Kompozitne grede drvo - beton: konstrukcijske analize i ocjena rezultata za sprezanje zasijecanjem i primjenom trnova

Mesić, Rebeka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:699813

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**

Image not found or type unknown *Repository / Repozitorij:*

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository

zir.nsk.hr

UNIRI DIGITALNA KNJIŽNICA

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Rebeka Mesić

Kompozitne grede drvo – beton: konstrukcijske analize i ocjena rezultata za sprezanje zasijecanjem i primjenom trnova

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Diplomski sveučilišni studij
Konstrukcije
Drevene konstrukcije

Rebeka Mesić

Kompozitne grede drvo – beton: konstrukcijske analize i ocjena rezultata za sprezanje zasijecanjem i primjenom trnova

Diplomski rad

Rijeka, kolovoz 2023.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

_____

Rebeka Mesić

U Rijeci, 28. kolovoza 2023.

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta:

Poboljšanje proračunskih modela za ocjenu stanja građevinskih konstrukcija

Voditelj projekta: Prof.dr.sc. Ivana Štimac Grandić

Šifra projekta: uniri-technic-18-127

Financijer projekta: Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost: Sveučilište u Rijeci

ZAHVALA

Hvala apsolutno svima; mami, tati, bratu, Berni, Luni, kolegicama i kolegama, profesoricama i profesorima i ljudima s pitanjem „jesi li predala diplomski?“.
Mami i tati što su me oblikovali ovakvu kakva jesam, mlađem bratu što mi ne da zaboraviti gradivo koje sam učila. Berni uvijek spremnoj za rješavanje logističkih problema studiranja i Luni što mi je u gluho doba noći svojim šetkanjem po kući davala do znanja da nisam jedina koja radi po noći.
Hvala mojoj dragoj mentorici za razumijevanje mojeg šašavog rasporeda, ne stvaranju ikakvog pritiska, savjetima, pruženim mogućnostima i za veliku količinu izdvojenog vremena uz uvijek vedro raspoloženje!

SAŽETAK

Studentica: Rebeka Mesić
Naslova rada: Kompozitne grede drvo – beton: konstrukcijske analize i ocjena rezultata za sprezanje zasijecanjem i primjenom trnova
Mentorica: Prof. dr. sc Adriana Bjelanović, dipl. ing. građ.
Studij: Diplomski sveučilišni studij građevinarstva
Kolegij: Drvene konstrukcije

U uvodnom dijelu rada ukratko je izložen pregled tipoloških skupina kompozita drvo – beton i područja njihove primjene, opisane su konstrukcijske značajke karakteristične za navedene tipologije te posljedične razlike učinaka sprezanja. Na temelju provedenog uvida u stanje područja (normizacija i dosadašnja istraživanja, dostupna iz bibliografskih izvora) dan je i pregled raspoloživih metoda proračuna (analitičkih i numeričkih), opisane su i diskutirane prednosti i ograničenja njihove primjene. Fokus ovoga rada jest konstrukcijska analiza dviju tipoloških grupa – u prvoj se sprezanje ostvaruje isključivo primjenom trnova (štapna spajala), a u drugoj primjenom zasijecanja (preoblikovanje kontaktnih rubova dijelova kompozita) s ili bez dodatnog štapnog spajala u zasjeku. Ove su dvije tipološke grupe izdvojene zbog različitosti s obzirom na mogućnost primjene analitičke procedure zasnovane na γ – metodi. Za obje tipološke grupe su izrađeni ravninski numerički modeli (sa štapnim konačnim elementima) prikladni za primjenu u praksi – tzv. tlačno – vlačni model (engl. Strut and tie, frame model, truss / lattice models). Djelotvornost numeričkih modela evaluirana je za dva karakteristična slučaja – uzimajući u obzir i zanemarujući krutost spoja. Proračunske analize (analitičke i numeričke) su provedene samo za početnu fazu sprezanja (izostavljeni su učinci dugotrajnih opterećenja i reološkog ponašanja konstitutivnih materijala). U provedbi analiza su korišteni rezultati istraživanja dobiveni eksperimentalno i numerički, dostupni iz literature. Rezultati analiza provedenih u ovom diplomskom radu su uspoređeni s bibliografskim podacima, izvedeni su zaključci i dane smjernice za praktičnu primjenu.

