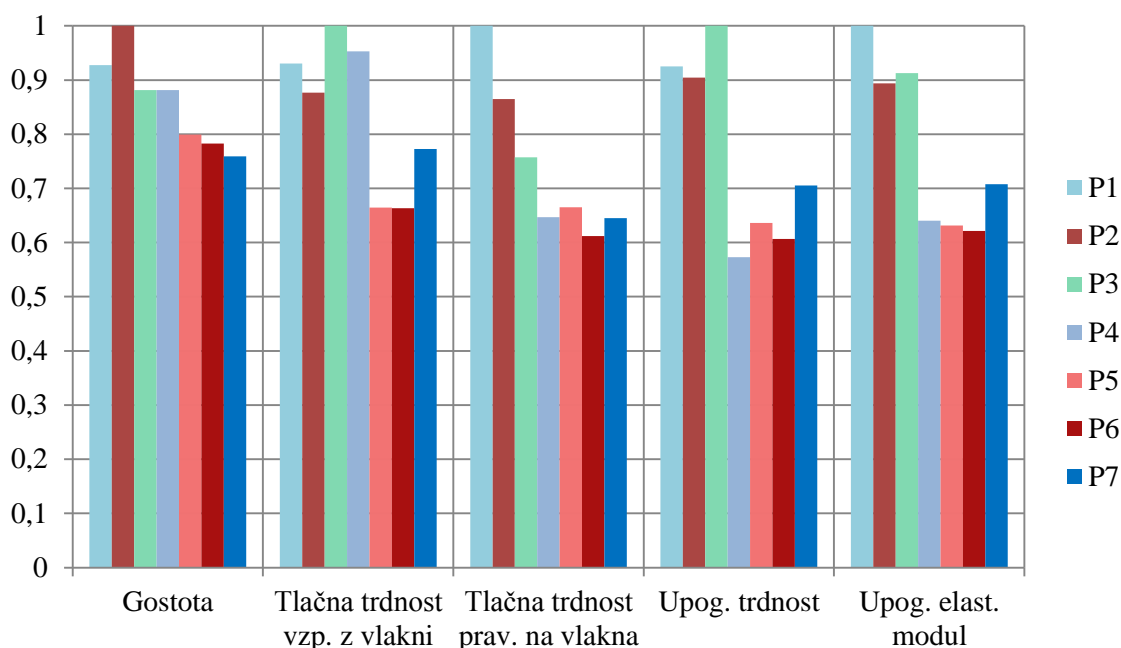
$$E_{up} = \frac{\Delta F}{\Delta w} \cdot \frac{L^3}{48 \cdot I} = \frac{700^3 \text{ mm}^3 \cdot 12 \cdot (F_2 - F_1)}{48 \cdot 50^4 \text{ mm}^4 \cdot (w_2 - w_1)} \quad (1)$$

$$f_{m,k} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} = \frac{3 \cdot 700 \text{ mm} \cdot F_{max}}{2 \cdot 50^3 \text{ mm}^3} = 0,84 \cdot F_{max} \quad (2)$$

Preglednica 4: Rezultati preiskave upogibne trdnosti vzorcev osnovnega materiala

Preizkušaneec	E_{up} [kN/cm ²]	f_m [N/cm ²]
P1	779,2	6443,1
P2	696,5	6301,1
P3	711,2	6966,1
P4	498,9	3990,4
P5	491,8	4432,4
P6	484,1	4228,0
P7	551,4	4912,6

Normirane vrednosti osnovnih lastnosti materiala ponazarja stolpčni diagram, s katerega je razvidno, da po lastnostih izstopata neojačana preizkušanca P1 in P2.



Slika 4.4: Primerjalni diagrami normiranih lastnosti osnovnega materiala posameznih nosilcev

Prav zaradi razlik v lastnostih je še toliko pomembnejša izvedba preiskav osnovnega materiala, saj bi bile ugotovitve o vplivu ojačitev brez preiskav osnovnega materiala neutemeljene. Poznane mehanske karakteristike osnovnega materiala omogočajo približno oceno, v kateri trdnostni razred sodi preizkušavec, s čimer je bolj smiselna primerjava nosilnosti in togosti v nadaljevanju. Glede na izračunane karakteristike lesa bi lahko ocenili, da preizkušanci od P1 do P3 spadajo v trdnostni razred masivnega lesa C50 po SIST EN 1995-1-1: 2005, preizkušance P4 do P7 pa lahko uvrstimo v trdnostni razred C45.

V skladu z EN 408 so bili preizkušanci za preiskave lokalnega modula elastičnosti, globalnega modula elastičnosti in upogibne natezne trdnosti izvedeni v merilu 1:1. Njihova dolžina znaša $l = 400$ cm, pravokotni prečni prerezi pa imajo širino $b = 16$ cm ter višino $h = 18$ cm. Izveden je bil štiri-točkovni upogibni preizkus z monotono naraščajočo obremenitvijo do porušitve za vsak preizkušavec, pri čemer smo z induktivnim merilcem LVDT² merili pomike. Na sredini polj med podporo in točko obremenjevanja smo namestili diagonalne deformetre za merjenje deformacij v diagonalni smeri. Pri štiri-točkovnem upogibnem preizkusu se obtežba nanaša preko valjčkov, ki omogočajo natančnejše obremenjevanje. V izogib pretiranim lokalnim obremenitvam uporabimo podložne ploščice (Žarnić,

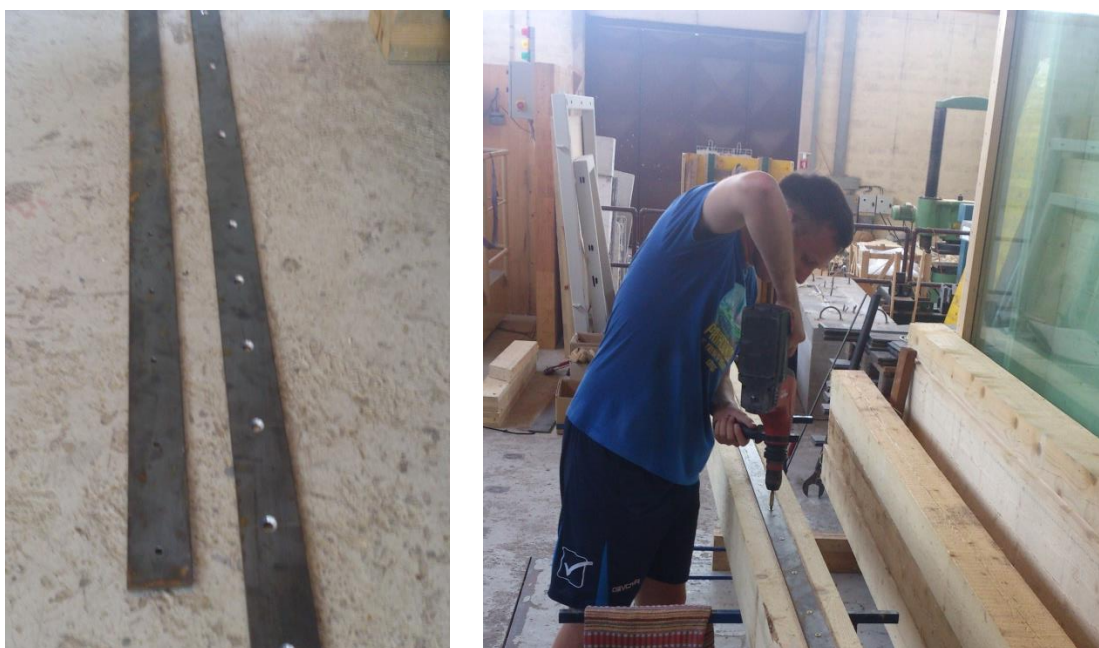
² LVDT – *linear variable differential transformer*, induktivni merilec pomikov, ki deluje na podlagi vzbujenega magnetnega polja v okolici primarne in sekundarnih tuljav (Khemani, 2010)

2005). V skladu z določili EN 408 smo določili razdaljo med podporami (razpetino) $L = 18 \cdot h \pm 3 \cdot h = 364$ cm. Za račun globalnega modula elastičnosti $E_{m,g}$ smo merili pomike w na sredini celotne razpetine elementa, za račun lokalnega modula elastičnosti $E_{m,l}$ pa pomike u na srednji razdalji l_1 . Kot to predpisuje standard, je preiskava potekala vedno s hitrostjo rasti pomikov $v \leq 0,003 \cdot h$ ($v \cong 0,30$ mm/s). Na podlagi znane obremenitve ob porušitvi F_{max} smo primerjali nosilnosti preizkušancev.

4.2 Preiskave lesenih nosilcev z ojačitvami

4.2.1 Priprava preizkušancev

Šest preizkušancev je bilo ojačanih, pri čemer je bila vsaka ojačitev zasnovana drugače.. Na nosilca brez utorov (P3–P4) smo po sredini spodnjega roba privijačili jekleno pločevino širine 5 cm in debeline 6 mm, pri čemer smo za primerjavo uporabili različne lesne vijake. Na preizkušancu P4 so bili uporabljeni lesni vijaki dimenzij 6 mm × 100 mm z ugrezno glavo, križno zarezo in delnim navojem, na preizkušancu P3 pa lesni vijaki dimenzij 8 mm × 100 mm z ugrezno glavo, torx zarezo in delnim navojem.