Ključne riječi: kompozitne grede drvo – beton, sprezanje zasijecanjem i trnovima, konstrukcijska analiza za početnu fazu sprezanja, numerički i analitički pristup, usporedba rezultata i smjernice za primjenu

ABSTRACT

Student: Rebeka Mesić
Title of thesis: Timber-concrete composite beams: structural analyses and evaluation of the results for notched and doweled composites

Mentor: Prof. Adriana Bjelanović, PhD
Study: Master's studies in civil engineering
Course: Timber structures

In the introduction of this master thesis, an overview of the typological groups of timber – concrete composites and areas of their application were briefly presented and described. As well as their structural features and differences related to composite actions. Based on the insight into the state of the art (standardization and conducted research available from bibliographic sources) an overview of calculation methods (analytical and numerical) was given and the advantages and/or limitations of their application were described and discussed. The focus of this thesis is on the structural analysis of two typological groups - in one group the composite action is achieved exclusively by dowels, and in the other, using notches (or grooves, which implies that the contact edges of constituent parts of the T-section are reshaped) – the second group can but does not necessarily have an additional dowled fastener. These two typological groups were selected due to their differences, considering the possibility of applying the analytical procedure based on the γ – method. Planar numerical models, suitable for any practical application have been made for both groups - so-called strut and tie models. The effectiveness of created numerical models was evaluated in two different instances, in one instance the stiffness of the joint is considered, and in the other, it is completely disregarded. Design analyses (analytical and numerical) were performed only for the short-term composite actions (the effects of long-term loads and rheological behavior of the constituent materials of the composite were left out). The results of experimental and numerical research, available in the literature, were used as a basis for the analysis. The results of the analyses carried out in this thesis were compared with bibliographic data, conclusions were derived and guidelines for practical application were given.

Key words: timber-concrete composite beams, notched and doweled composites, short-term structural analysis, numerical and analytical investigation, comparison of the results and guidance for practical application