Slika 4.5: Jeklena trakova z izvrtanimi luknjami (levo), vijachenje ojačitve na nosilec (desno)

Lesen element z jekleno ojačitvijo deluje kot sovprežna konstrukcija. Zaradi največjega relativnega zamika v deformirani legi sovprežne konstrukcije so bile luknje na koncih jeklenih trakov zgoščene na 10 cm medsebojne razdalje, proti sredini trakov pa so se postopoma redčile na 20 oz. 40 cm razdalje. Vijachenje tovrstnih ojačitev je razmeroma enostavno, tudi v primeru in situ³ obnove konstrukcije ne bi povzročalo posebnih težav – stroški so nizki, izvedba pa hitra. V preiskavi preverimo še učinkovitost glede spremembe togosti in nosilnosti elementa.

V štiri nosilce so bili s strani dobavitelja lesa po naročilu izrezani pravokotni utori, namenjeni pozicioniranju FRP palic po metodi NSM. Potek vseh utorov je bil konstanten po celotni dolžini

³ in situ (lat.) – v tehniki izraz označuje meritve oz. tehnološke postopke »na mestu vgradnje«

nosilca. Izvedene so bile sledeče variante, prikazane na sliki 4.10.: dva nosilca z utorom višine 25 mm in širine 25 mm na sredini spodnjega roba (P7–P8), nosilec z globljim utorom višine 40 mm in širine 25 mm na sredini spodnjega roba (P6), nosilec z dvema stranskima utoroma višine 25 mm in širine 25 mm na obeh stranskih robovih, pri čemer se utora pričneta na višini 25 mm nad spodnjim robom nosilca (P5). Preizkušanca P7 in P8 sta imela utora enakih dimenzij, a se razlikujeta v tem, da smo na preizkušane P8 namestili še ovojno tkanino iz enosmerno nosilne mreže steklenih vlaken.

Ojačitev sestoji iz jedra in lepila, pred nanosom slednjega pa se površine v utoru zaščitni premaz za les. Dvokomponentni zaščitni premaz je iz epoksidne smole in trdilca. Mešanje komponent je potekalo v razmerju mase smole proti masi trdilca 1:1. Jedro ojačitve predstavlja palica z okroglim prerezom, ki je kompozit steklenih vlaken v modificirani vinilestrski matrici. Togost povezave pa zagotavlja dvokomponentna tiksotropna⁴ lepilna pasta, ki je prav tako iz epoksidne smole in trdilca (Božič, osebna komunikacija). Mešanje komponent je potekalo v razmerju mase smole proti masi trdilca 2:1. Izvedba takega sistema ojačitve poteka razmeroma hitro in enostavno. Ocenjujemo, da je tak sistem ojačevanja v praktičnem smislu bolj primeren za nove nosilce, manj pa za sanacijo obstoječih.



Slika 4.6: Materiali, uporabljeni za ojačitve po metodi NSM: palice iz steklenih vlaken (levo), ovojna tkanina iz steklenih vlaken (v sredini), epoksidna lepilna pasta (desno)

⁴ tiksotropija – lastnost koloidov, ki ob vsiljeni strižni deformaciji (mešanju, vibriranju) preidejo iz stabilnega stanja (gel) v stanje znižane viskoznosti (sol)

Pred zaplnitvijo utorov so bili ti dobro očiščeni, kar zagotavlja učinkovit prenos adhezijskih napetosti. Sledil je temeljit nanos zaščitnega premaza in, dokler je ta še svež, vgradnja paste. V pasto smo položili palico, utor do vrha zapolnili in zgladili s pasto. Zapolnjene utore preizkušancev smo do preiskave pustili mirovati več kot teden dni, da se je pasta strdila in postala polno nosilna.



Slika 4.7: Priprava utorov: vgradnja epoksidne paste (levo), nameščanje palice (desno)

Preizkušavec P8 smo poleg ojačitve s palico dodatno ovili še z enosmerno nosilno ovojno tkanino iz steklenih vlaken. Prva faza vgradnje po suhem postopku je nanos zaščitnega premaza po celotnem obodu nosilca, nanj pa sledi nanos približno 3-milimetrske plasti epoksidne lepilne paste. Dokler je ta še sveža, se nanjo nanese prvi sloj impregnacijskega sredstva, v katerega se vtisne tkanina (Božič, osebna komunikacija). Njegovi komponenti, epoksidno smolo in trdilec, smo zmešali v razmerju mase smole proti masi trdilca 4:1. Tkanina je bila narezana na 85-centimetrške trakove, ki smo jih temeljito vtisnili v pasto z 10-centimetrskim preklpom po širini in premazali z zaključnim slojem impregnacijskega sredstva.

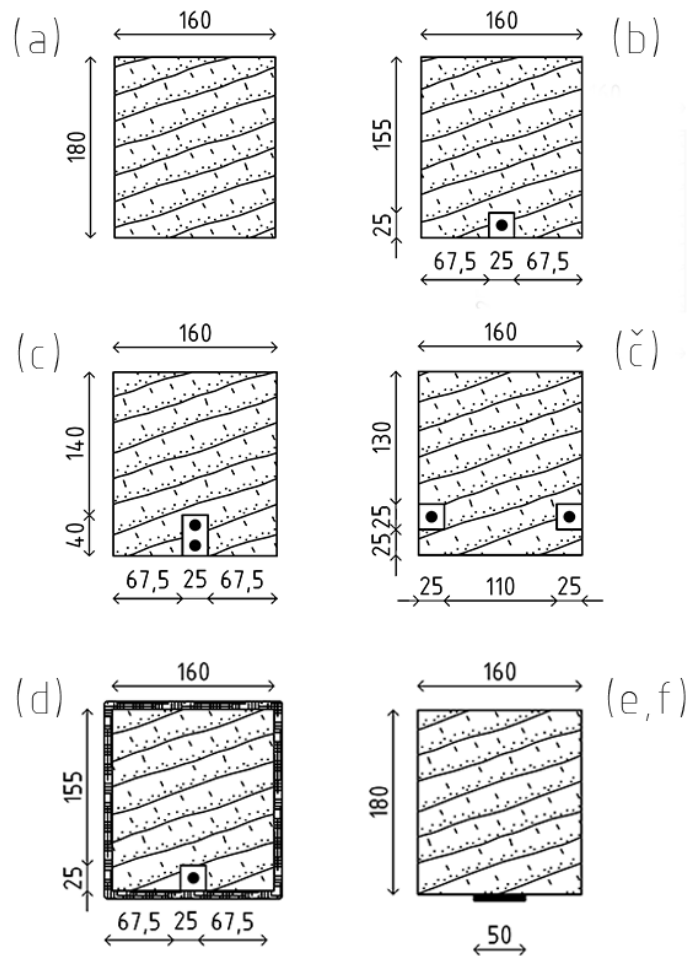
Z izvedbenega vidika je ovijanje tkanine najbolj zahtevno in časovno potratno od obravnavanih sistemov ojačevanja, hkrati pa je izvedljivo zgolj v primeru novih nosilcev, ne pa tudi za sanacijo obstoječih poškodovanih nosilcev.



Slika 4.8: Odmerjanje dimenzij trakov tkanine (levo), nanos začetnega sloja impregnacijskega sredstva po obodu nosilca (desno)



Slika 4.9: Ovijanje tkanine (levo), končni izgled ovitega nosilca (desno)



Slika 4.10: Shema uporabljenih konfiguracij ojačitev v raziskavi

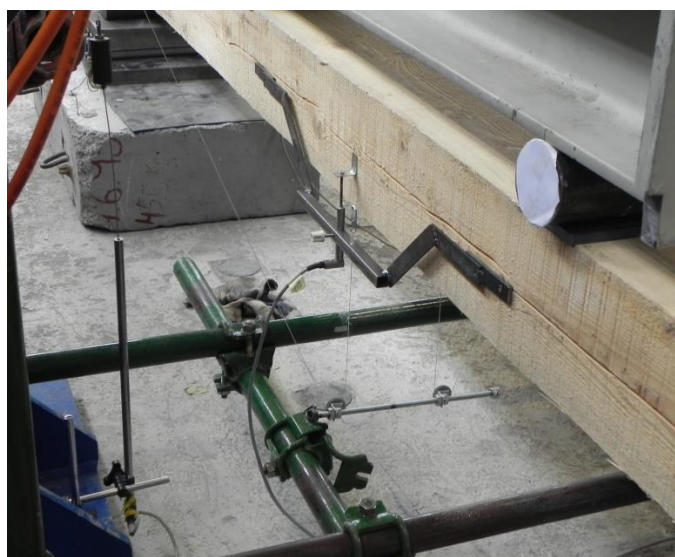
Preglednica 5: Konfiguracije ojačitev lesenih nosilcev

Oznaka na sliki 4.10.	Preizkušalec	Opis	Stik
(a)	P1, P2	poln masiven preizkušalec brez ojačitve	–
(b)	P7	enojen utor za palico	epoksidna smola
(c)	P6	enojen globlji utor za 2 palice	epoksidna smola
(č)	P5	dvojen stranski utor za 2 palice	epoksidna smola
(d)	P8	enojen utor za palico in ovojna tkanina	epoksidna smola
(e)	P3	jeklen trak debeline 6 mm	lesni vijaki 8.0×100
(f)	P4	jeklen trak debeline 6 mm	lesni vijaki 6.0×100

4.2.2 Upogibni preizkus ojačanih nosilcev

Upogibni preizkus je bil izveden v skladu s standardiziranimi razdaljami med podporami in mesti obremenjevanja za štiri-točkovni upogib. Vsak izmed preizkušancev je bil podprt s členkastima podporama na razdalji 364 cm. Nanos obremenitve je bil izveden preko bata na jekleno gred, ki je zagotavljala enakomeren raznos obtežbe. Obremenilno silo z bata smo merili z dinamometrom, ki je pošiljal zapise v računalnik.

Na sredini preizkušanca je bil na vsaki strani nameščen 90 cm širok jeklen nosilec za induktivna merilca lokalnih pomikov, vezana preko mehanizma, čigar detajl je prikazan na sliki 4.11.



Slika 4.11: Mehanizem za merjenje pomikov z LVDT merilci

Na polovici razdalje med podporo in točko obremenjevanja sta bila v diagonalnih smereh pod kotom $\pm 45^\circ$ glede na sredinsko os nameščena deformetra za merjenje strižnih deformacij, kar omogoča kasnejši izračun strižnega modula.



Slika 4.12: Detajl diagonalno nameščenih deformetrov za merjenje strižnih deformacij

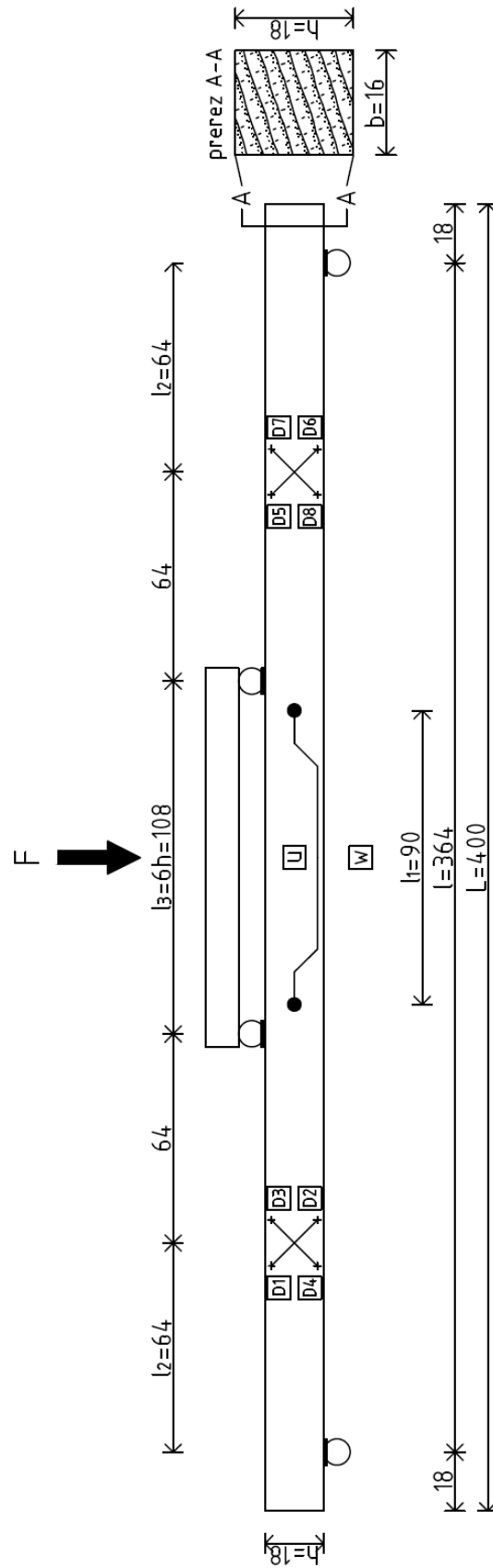
Za vsakega izmed nosilcev je bila ustvarjena baza izmerjenih vrednosti sil in pomikov, ki smo jo pri analizi prilagodili, da smo upoštevali dodatno obtežbo zaradi mase jeklene grede, podložnih plošč in valjev za raznos obtežbe.



Slika 4.13: Prikaz celotne situacije pri štiri-točkovnem upogibu



Slika 4.14: Detajl podpiranja preizkušanca z vijačenim jeklenim trakom na spodnjem robu



Slika 4.15: Dispozicija štiritočkovnega upogiba z razdaljami po EN 408 (povzeto po Antolinc, 2014)

4.3 Rezultati upogibnega preizkusa

4.3.1 Lokalni in globalni modul elastičnosti

Na podlagi rezultatov štiritočkovnega upogibnega preizkusa nosilcev brez ojačitev (P1–P2) smo v skladu s standardom EN 408 izračunali lokalni modul elastičnosti po enačbi (3):

$$E_{m,l} = \frac{l_2 \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (u_2 - u_1)} \quad (3)$$

Globalni modul elastičnosti pa smo izračunali po enačbi (4):

$$E_{m,g} = \frac{3 \cdot l_2 \cdot l^2 - 4 \cdot l_2^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6 \cdot l_2}{5 \cdot G \cdot b \cdot h} \right)} \quad (4)$$

kjer so:

- l_1 ... razdalja med točkama pritrditve mehanizma za merjenje lokalnega pomika u ,
- l_2 ... razdalja med podporo in njej bližjo točko obremenjevanja,
- l ... razdalja med podporama,
- F_1 ... sila velikosti 10% maksimalne dosežene sile F_{max} ,
- F_2 ... sila velikosti 40% maksimalne dosežene sile F_{max} ,
- u_1 ... lokalni pomik na sredini nosilca pri sili F_1 ,
- u_2 ... lokalni pomik na sredini nosilca pri sili F_2 ,
- w_1 ... globalni pomik na sredini nosilca pri sili F_1 ,
- w_2 ... globalni pomik na sredini nosilca pri sili F_2 ,
- b ... širina prečnega prereza,
- h ... višina prečnega prereza,
- I ... vztrajnostni moment prečnega prereza.

4.3.2 Strižni modul

Za izračun strižnega modula G_{SF} uporabimo po standardu predpisan izraz (5):

$$G_{SF} = \alpha \frac{h_0}{2 \cdot b \cdot h} \cdot \frac{dV}{dD_{mean}} \quad (5)$$

pri čemer so:

$$\alpha = \frac{3}{2} - \frac{h_0^2}{4 \cdot h^2} \quad (6)$$

- h_0 ... dolžina baze deformetra,
- h ... višina prečnega prereza,
- b ... širina prečnega prereza,
- dV ... inkrement prečne sile na mestu merjenja deformacij,
- dD_{mean} ... povprečna vrednost raztezkov deformetrov zaradi dV
- d_i ... raztezek i-tega deformetra v [mm] zaradi delovanja dV

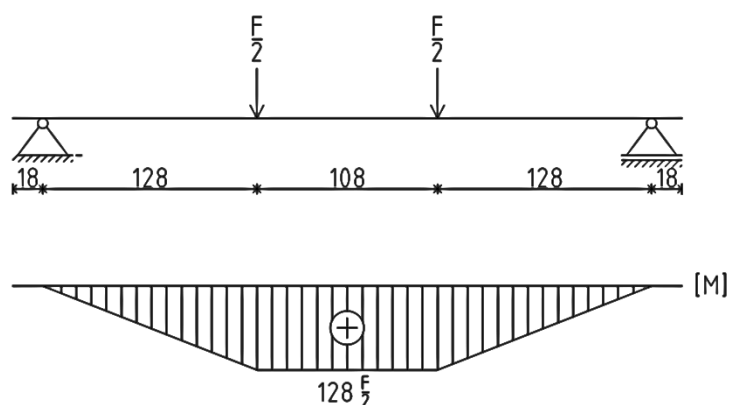
$$dD_{mean} = \frac{|d_i| + |d_{i+1}|}{2}; \quad i \in \{1,3\} \quad (7)$$

4.3.3 Upogibna natezna trdnost

Iz znane statične zasnove lahko z uporabo izračunanega upogibnega momenta določimo upogibno natezno trdnost $f_{m,l}$ nosilcev brez ojačitev po linearno elastični teoriji. Pri upogibu brez osne sile velja, da je $f_{m,l}$ enak napetostim zaradi upogiba:

$$\sigma_{max} = f_{m,l} = \frac{M_{max}}{I_y} \cdot z = \frac{M_{max}}{W_y} = \frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot h^2} = \frac{2 \cdot F_{max}}{27} \quad (8)$$

kjer smo upoštevali, da je odpornostni prerez pravokotnega prereza enak $W_y = b \cdot h^2/6$, največji upogibni moment v prerezu M_{max} pa izračunamo iz statičnega modela za nosilec s previsoma.