SADRŽAJ

1. UVODNO POGLAVLJE 1

1.1. Motivacija za istraživanje i ishodišta 1

1.2. Ciljevi i pristup istraživanju 2

1.3. Pregled i sadržaj poglavlja 3

2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA DRVO – BETON 4

2.1. Opće napomene o kompozitima i primjeni u građevinskim konstrukcijama 4

2.2. Tipologija kompozira drvo – beton (TCC) 8

***2.2.1. Konstitutivni materijali* 9**

***2.2.2. Ponašanje kompozita i učinci sprezanja* 11**

2.2.3. Tiplogije sprezanja i spajala 16

2.2.4. Mehanička svojstva i ponašanje spoja 21

***2.2.5. Mehanička svojstva i ponašanje kratkotrajno opterećenih podatljivih kompozita* 22**

***2.2.6. Normizacija* 24**

2.3. Određivanje mehaničkih svojstava spojeva 25

2.3.1. Eksperimentalne metode 26

2.3.2. Metode zasnovane na proračunu *30*

2.3.2.1. Spojevi sa štapastim spajalima 31

2.3.2.2. Zasječeni spojevi 32

2.3.2.3. Modeli sila – pomak 33

2.3.2.4. Numerički KE modeli 33

2.4. Metode proračuna kompozitnih greda drvo – beton 35

2.4.1. Analitička γ – metoda 38

2.4.2. Tlačno – vlačni model 40

3. KONSTRUKCIJSKA ANALIZA TC GREDA – SPREZANJE ZASIJECANJEM I PRIMJENOM TRNOVA 47

3.1. Referentna laboratorijska ispitivanja 47

3.1.1. Referentni push – out testovi posmičnih proba 48

3.1.2. Referentno ispitivanje velikih uzoraka na savijanje 48

3.2. Tlačno – vlačni model 51

3.2.1. Greda A1 – model A1 – 1 55

3.2.2. Greda A1 – model A1 – 2 57

3.2.3. Greda B1 – model B1 – 1 59

3.2.4. Greda B1 – model B1 – 2 60

3.3. Analitička γ – metoda 63

3.3.1. Greda A1 63

3.3.2. Greda B1 68

3.4. Usporedba rezultata greda A1 i B1 72

3.5. Priprema za ispitivanje 73

3.5.1. Greda X1 – zasjek 150x60x63 mm 73

3.5.2. Greda X2 – trn φ12 83

3.5.3. Provjera nosivosti spajala 91

3.5.3.1. Trnovi 91

3.5.3.2. Zasjeci 92

3.5.4. Usporedba podataka greda X1 i X2 94

4. ZAKLJUČAK 95

5. POPIS SLIKA 97

6. POPIS TABLICA 101

7. POPIS LITERATURE 102

1. UVODNO POGLAVLJE

1.1. Motivacija za istraživanje i ishodišta

Kompoziti drvo – beton već se odavno primjenjuju u zahvatima obnove i rekonstrukcije postojećih građevina, a za rješavanje inženjerskih problema, kojih u takvim konstrukcijama nerijetko ima, često se poseže i za iskustvenim rješenjima iz dosadašnje prakse. U urbanim sredinama u kojima nedostaje slobodnih lokacija za nove građevine, zahvati na postojećim građevinama često proizlaze iz zahtjeva prenamjene nekog dijela (ili cijele) građevine u prostor poslovne ili javne namjene. Ojačanja primjenom kompozita drvo – beton u takvim su slučajevima nužna zbog promjene opterećenja i ispunjavanja dvaju temeljnih zahtjeva (mehanička otpornost i stabilnost, sigurnost u slučaju požara), ali imaju i dodatnih pozitivnih aspekata ekološke naravi – iskorištavaju se postojeće drvene stropne konstrukcije i smanjuje potencijalni građevinski otpad. Logična posljedica praktične primjene i brojnih istraživanja ovih kompozita koja traju gotovo cijelo stoljeće jest razvoj inovativnih spajala i patentiranih tipologija.[1], [2], [3] Suvremena tendencija je primjena ovih kompozita u novim građevinama zgrada (stropni, kovni i zidni sklopovi) i mostova te trend izgradnje hibridnih građevina zbog prepoznatog sinergijskog učinka kombiniranja materijala u nosivom sklopu i mogućnosti izvođenja konstrukcije gradnjom in situ, montažom predgotovljenih elemenata ili kombinirano.[4]

U trenutno važećem Eurokod sustavu normi za projektiranje (novih) konstrukcija postoji norma niza HRN EN 1994 za projektiranje spregnutih konstrukcija čelik – beton, no ne i ona kojoj je područje primjene projektiranje spregnutih konstrukcija drvo – beton. U sadašnjem izdanju norme niza HRN EN 1995, kompoziti drvo – beton su vrlo oskudno zastupljeni u dijelu HRN EN 1995 – 2 (Projektiranje drvenih konstrukcija – 2. dio: Mostovi), a proračun mehanički sastavljenih greda, ishodišni i za proračun mehanički sastavljenih kompozitnih greda drvo – beton je dostupan u Informativnom dodatku norme HRN EN 1995 – 1 – 1.[5], [6] S obzirom da su drvo i beton materijali različitih mehaničkih svojstava i ponašanja, da je za svojstva oba materijala karakteristična promjenjivost u vremenu (reološko ponašanje) te da se primjena kompozita drvo – beton ekspanzivno širi na cestovne mostove i zgrade (posebno na visoke zgrade stambene, javne i poslovne namjene), očita je potreba za izdvojenim

dijelom norme Eurokod 5 čije su područje primjene ovi kompoziti. To je i osnovni razlog radi kojega je u završnoj fazi izrada tehničke specifikacije TS 1995 – 3, ishodištu za budući treći dio norme niza HRN EN 1995, HRN EN 1995 – 3 pod nazivom Projektiranje spregnutih konstrukcija drvo – beton: Opća pravila i pravila za zgrade. U sadržaj ove tehničke specifikacije su, između ostalih novina, uključene i tipologije kompozita na koje bez nužnih korekcija nije bilo moguće izravno primijeniti analitičku γ – metodu (izvorno namijenjenu proračunu kompozita s mehaničkim spajalima i lijepljenih), a primjer su takvih tipologija i kompoziti u kojima je sprezanje ostvareno zasijecanjem, s dodatnim štapnim spajalima u samom zasjeku ili bez njih.[1], [7], [8]
Nadolazeće promjene u normizaciji, brojne prednosti primjene ove tipologije sprezanja i visok učinak sprezanja, elaborirani u brojnim provedenim istraživanjima, bili su i motivacija za fokus ovog diplomskog rada na konstrukcijsku analizu kompozita drvo – beton izvedenih zasijecanjem te logičnu usporedbu dobivenih rezultata s rezultatima analize provedene za kompozite u kojima se učinak sprezanja ostvaruje primjenom diskretno raspoređenih trnova.

1.2. Ciljevi i pristup istraživanju

Glavni cilj ovog diplomskog rada jest izložiti posebnosti, razlike i u konačnici, rezultate konstrukcijskih analiza kompozita za koje je sprezanje postignuto zasijecanjem te primjenom metalnih mehaničkih spajala – trnova. Provedene konstrukcijske analize objedinjuju numerički i analitički pristup, a vjerodostojnost rezultata je evaluirana usporedbom s rezultatima istraživanja koji su preuzeti iz dostupne literature gdje su dobiveni eksperimentalno i numerički.[9] Treba naglasiti i da je u istraživanju provedenom u ovom diplomskom radu korišten numerički model drugačiji od onoga čiji su rezultati preuzeti iz te literature.
Kako je analiza numeričkog modela preduvjet ostvarivanje glavnog cilja rada, bitno je utvrditi kriterije njegova izbora – prikladnost za praktičnu primjenu i raspon primjene (varijacije vrste presjeka i materijala, fleksibilnost spoja, višerasponski sustavi i dr.), spajala (npr. varijacije rasporeda) i opterećenja (modeliranje nejednolike raspodjele, uvažavanje učinaka neelastičnih naprezanja zbog npr. temperature i dimenzijskih promjena drva te sl.). Između raspoloživih numeričkih modela (pregled je prezentiran u poglavlju 2.4) odabran je najjednostavniji za praktičnu primjenu – tzv. Tlačno – vlačni

model (engl. Strut and tie). Iako zahtijeva primjenu računalnog paketa i postupak modeliranja nije normiran, superiorniji je od analitičke γ – metode, jedine normirane metode proračuna.[1]
U konačnici, radi ispunjenja definiranog cilja istraživanja, djelotvornost numeričkih modela je evaluirana za dva karakteristična slučaja – uzimajući u obzir i zanemarujući krutost spoja, a dobiveni rezultati su uspoređeni i s rezultatima analitičkog modela (primjena γ – metode).

1.3. Pregled i sadržaj poglavlja

Sadržaj ovog rada je ograničen na analizu kompozita betona i drva u kojima se sprezanje ostvaruje zasijecanjem i/ili metalnim trnovima. Provedene su analize samo za početnu fazu sprezanja (dugotrajni učinci, puzanje i skupljanje nisu uzeti u obzir). U drugom poglavlju su ukratko izložene opće informacije o spregnutim konstrukcijama, tipovima sprezanja, mehaničkim spojnim sredstvima i učinku sprezanja koji se ostvaruje. Navedene su metode ispitivanja malih i velikih uzoraka te rezultati (modul klizanja, krutost pri savijanju). U trećem poglavlju (glavni dio rada) su opisane provedene konstrukcijske analize, numerički i analitički modeli, analizirani su rezultati i napravljene usporedbe s rezultatima preuzetim iz literature (eksperimentalni). Na primjeru dviju T – greda spregnutih različitim spajalima (zasijecanje i trnovi) su analizirani rezultati primijenjenog numeričkog i analitičkog pristupa i napravljene odgovarajuće usporedbe. U zaključnom poglavlju su diskutirani djelotvornost odabranog pristupa (konstrukcijskih analiza) i dane preporuke za praktičnu primjenu.

2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA DRVO – BETON

2.1. Opće napomene o kompozitima i primjeni u građevinskim konstrukcijama

Građevinska konstrukcije koja je nosivi dio ili cijela građevina te kao takva predstavlja sklop građevinskih proizvoda mora ispuniti dva temeljna tehnička zahtjeva na građevinske proizvode koji su u nadležnosti građevinskih inženjera, a propisani su Zakonom o građevinskim proizvodima: zahtjev na mehaničku otpornost i stabilnost te dio zahtjeva na sigurnost u slučaju požara.[10] Način ispunjavanja ovih dvaju zahtjeva posebno je uređen i Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije.[11], [12] Ispunjavanje ostalih pet temeljnih tehničkih zahtjeva na građevinske proizvode (i građevine) je uređeno posebnim propisima. Između njih treba izdvojiti onaj o održivoj uporabi prirodnih izvora, u kontekstu sve prisutnije brige za održivosti gradnje i utjecaj na okoliš pa se pri izboru materijala i tipologije gradnje uzimaju u obzir i neki od sljedećih parametara:

- utjecaj proizvodnje na okoliš,
- životni ciklus proizvoda,
- održivost resursa,
- mala emisija CO_2,
- niska potrošnja energije u proizvodnji,
- iskoristivost otpada proizvodnje/gradnje,
- potencijal reciklaže,
- energetska učinkovitost.