Slika 4.16: Statični model nosilca pri štiritočkovnem upogibnem preizkusu

Rezultati so prikazani v preglednici 5.

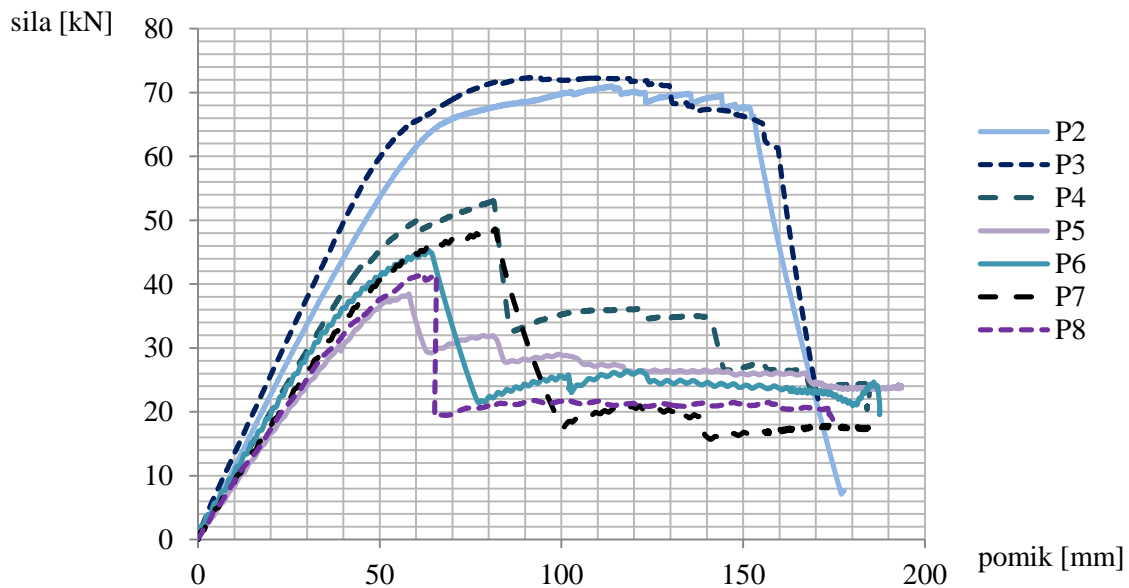
Preglednica 6: Rezultati porušnega testa preizkušancev brez ojačitvev

Preizkušavec	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	G_{SF}	u_{max}	F_{max}	$f_{m,l}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]	[kN]	[N/cm ²]
P1 ⁵	-	-	-	60,65	78,57	4093,4
P2	14679,5	16308,3	821,5	113,69	70,92	5253,3

Preglednica 7: Rezultati porušnega testa preizkušancev z ojačitvami

Preizkušavec	$E_{m,l}$	$E_{m,g}$	G_{SF}	u_{max}	F_{max}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]	[kN]
P3	15936,4	21702,9	477,3	91,31	72,21
P4	11774,3	14503,1	638,5	81,22	52,95
P5	9973,8	10916,9	835,5	58,03	38,34
P6	12124,6	16698,2	375,8	63,42	45,15
P7	11805,7	15793,4	348,3	81,76	48,51
P8	11475,7	11047,8	855,8	62,18	41,49

Module elastičnosti preizkušancev lahko interpretiramo tudi grafično kot naklone tangent začetnih (linearnih) delov pridobljenih zvez pomik-sila, ki so prikazane spodaj (P1 ni prikazan zaradi drugačne razdalje med podporama, ki je bila za ostale preizkušance naknadno spremenjena).



Slika 4.17: Zveze med silami in vertikalnimi pomiki preizkušancev

⁵ Preizkušavec P1 je imel drugačno razdaljo med podporama. Vrednosti pomika in sile nista primerljivi z ostalimi preizkušanci, zato vrednosti modulov ne podajamo.

4.4 Analiza in komentar rezultatov

Na podlagi opazovanja lahko interpretiramo različne porušitve nosilcev pri štiri-točkovnem upogibnem preizkusu. V skladu z lastnostmi osnovnega materiala so nekateri nosilci odpovedali pri nižjih silah obremenjevanja, mehanizem porušitve pa je bil odvisen od sistema ojačitve. Ugotovljena sta bila dva različna mehanizma: razpokanje v natezni coni in uklanjanje tlačnih vlaken s spremljajočimi razpokami v tlačni coni. Po opažanjih je pojav razpok v natezni coni na videz intenzivnejši, glasnejši, povzroči daljše in širše razpoke. Porušitev zaradi razpokanja lesa v natezni coni (na spodnjem delu prečnega prereza) je posledica preseganja upogibne natezne trdnosti lesa. Do tega pojava je prišlo pri vseh nosilcih, a z različno intenziteto, odvisno od učinkovitosti ojačitve pri prevzemanju natezних napetosti, nepopolnosti v lesu (grčavosti) in predhodne razpokanosti preizkušancev. Pri neojačanih preizkušancih in preizkušancih z utori je postopna rast manjših razpok tik pred porušitvijo prešla v hipen razcep lesa. Pojav prvih razpok je pri preizkušancu brez ojačitve nastopil razmeroma pozno, pri sili 52 kN. Ta pojav se je za preizkušane z manjšimi vijaki zgodil pri približno 30 kN, z večjimi vijaki pa pri približno 40 kN. Preizkušane z večjimi vijaki je izkazoval tudi večjo duktilnost. Pri obeh je pomik pri največji sili znašal med 80 in 90 mm, vendar je bil pri prvem večjem padcu obremenitve pomik preizkušanca z manjšimi vijaki skoraj dvakrat manjši od pomika pri porušitvi preizkušanca z večjimi vijaki. Preizkušancu s stranskima utoroma smo preventivno odstranili deformetre pri obremenitvi 30 kN, porušitev se je zgodila pri sili 38 kN, kar je bila najnižja porušna sila od vseh. Predhodna domneva, da bo za preizkušance z utori kritična porušitev v nategu, se je izkazala kot pravilna. Z znižano statično višino ne pride do nivojev deformacij, pri katerih bi se ojačitev polno aktivirala, oslabljen lesen prerez pa ima višje natezne napetosti na najbolj skrajnem robu spodaj.

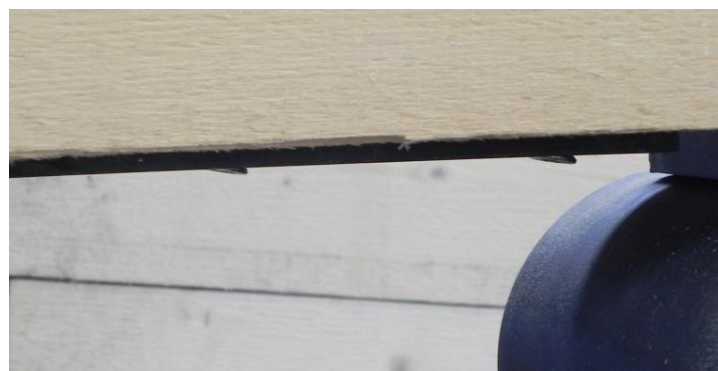


Slika 4.18: Porušitev preizkušanca P5 zaradi razpokanja v oslabljeni natezni coni z utori (levo), detajl globokega prodiranja natezne razpoke in odprtega utora s palicami (desno)

Pri obeh preizkušancih z jeklenima trakovima je še pred nenadnim povečanjem nateznih razpok prišlo do porušitve v tlačni coni, kjer so se vlakna opazno uklonila. Les je v primerjavi z betonom v tlaku bolj občutljiv, zato so po naših opažanjih ojačitve zgolj v natezni coni (po analogiji armature v betonu) manj učinkovite; bilo bi bolj smiselno izvesti ojačitev tako v natezni kot v tlačni coni, saj bi s takim sistemom zagotovili še prevzemanje tlačnih napetosti, ki so se ponekod izkazale kot kritične. Pri preizkušancih z jeklenima trakovima so natezne razpoke so nastale z manjšo intenziteto kot pri preizkušancih z utori, kar lahko deloma pripišemo dejstvu, da preizkušanca z jeklenima trakovima nista imela večjih oslabitev v obliki utorov, le manjši delež oslabitev na mestih lukenj za lesne vijake. Pomembno je upoštevati dejstvo, da so bila v preiskavi uporabljena vezna sredstva podajna, kar je zmanjšalo učinkovitost sovprežnosti.