Uz navedene je parametre i tehničke zahtjeve, iznimno važna ekonomičnost odabrane konstrukcije i izbor materijala te način izgradnje. Kompozitne konstrukcije svih razina i kombinacija materijala imaju važno mjesto među današnjim građevinskim konstrukcijama. U novim je konstrukcijama primjena spregnutih konstrukcija čelik – beton čest izbor za konstrukcije zgrada i mostova, a pogotovo tamo gdje su razlog primjene zahtjevi na otpornost (posljedica opterećenja ili raspona) kombinirani sa zahtjevima na visinu npr. stropnih konstrukcija zgrada ili rasponske konstrukcije mostova. Kompoziti drvo – beton, izvorno primjenjivani za obnovu postojećih stropnih

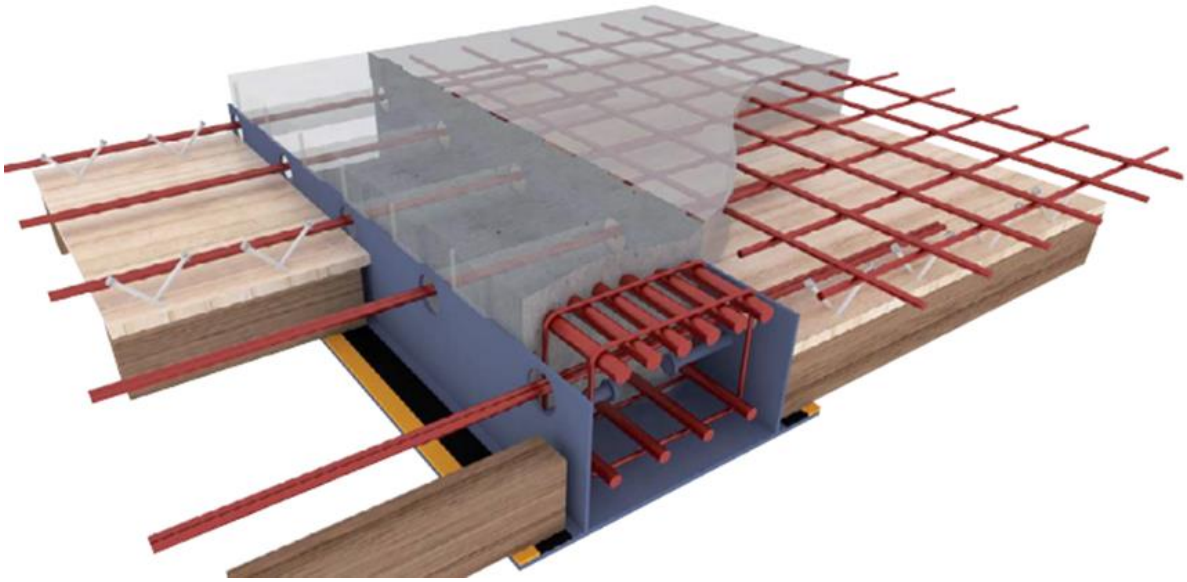
konstrukcija zgrada danas su sve prisutniji kao rješenja za nove konstrukcije zgrada i mostova (posebno cestovnih), a neke od suvremenih primjena takve vrste su prikazane na slici 1.

a) Most preko rijeke Ager u Lohmaru, Njemačka (izvor: https://www.ib-miebach.de/en/projects/timber-bridges/timber-concrete-composite-bridges/timber-concrete-composite-bridge-schiffarth-de.html)

b) Međukatna konstrukcija s CLT pločama i HBV sustavom sprezanja (perforirane čelične ploče) prije betoniranja in situ (izvor: https://web.fpinnovations.ca/tcc/)

c) Predgotovljena TCC stropna ploča velikog raspona (dimenzije 10 x 3 m)
(izvor: https://www.mm-holz.com/en/products/timber-concrete-composite-element)

d) Zidni TCC paneli s ugrađenim sustavom grijanja – proizvodnja i ugradnja
(izvor: https://structurecraft.com/projects/okanagan-college-gym-wall-panels)



e) Patentirani sustavi sprezanja za TCC stropne konstrukcije
(izvor: https://hybridbeam.eu/en/timber-or-composite-timber-concrete-ceiling/)

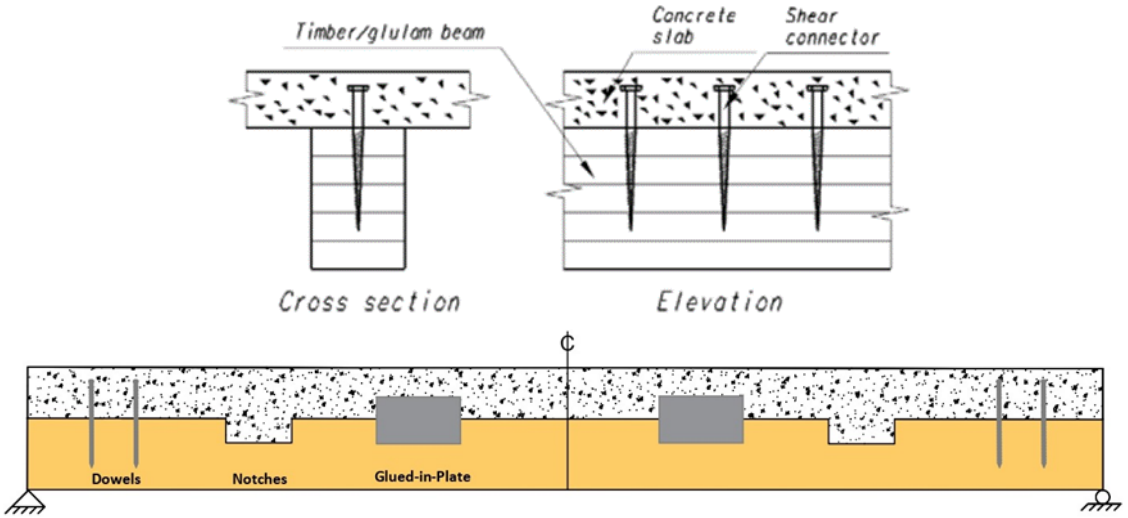
Slika 1. Primjeri primjene TC kompozita u novim konstrukcijama mostova i zgrada

Primjena konstrukcijskog stakla, relativno novog građevinskog materijala se širi i na kompozite (drvo – staklo, konstrukcije stakleno – aluminijskih / drvenih fasada i dr.). Pri obnovi postojećih zgrada su česti kompoziti opeka – beton, opeka / kamen – čelična zatega, beton – beton različitih starosti te ojačanja armiranobetonskih elemenata trakama s karbonskim vlaknima, kao i kompoziti drvo – materijali na osnovi drva te ojačanja drvenih stropnih konstrukcija zidanih zgrada drvnim pločama (poboljšana svojstva u ravnini stropne konstrukcije i okomito na nju) te čeličnim trakama ili trakama na osnovi staklenih vlakana (djelotvorno ojačanje samo u ravnini stropne konstrukcije). Zato je na početku važno i definirati sam pojam kompozita – ukazati na mogućnost optimizacije na razini materijala (mikrokompoziti), na razini elementa / poprečnog presjeka (mezokompoziti) i cijelog sustava (makrokompoziti):

1. Na razini materijala označava kombinaciju najmanje dvaju materijala – primjer su materijali na osnovi drva (drvne ploče) u kojima je drvni materijal usitnjen do razine daske, furnira, ivera ili vlakna, a s vezivom (adheziv – ljepilo, cement ili dr.) čini jedinstvenu matricu, ali i beton ojačan čeličnim vlaknima. U slobodnoj definiciji je i armirani beton kompozitni materijal, a kompozitni se učinak ostvaruje prionljivošću betona i čelične armature.
2. Na razini poprečnog presjeka (konstrukcijskog elementa) označava kombinaciju najmanje dvaju materijala različitih mehaničkih: fizičkih i kemijskih svojstava te ponašanja. Raspored materijala omogućava optimalnu iskorištenost nosivih svojstava i krutosti dijelova složenog presjeka, a učinak sprezanja ostvaren povezivanjem dijelova presjeka (mehanički, podatljivo ili lijepljenjem, kruto) je veći – premašuje zbrojene doprinose sastavnih dijelova presjeka. Kompozitni element zato je optimalniji – boljih je tehničkih svojstava (nosivost, uporabljivost) i ekonomičniji.
3. Na razini konstrukcijskog sustava označava kombinacije konstrukcijskih elemenata ili dijelove konstrukcije izrađene od različitih materijala (beton, čelik, aluminij, drvo, staklo te mikrokompoziti) i/ili kombinacija mezokompozita.