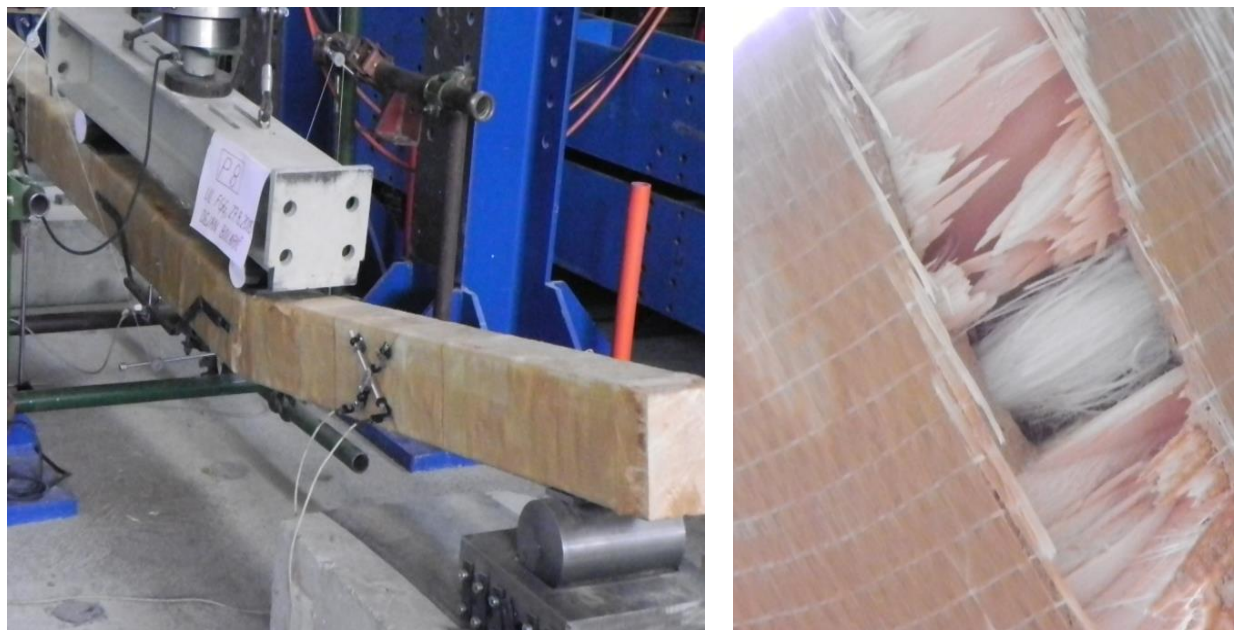
Slika 4.19: Porušitev v tlačni coni v obliki uklona vlaken preizkušanca P3 (levo),
detajl več kot centimeter široke razpoke v tlačni coni (desno)



Slika 4.20: Detajl deformiranih podajnih veznih sredstev

Do pojav prvih razpok pri preizkušancu z enojnim utorom je prišlo pri nivoju obremenitve približno 36 kN, pri preizkušancu z dvojnimi utori pa pri nivoju obremenitve 33 kN. Ta dva preizkušanca sta odpovedala v natezni coni, delno je razlog za to tudi nesorazmerje togosti lesa in epoksidne paste, poglaviti vzrok porušitve pa je oslabiljenost prereza, s čimer je lesu vsiljen zgodnejši začetek natezne porušitve in nato progresivno cepljenje lesa.

Ovit preizkušanec je bil izpostavljen nekoliko drugačnemu napetostnemu stanju, saj je bil objekt s tkanino, ki je preprečevala neovirano deformiranje in cepljenje lesa. Porušitev se je zgodila s pretrganjem tkanine in natezno razpoko znotraj ovoja, pri tem pa se je skozi razpokan les pokazala tudi natrgana palica, ki je dosegla nivo porušne deformacije, torej je prevzela del napetosti v prerezu. Proizvajalec v tehnični specifikaciji navaja vrednost porušne deformacije palice $\epsilon_{GFRP} = 20\%$. Prve razpoke so se pojavile pri sili 30 kN, tkanina pa ni pokazala učinkovitosti v smislu togosti, prav tako povesi niso bistveno odstopali od povosov ostalih nosilcev.



Slika 4.21: Porušitev preizkušanca P8 zaradi pretrga ovojne tkanine (levo),
detalj porušitve GFRP palice in pretrgane ovojne tkanine (desno)

Ker je bil referenčni (neojačani) preizkušanec iz kakovostnejšega lesa od ostalih, je bila primerjava nosilnosti in togosti izvedena na osnovi razmerij med doseženo nosilnostjo nosilca in povprečno nosilnostjo vzorcev lesa oz. razmerij med togostma nosilca in vzorcev. Preglednici 7 in 8 prikazujeta izračunana razmerja togosti oz. nosilnosti. Pri tem je bil vsak izmed preizkušancev glede na mehanske karakteristike uvrščen v ocenjen trdnostni razred.

Prvo razmerje $\Delta_1 = P_{nos}/P_{vzor}$ je bilo dobljeno kot količnik porušne sile nosilca in povprečne porušne sile vzorcev osnovnega materiala nosilca pri standardnem tri-točkovnem upogibu. Povprečna porušna sila vzorcev osnovnega materiala pri tri-točkovnem upogibu je bila izračunana iz enačbe za napetosti pri porušitvi kot:

$$P_{vzor} = \frac{2 \cdot f_{m,k} \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot L} = \frac{2 \cdot 5^3 \text{ cm}^3}{3 \cdot 70 \text{ cm}} \cdot f_{m,k} = 1,19 \cdot f_{m,k} \quad (9)$$

Preizkušane P1 je izvzet zaradi drugačnih robnih pogojev.

Preglednica 8: Primerjava razmerij nosilnosti osnovnega materiala in nosilnosti ojačanih elementov

Preizkušaneec	Povprečna upogibna trdnost vzorcev $f_{m,k}$ [N/mm ²]	Povprečna porušna sila vzorcev P_{vzor} [N]	Porušna sila nosilca P_{nos} [N]	Δ_1	glede na P2
P2	6301	7498,2	72107	9,62	1,00
P3	6966	8289,5	73397	8,85	0,92
P4	3990	4748,1	54137	11,40	1,19
P5	4432	5274,6	39527	7,49	0,78
P6	4228	5031,3	46337	9,21	0,96
P7	4913	5846,0	49697	8,50	0,88

Iz zadnjega stolpca je razvidno, da smo z ojačevanjem dosegli povišano nosilnost elementa le v primeru preizkušance P4, ojačanega z jeklenim trakom z uporabo manjših vijakov, kjer je razmerje Δ_1 19 odstotkov višje od referenčnega preizkušance P2. Ostalim preizkušancem se je razmerje porušnih sil Δ_1 znižalo: preizkušancu z večjimi vijaki za 8 odstotkov, preizkušancu z globljim utorom za 4 odstotke, preizkušancu z enojnim utorom pa za 12 odstotkov. Vpliv oslabitev zaradi utorov je tako potrjen tudi z analizo rezultatov preiskav, pričakovano je na nosilnost najslabše vplivala konfiguracija dvojnih stranskih utorov, saj ima tak prerez dvojno oslabitev v natezni coni, hkrati pa še najnižjo statično višino od obravnavanih po NSM metodi, s čimer je prispevek sile v ojačitvi k upogibnemu momentu, ki ga prerez prenese, nižji. Za preizkušaneec z dvojnimi stranskimi utorom je razmerje porušnih sil nižje kar 22 odstotkov. Če upoštevamo, da so imeli tako vzorci osnovnega materiala kot tudi nosilci enake robne pogoje pri upogibnih preizkusih, lahko iz spremembe razmerja Δ_1 sklepamo tudi o spremembi nosilnosti ojačanega elementa glede na neojačanega. Iz vrednosti razmerij Δ_1 sledi sklep, da NSM metoda ne pripomore k nosilnosti, v nekaterih izvedbah jo celo nezanimljivo zmanjša. Kot efektiven pa se je izkazal jeklen trak z manjšimi vijaki.

Drugo razmerje Δ_2 je bilo dobljeno kot količnik togosti nosilca in povprečne togosti vzorcev pri standardnem tri-točkovnem upogibu. Togosti k_{nos} in k_{vzor} sta dobljeni z integracijo upogibnice,

odvisni pa sta od robnih pogojev podpiranja in obremenjevanja, modula elastičnosti in vztrajnostnega momenta. Oznaka a označuje oddaljenost od podpore do točke obremenjevanja, L pa celotno dolžino elementa, čigar togost računamo. V izrazu za Δ_2 sta spremenljivki le modula elastičnosti, ostale vrednosti so konstantne za vse primere (vsi vzorci imajo iste robne pogoje in iste vztrajnostne momente, vsi nosilci imajo iste robne pogoje in iste vztrajnostne momente; K je konst.). Iz tega sklepamo, da lahko razmerje togosti prevedemo na razmerje modulov elastičnosti, ki je pokazatelj spremembe togosti ojačanega elementa glede na neojačanega. Vrednosti Δ_2 so podane v preglednici 8, v zadnjem stolpcu so normirane glede na vrednost za referenčni (neojačan) preizkušanelec P2.

$$\Delta_2 = \frac{k_{nos}}{k_{vzor}} = \frac{24 \cdot E_{nos} \cdot I_{nos}}{a \cdot [3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2]} = K \cdot \frac{E_{nos}}{E_{vzor}} \quad (10)$$

Preizkušanelec P1 je izvzet zaradi drugačnih robnih pogojev.

Preglednica 9: Primerjava razmerij elast. modulov osn. materiala in elast. modulov ojačanih elementov

Preizkušanelec	Povprečen modul elastičnosti vzorcev E_{vzor} [N/mm ²]	Globalni modul elastičnosti nosilca E_{nos} [N/mm ²]	Δ_2	glede na P2
P2	6965,3	16308	2,34	1,00
P3	7112,0	21703	3,05	1,30
P4	4989,0	14503	2,91	1,24
P5	4918,4	10917	2,22	0,95
P6	4841,0	16698	3,45	1,47
P7	5513,4	15793	2,86	1,22

Iz zadnjega stolpca je razvidno, da smo z ojačevanjem dosegli povišano togost v primeru vseh preizkušancev razen preizkušanca s stranskima utoroma. Pri preizkušancu z globljim utorom se je razmerje togosti povečalo najbolj intenzivno, za 47 odstotkov. Očitno povišana stopnja armiranja v natezni coni prereza pripomore k povečanju skupne togosti elementa. Pri preizkušancih z jeklenima trakovima je razmerje v primerjavi z referenčnim višje tako v primeru manjših vijakov (+24 %) kot tudi v primeru večjih vijakov (+30 %). Razmerje se je povišalo tudi v primerih elementov z enojnim utorom (+22 %), vendar manj kot v primeru jeklenih trakov. Le pri preizkušancu s stranskima utoroma (P5) se je razmerje Δ_2 zmanjšalo za 5 odstotkov. Preizkušanelec s stranskima utoroma ima glede na neojačanega nižji obe razmerji Δ_1 (-22 %) in Δ_2 (-5 %), zato njegovo konfiguracijo ocenjujemo kot neprimerno. Na drugi strani ugotavljamo, da ima preizkušanelec z jeklenim trakom in manjšimi vijaki obe razmerji višji od referenčnega, torej je njegova ojačitev pozitivno vplivala tako na togost (+19 %) kot tudi na nosilnost (+24 %) elementa.

5 ANALITIČNI RAČUN ODPORNOSTI ELEMENTA IN PRIMERJAVA VREDNOSTI

V okviru analize rezultatov preiskav vpliva ojačitev je bila izvedena primerjava eksperimentalno pridobljenih vrednosti z analitično izračunanimi vrednostmi porušne sile. Poenostavljen konstitutivni zakon ne upošteva delne plastifikacije lesa v tlačni coni. V literaturi najdemo več modelov za konstitutivne zveze lesa, uporabne pri dimenzioniranju oziroma računu odpornosti prereza. Izveden je bil analitični izračun odpornosti in porušnih sil elementov, najprej na podlagi klasične linearne teorije, nato pa še na podlagi Nwokoyevega modela, ki upošteva delno plastifikacijo materiala. Iz tega je Brunner (2000) v svojem prispevku podal poenostavljen postopek za račun odpornosti. Izpeljavo računa podajamo v prilogi A. V prilogi so navedene tudi predpostavke, upoštevane pri računu.

Modul elastičnosti jekla smo v izračunu privzeli kot $E_s = 21000 \text{ N/mm}^2$, mejo tečenja jekla pa kot $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$. Podatka o modulu elastičnosti in natezni trdnosti GFRP palic sta bila razbrana iz tehnične specifikacije proizvajalca; znašata $E_{GFRP} = 40800 \text{ N/mm}^2$ in $f_{GFRP} = 760 \text{ N/mm}^2$. V računu so uporabljene karakteristične vrednosti trdnosti in modulov elastičnosti lesa glede na pripadajoč trdnostni razred preizkušanca. Pri tem je upoštevan modifikacijski faktor za trenutno obtežbo $k_{mod} = 1,0$.

Preglednica 9 prikazuje izračunane vrednosti porušne sile po klasični elastični teoriji ter po modelu z upoštevanjem delne plastifikacije. V zadnjih dveh stolpcih je prikazan delež računske napake v primerjavi z dejansko porušno silo, izmerjeno tekom eksperimentov.

Preglednica 10: Računske in dejanske porušne sile za štiri-točkovni upogib preizkušancev

Preizkušavec	$E_{ojačitve}$	Trd. razred	E_{nos}	P_{EL}	P_{PL}	P_{DEJ}	ΔP_{EL}	ΔP_{PL}
	[kN/cm ²]		[N/mm ²]	[kN]	[kN]	[kN]	-	-
P2	/	C50	16308,3	67,5	67,5	72,1	6,80 %	6,80 %
P3	2185	C50	21702,9	69,3	70,3	73,4	5,90 %	4,40 %
P4	1473	C50	14503,1	55,3	56,1	54,1	2,20 %	3,60 %
P5	4080	C40	10916,9	39,7	41,5	39,5	0,10 %	4,80 %
P6	4080	C45	16698,2	45,3	47,2	46,3	2,20 %	1,90 %
P7	4080	C45	15793,4	48,6	50,8	49,7	2,30 %	2,20 %
Povprečje:							3,25 %	3,95 %

Ugotovimo, da po uporabljenem postopku dobro ocenimo dejansko porušno silo, saj povprečna napaka po elastični teoriji znaša 3,25 %, po modelu z upoštevanjem plastifikacije pa 3,95 %. V primeru neojačanega elementa je vpliv plastifikacije praktično zanemarljiv, saj dobimo isti vrednosti porušne sile. Izračun pokaže, da bi v primeru dimenzioniranja ob upoštevanju varnostnih faktorjev materiala (γ_M) za obravnavane preizkušance dobili med 15 in 25 odstotkov nižje odpornosti prerezov.

6 ZAKLJUČEK

Z izvedeno preiskavo različno ojačanih lesenih nosilcev, obremenjenih s standardnim štiri-točkovnim upogibom, smo pridobili pomembne ugotovitve glede vpliva ojačitev na nosilnost in togost elementov. Identični robni pogoji in odvzeti vzorci osnovnega materiala iz preizkušancev P2 do P7 omogočajo primerjavo in identifikacijo, katere konfiguracije togost oz. nosilnost elementu zvišajo oz. znižajo. Ugotovljeno je bilo, da nosilnosti elementov niso bistveno narasle, torej se tovrstni sistemi ojačevanja ne izkažejo kot najbolj smiselni za namene povečanja nosilnosti. So pa rezultati pokazali, da obstaja precejšen potencial uporabe teh ojačitev za namene povečanja togosti, saj je večina preizkušancev z ojačitvami postala bolj toga, med 20 in 50 odstotki.

Tekom priprave preizkušancev smo spoznali praktične vidike obravnavanih sistemov ojačevanja in ocenjujemo, da je v praktičnem smislu ojačevanje po NSM metodi primernejše za nove nosilce, s katerimi nadomestimo poškodovane, medtem ko je ojačevanje po EBR metodi (z jeklenimi trakovi) primerno tudi za neposredno sanacijo obstoječih poškodovanih elementov – vijačenje jeklenih trakov na poškodovane elemente je veliko enostavnejše.

Opažanja potrjujejo dejstvo, da je les s svojo heterogenostjo, ortotropnostjo in visokim raztrosom materialnih karakteristik za analizo razmeroma zapleten material. Pri eksperimentalnih postopkih je neizogibno izvesti preiskave osnovnega materiala, s katerimi pridobimo dejanske mehanske karakteristike lesa. Priporočljivo je, da je to izvedeno na samem začetku, saj z natančnejšimi podatki o lesu lažje načrtujemo, kako bomo preiskali in ojačevali posamezne elemente – elemente s podobnimi mehanskimi karakteristikami lesa bi bilo za kakovostnejšo primerjavo bolj smiselno ojačevati s podobnimi metodami.

V grobem je analiza mehanizmov porušitev pokazala, da sta pri porušitvi moteča dejavnika metode NSM prisotnost utorov (oslabitev) in nižja statična višina pri delovanju ojačitve. V nadalje bi bilo smotno preveriti možnosti ojačevanja z alternativnimi sistemi, npr. s prednapetimi jeklenimi ojačitvami. Z doseganjem kompresije bi bil celoten lesen prerez tlaččen, kar bi lahko izkazalo večji potencial za zviševanje nosilnosti elementov. S stališča togosti so se ojačitve po metodi NSM izkazale kot relativno ugoden sistem.

Izveden je bila poenostavljen analitični izračun odpornosti prerezov obravnavanih preizkušancev po klasični elastični teoriji in po teoriji z delno plastifikacijo lesa v tlačni coni, povzeti po literaturi. Obravnavan model je dobro aproksimiral sile, analitične vrednosti maksimalnih sil so od dejanskih odstopale v povprečju okrog štiri odstotke.

VIRI

Srpčič, J. 2008. Vpliv vlage na lesene konstrukcije. Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 188–192.

Velkavrh, E. 2010. Preliminarna preiskava ustreznosti kompozitov iz naravnih vlaken za aplikacijo v gradbenih konstrukcijah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba E. Velkavrh): 10–23.

Tajnik, M., Premrov, M., Dobrila, P. 2008. Sovprežne konstrukcije v kombinaciji z lesom. Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 158–162.

Pohleven, F. 2008. Konstrukcijska zaščita lesa pred škodljivci. Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 96–97.

Gentile, C.J. 2000. Flexural Strengthening of Timber Bridge Beams Using FRP. Magistrsko delo. Winnipeg, Manitoba, Kanada, University of Manitoba, Department of Civil & Geological Engineering: 7-14.