2.2. Tipologija kompozira drvo – beton (TCC)

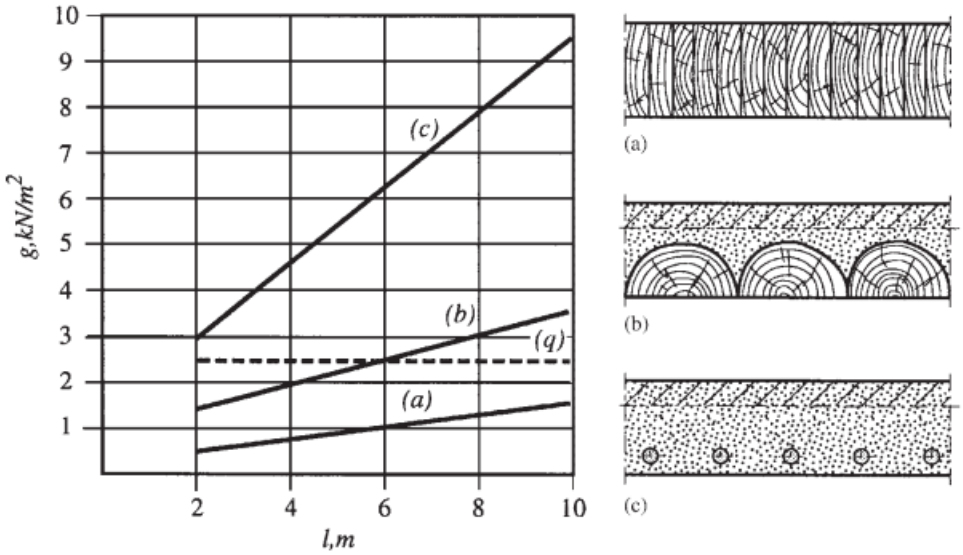
TCC je skraćenica od Timber – Concrete Composite (kompozit drvo – beton) i prema prethodnoj podjeli se radi o mezokompozitu s optimalnim rasporedom materijala i poziciji betonskog dijela u tlačnoj zoni T-presjeka, a tipologije sprezanja (spojna sredstva) mogu biti raznovrsne (Slika 2). Armiranobetonska ploča spregnuta s drvenim hrptom osigurava funkcionalnost/krutost, čvrstoću i stabilnost kompozita u ravnini (horizontalna djelovanja, npr. potresna) i okomito na ravninu stropne konstrukcije.



Slika 2. Poprečni i uzdužni presjek kompozitne grede drvo – beton [13] (gore) i primjeri različitih tipologija sprezanja (štapna spajala – trnovi), zasijecanje i pločasta spajala [14]

U usporedbi s drvenom stropnom konstrukcijom, prednosti primjene ovoga kompozita su povećana nosivost i krutost (smanjene vibracije i progibi), bolja su akustična svojstva (otpornost na udarni zvuk) i ponašanje u požaru. U odnosu na armiranobetonsku stropnu konstrukciju, značajno manja visina betonskog dijela kompozita smanjuje vlastitu težinu stropa i opterećenje na zidove te potresne sile. Manja je i količina emisije CO_2, a smanjen volumen utrošenog betona i/ili primjena predgotovljenih elemenata ubrzavaju gradnju. U starim konstrukcijama zidanih zgrada, izvedbom kompozita se zadržava postojeći drveni stropa i smanjuje potencijalni građevinski otpad što je povoljno sa stajališta održivosti.[15]

Na slici 3. je prikazan odnos vlastite težine i raspona za stropne konstrukcije od a) drva, b) TCC i c) betona.



Slika 3. Prikaz odnosa vlastite težine i raspona stropnih konstrukcija za uporabno opterećenje a) drvena stropna konstrukcija, b) TCC i c) betonska stropna konstrukcija [3]

2.2.1. Konstitutivni materijali

Drvo je anizotropan, nehomogen materijal, higroskopan materijal (utjecaj okruženja na sadržaj vlage drva, mehanička svojstva i dimenzijske promjene) i reološkog ponašanja. Razvitkom tehnologije lijepljenja i industrijske proizvodnje lijepljenih lameliranih konstrukcija, ostalih proizvoda i materijala od drva i na osnovi drva (dužni i pločasti proizvodi / materijali), drvene konstrukcije imaju sve veću primjenu, dodatno potenciranu i trendom održive gradnje, visokom razinom predgotovljenosti, razvoju tehnika spajanja (uobičajena i inovativna spajala) i produbljenim znanjima o trajnosti. Za širenje primjene drva u graditeljstvu iznimno je važna i svijest o potrebi smanjenja emisije CO_2 te suvremena orijentacija na ”zelenu gradnju”.[4]

Prednosti drva kao materijala za modernu gradnju:

- pozitivan utjecaj na okoliš,
- proizvodnja bez onečišćenja okoliša,
- obnovljivost resursa (šume – prirodni i održivi izvor),
- vrlo mala emisija CO_2 u atmosferu,
- malena potrošnja energije pri proizvodnji,
- visoka razina iskoristivosti otpada pri proizvodnji,
- visok potencijal reciklaže i ponovne uporabe,

- drvo – biološki razgradiv materijal,
- drvni kompozitni proizvodi / materijali – usitnjavanje sirovine kao osnova tehnologije proizvodnje,
- energetski učinkovita gradnja.
- povoljan odnos gustoće i čvrstoće
- visoka razina predgotovljenosti konstrukcija
- mogućnost izrade nosača raznovrsne geometrije

Nedostaci drva u primjeni za konstrukcije:

- trajnost (zahtijeva pristup očuvanju tehničkih svojstva – sustav mjera zaštite),
- anizotropnost (zahtijeva znanje i vještine pri proračunu spojeva i oblikovanju priključaka te izvedbi nosača sa zakrivljenim dijelovima),
- gorivost (barijera široj primjeni u npr. stambenoj gradnji višekatnica)
- manja čvrstoća od čelika i betona,
- cijena (skupa gradnja).