De Luca, V., Marano, C. 2012. Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. *Construction and Building Materials* 30: 206–217.

Bončina, T. 2005. Izdelava sintetičnih polimernih in ogljikovih vlaken, seminar pri predmetu Kompozitni materiali. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 6–17.

Hollaway, L. 1993. *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*. Glasgow, Škotska. Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall: 28–48.

Zakon o graditvi objektov. Uradni list RS št. 102/04: 9. člen.

Poletti, E., Vasconcelos, G., Jorge, M. 2014. Application of near surface mounted (NSM) strengthening technique to traditional timber frame walls. *Construction and Building Materials* 76: 34–50.

Yeou-Fong, L., Yao-Ming, X., Ming-Jer, T. 2007. Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*. Volume 23: 411–422.

Karimi, M. S., Nasser, M., Maroofi, E. 2011. Using NSM Method in R/C Beams Strengthening by FRP Strips. Semnan, Iran. 6th National Congress on Civil Engineering: 1–3.

Witzany, J. Čejka, T., Zigler, R. 2014. Failure mechanism of compressed short brick masonry columns confined with FRP strips. *Construction and Building Materials* 63: 180–188.

Vodič za izbor kompozitnih materialov za konstrukcijske ojačitve. 2013. Mapei, d.o.o., Novo mesto. Promocijsko gradivo: 4 str.

Juvandes, L. F. P., Barbosa, R. M. T. 2011. Bond Analysis of Timber Structures Strengthened With FRP Systems. *Strain – An International Journal for Experimental Mechanics* 48: 125–130.

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V. 2014. Gradiva – vaje. Delovno gradivo za študij pri predmetu Gradiva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.

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): 64–65.

Borri, A., Corradi, M., Grazini, A. 2004. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites: Part B* 36: 143–153.

Khin, M.Z., Zainai, M., Saleh, A.L., Suhaimi, A.B. 2005. A Modified Stress Model to Predict the Ultimate Bending Strength of Solid Timber Beams Using Plastic Approach. *Jurnal Kejuruteraan Awam* 17: 30-45.

Brunner, M. 2000. On The Plastic Design Of Timber Beams Eith A Complex Cross Section. World Conference on Timber Engineering. Whistler, Britanska Kolumbija, Kanada: 1–6.

STANDARDI

EN 408:1995. Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties

SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe

OSTALI VIRI

Hoath, J. 2006. Repairing Historic Roof Timbers. Historic Churches. Buildingconservation.com. <http://www.buildingconservation.com/articles/rooftimber/rooftimber.htm> (pridobljeno 16.4.2015).

Moren, B. 2015. Moving into Kullfallet. Björn's blog, objavljeno 29. 3. 2015. <http://bjornmoren.com/Moving-into-Kullfallet.html> (pridobljeno 12.4.2015).

Ryan, V. 2011. What is Kevlar? Types Of Kevlar. Technology Student. <http://www.technologystudent.com/joints/kevlar2.html> (pridobljeno 23.7.2015).

Cripps, D. 2015. Carbon Fibre/Fiber. netcomposites. <http://www.netcomposites.com/guide/carbon-fibrefiber/34> (pridobljeno 23.7.2015).

PrinceEngineering. 2015. <http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html#sthash.mI16SiIN.dpbs> (pridobljeno 23.7.2015).

Khemani, H. 2010. Linear Variable Differential Transformer or LVDT. Bright Hub Engineering. http://www.brighthubengineering.com/hvac/62615-linear-variable-differential-transformer-or-lvdt/#imgn_0 (pridobljeno 26.7.2015).

Mapei, d.o.o. 2015. Povpraševanje o izvedbi ojačitev s FRP proizvodi. Sporočilo za: Božič, L. 25. 5. 2015. Osebna komunikacija.

PRILOGA A: ANALITIČNA REŠITEV UPOGIBNO OBREMENJENEGA OJAČANEGA PREREZA

Račun upogibnega momenta, ki ga prečni prerez prenese, se običajno izvede v okviru klasične teorije linearne elastičnosti, kjer velja poenostavljen konstitutivni zakon lesa:

$$\sigma_w(x, z) = E_w \cdot \varepsilon_w(x, z) \quad (\text{A})$$

Tak pristop omogoča enostavno določitev poteka napetosti v mejnem stanju, kar se za dimenzioniranje sicer izkaže kot praktično, po drugi strani pa ne upošteva nelinearnega obnašanja lesa.

Linearna analiza

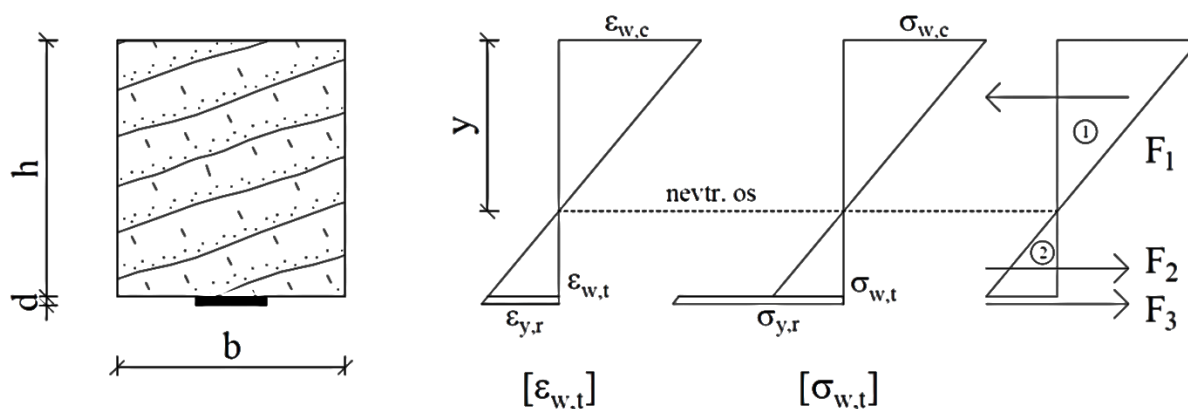
Za dimenzioniranje lesenih elementov po linearni analizi se upogibno odpornost prereza pri enoosnem upogibu določi po enačbi (B):

$$M_R = W \cdot f_m \quad (\text{B})$$

pri čemer so:

- M_R ... upogibni moment ob porušitvi,
- W ... odpornostni moment prečnega prereza,
- f_m ... upogibna trdnost lesa.

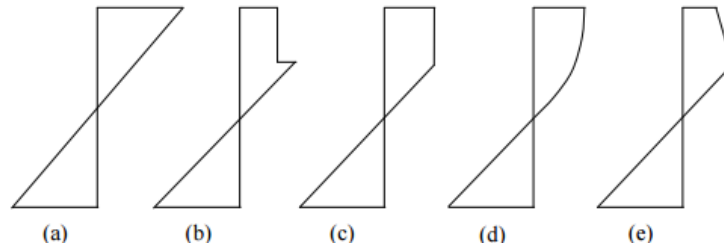
Upogibno odpornost prečnega prereza z ojačitvijo lahko izračunamo tako, da širino ojačitve pomnožimo z razmerjem togosti E_r/E_w . Izračunamo novo težišče, lego nevtralne osi pa upoštevamo pri določitvi napetosti na zgornjem in spodnjem robu. Upogibna odpornost je vsota momenta zaradi napetosti v tlačni coni, momenta zaradi napetosti v natezni coni ter momenta zaradi napetosti v ojačitvi. Postopek za analizo po klasično elastični analizi podaja npr. Brunner (2000).



Slika 6.1: Mejno stanje za dimenzioniranje po klasični linearni teoriji

Nelinearna analiza

Upoštevanje delne plastifikacije v tlačni coni prereza zajamemo z nelinearno analizo. Dejanski potek napetosti zaradi upogibnega momenta so različni avtorji modelirali različno:

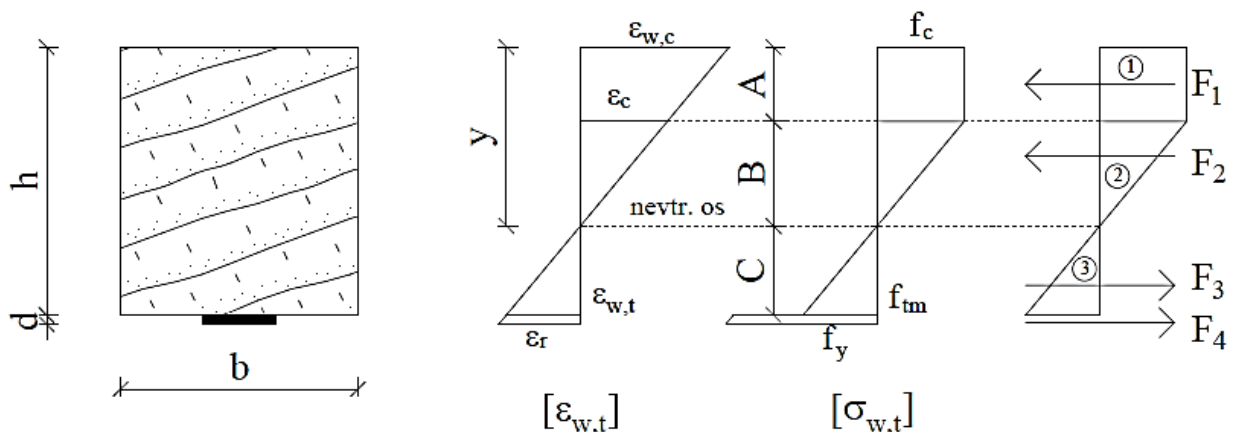


Slika 6.2: Obstoječi modeli poteka napetosti z upoštevanjem delne plastifikacije tlačne cone (Khin et al., 2005):

(a) elastična teorija, (b) po Moeju, (c) po Nwokoyeju, (d) po Zakiću, (e) po Bazanu

Thunellov model

Eno prvih rešitev za določitev upogibne odpornosti plastificiranega prereza je izpeljal Thunell na podlagi poteka napetosti po Nwokoyeju (slika 5.2c). Predpostavil je, da napetosti v natezni coni sledijo linearnemu poteku, tlačna cona pa se plastificira. Aproximiral je, da tlačne napetosti po doseženi meji elastičnosti ostanejo konstantne do vrha prereza. Ključni predpostavki modela sta, da je pri upogibu dejanska trdnost v natezni coni $f_{t,m}$ večja od natezne trdnosti pri čistem nategu vzporedno z vlakni f_t , medtem ko to ne velja v primeru tlačnih napetosti, kjer je dejanska vrednost tlačne trdnosti enaka tlačni trdnosti pri čistem tlaku vzporedno z vlakni f_c (Brunner, 2000).



Slika 6.3: Mejno stanje za dimenzioniranje po Nwokoyevem zakonu

Evrokod ne vsebuje predpostavljene vrednosti f_{tm} , možno pa jo je izračunati s primerjavo enačb za upogibno odpornost prereza po Brunnerju in po klasični linearni teoriji.

Brunner (2000) je za račun upogibne odpornosti predlagal izraz:

$$M_R = f_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot C \quad (C)$$

pri čemer velja:

$$C = \frac{-m^4 + 6 \cdot m^2 + 8 \cdot m + 3}{(1 + m)^4}; \quad m = \frac{f_c}{f_{tm}} \quad (D)$$

Če enačimo enačbo (D) z izrazom za upogibni moment M_R po klasični elastični teoriji, dobimo:

$$f_c \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot C = f_m \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (E)$$

$$\frac{-m^4 + 6 \cdot m^2 + 8 \cdot m + 3}{(1 + m)^4} = \frac{f_m}{f_c} \quad (F)$$

Ob poznanem razmerju na desni strani enačbe (F) lahko z Excelovim reševalnikom poiščemo vrednost m , iz česar po enačbi (G) določimo f_{tm} . S tem dobimo vrednosti napetosti in deformacij za dimenzioniranje v mejnem stanju. Poiskati je potrebno še lego nevtralne osi y . To določimo iz ravnotežnega pogoja sil v prerezu in s pomočjo podobnih trikotnikov.

$$\sum_i F_i = F_1 + F_2 - F_3 - F_4 = 0 \quad (H)$$

Sile F_1, F_2 in F_3 so dobljene z integriranjem normalnih napetosti po treh območjih glede na konstitutivni zakon, F_4 pa z integriranjem normalnih napetosti po površini prečnega prereza ojačitve:

$$F_1 = \int_A \sigma_w(x) dz = f_c \cdot b \cdot (y - B) \quad (I)$$

$$F_2 = \int_B \sigma_w(x) dz = f_c \cdot b \cdot B \cdot \frac{1}{2} \quad (J)$$

$$F_3 = \int_C \sigma_w(x) dz = f_{tm} \cdot b \cdot C \cdot \frac{1}{2} \quad (K)$$

$$F_4 = \int_{A_r} \sigma_w(x) dz = A_r \cdot \sigma_r \quad (L)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{B} = \frac{\varepsilon_{w,t}}{h - y} \quad (M)$$

Iz dobljenih vrednosti razdalj A, B in C določimo upogibno odpornost prereza kot vsoto momentov sil F_1 do F_4 .

Pri implementaciji modela za izračun odpornosti so bile upoštevane predpostavke:

- na podlagi preiskav smo osnovni material elementov razvrstili v ocenjen trdnostni razred po SIST EN 1995-1-1:2005 in upoštevali mehanske karakteristike trd. razreda,
- ojačitve z jeklenim trakom zajamemo z množenjem (redukcijo) modula elastičnosti ojačitve s faktorjem podajnosti veznih sredstev po SIST EN 1995-1-1:2005, pri tem smo upoštevali razmik med vijaki $s = 0,25 \cdot s_{min} + 0,75 \cdot s_{max} = 325$ mm,
- predpostavljena je popolna adhezija med lepilno pasto in palico v utoru,
- težišče ojačitve s palico je točno na polovici višine utora – do težišča sega statična višina prereza,
- po Nwokoyevem modelu se les delno plastificira v tlačni coni, na delu tlačne cone napetosti dosežejo tlačno trdnost in ostanejo konstantne,
- obstaja korelacija med plastično upogibno natezno trdnostjo ter tlačno trdnostjo, s katero se izračuna lego nevtralne osi ojačanega plastificiranega prereza (Brunner, 2000).

PRILOGA B: IZVLEČEK IZ IZDELANE DATOTEKE ZA ANALITIČNI IZRAČUN ODPORNOSTI PREREZA

KLASIČNA ELASTIČNA TEORIJA				
LES			OJAČITEV	
trdn. razred lesa	C50		b_R	5,0 cm
razred trajanja obt.	brez		t_R	0,6 cm
b_w	16,0	cm	f_y	33,500 kN/cm ²
h_w	18,0	cm	E_R	2184,0 kN/cm ²
k_{mod}	1,0	-	$\epsilon_{y,R}$	0,0153 -
$f_{M,k}$	5,000	kN/cm ²	=	15,34 ‰
$f_{M,d}$	3,846	kN/cm ²	RAZMERJE TOGOSTI	
$f_{C,0,k}$	3,000	kN/cm ²	n	1,365 -
$f_{C,0,d}$	2,308	kN/cm ²	EFEKTIVNI PREREZ	
E_w	1600,0	kN/cm ²	b_{eff}	6,8 cm
$W_{w,neoj}$	864,00	cm ³	S_{eff}	2666,94 cm ²
a	-0,3	cm	A_{eff}	292,10 cm ²
Φ_{vijaka}	8,0		$z_{eff,t}$	9,13 cm
ρ	550,0		$z_{eff,sp}$	8,87 cm
s	325,0		$z_{eff,R}$	9,77 cm
Ku	2991,0		MEJ. STANJE (poruš. v tl. con)	
γ	0,527358		$\sigma_{c,zg}$	3,846 kN/cm ²
Ered	1151,751		$\sigma_{t,sp}$	3,736 kN/cm ²
			$\epsilon_{c,zg}$	0,002404 -
			$\epsilon_{t,sp}$	0,002335 -
			ϵ_R	0,002441 -
			σ_R	5,330 kN/cm ²
			$M_{el,neoj}$	33,2 kNm
			$M_{el,oj}$	34,2 kNm
			vpliv ojačitve	3,0%

PLASTIČNA ANALIZA (NWOKOYE)					
LES			OJAČITEV		
trdn. razred lesa	C40		b_r	1,0 cm	situacija v mejnem stanju
razred trajanja obt.	brez		d	1,0 cm	
b_w	16,0	cm	f_r	76,000 kN/cm ²	
h_w	18,0	cm	E_R	4080,0 kN/cm ²	
k_{mod}	1,0	-	THUNELLOV PARAMETER		
$f_{M,k}$	4,000	kN/cm ²	$f_{M,d}/f_{C,d}$	1,538 -	Thunellov parameter
$f_{M,d}$	3,077	kN/cm ²	≈	1,538 -	
$f_{C,0,k}$	2,600	kN/cm ²	m	0,58 -	
$f_{C,0,d}$	2,000	kN/cm ²	f_{tM}	3,474 kN/cm ²	
E_w	1400,0	kN/cm ²	γ	9,790 cm	Račun γ za ravnotežje sil
$W_{w,neoj}$	864,00	cm ³	MEJNE DEFORMACIJE		
a	0,5	cm	ϵ_c	0,00143 -	CONE [cm]
			$\epsilon_{w,t}$	0,00248 -	A
			$\epsilon_{w,c}$	0,00296 -	B
			ϵ_r	0,00233 -	C
			SILE V MEJNEM STANJU		PLASTIFIKACIJA
			F_1	162,024 kN	σ_r
			F_2	75,630 kN	f_r
			F_3	228,148 kN	
			F_4	9,507 kN	$M_{pl,neoj}$
			ΣF	0,000 kN	$M_{pl,oj}$
					vpliv ojačitve
					3,3%
					vpliv analize
					-19,8%

**PRILOGA C: DIAGRAMI SILA-POMIK TRI-TOČKOVNEGA UPOGIBNEGA PREIZKUSA
VZORCEV LESA IZ PREIZKUŠANCEV OD P1 DO P7 (PO DIN 52 186)**