Drugi materijal u ovom kompozitu je beton odnosno armirani beton, kombinaciju betona i čelika pri čemu je prionljivost (vlačne) čelične armature i (tlačnog) betona iznimno važna za zajedničko djelovanje, odnosno nosiva svojstva.

Prednosti armiranobetonskih konstrukcija su:

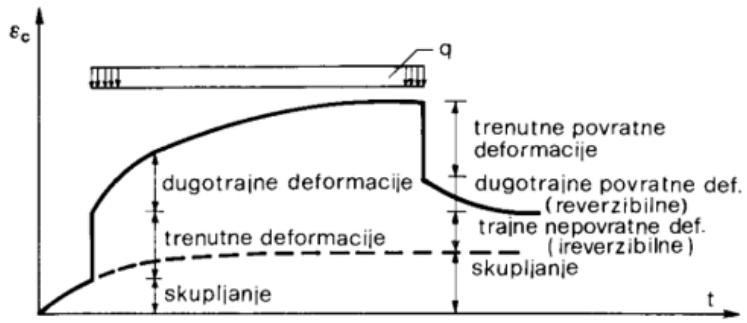
- nezapaljivost i požarna otpornost,
- trajnost,
- mali troškovi održavanja,
- otpornost prema potresu,
- mogućnost izrade najraznovrsnijih oblika,
- dobra mehanička svojstva (čvrstoće, prigušenje pri dinamičkim udarima).

Mane armiranobetonskih konstrukcija su:

- znatna vlastita težina,
- relativno velika provodljivost topline i zvuka,
- teškoće u kontroli ugrađene armature po završetku betoniranja,
- relativna kompliciranost radova (potrebna stručna radna snaga i nadzor),
- otežani radovi zimi,
- otežana naknadna adaptacija ili pojačanje gotove konstrukcije,
- pukotine koje smanjuju krutost i trajnost.

U kompozitima drvo – beton česta je i primjena laganih betona (s ekspandiranim polistirenom), s modulima elastičnosti čije su vrijednosti bliske modulu elastičnosti cjelovitog drva, a vlastita težina kompozita je bitno smanjena.

Beton je, kao i drvo, materijal promjenjivih svojstva i s vremenom se pojavljuju skupljanje, puzanje, trenutne deformacije koje se mogu smatrati elastičnima i dugotrajne deformacije betona zbog ponavljanog opterećenja. Pri sprezanju drva i betona zasijecanjem, u ranim danima stvrdnjavanja betona dolazi do skupljanja i stvaraju se otvori na rubovima spoja. Za ovakve situacije bi bilo prikladnije koristiti beton podložan manjem skupljanju. Na slici 4. je prikazan razvoj deformacija u betonu s vremenom.



Slika 4. Razvoj deformacija betona u vremenu za konstantno opterećenje i nakon rasterećenja [16]

2.2.2. Ponašanje kompozita i učinci sprezanja

Oba konstitutivna materijala kompozita imaju reološka svojstva, mehaničke i uporabne značajke kompozita su vremenski ovisne. Zato se proračunska krutost kompozita mijenja, odnosno, drugačijih je vrijednosti u vremenu t = 0 (početna faza sprezanja – kratkotrajno ponašanje) i tijekom uporabnog vijeka konstrukcije, u vremenu t > 0 (konačna faza sprezanja – dugotrajno ponašanje). Ispitivanje i proračun kompozita izloženih dugotrajnim djelovanjima je zahtjevnije jer treba uzeti u obzir promjene mehaničkih svojstava i slabljenje učinka sprezanja zbog puzanja betona i drva te skupljanja i dodatnih naprezanja zbog promjene temperature i sadržaja vlage, kao i mehaničko-sorpcijskih utjecaja na sustava spajanja.[9] Puzanje betona je u odnosu na puzanje drva (zbog promjena sadržaja vlage) izrazitije, a posljedica je promjena položaja neutralne osi i migracija dijela naprezanja iz betonskog u drveni dio

presjeka.[4] Deformacije sustava ovise o uvjetima okruženja pa rastu pri većim relativnim vlažnostima zraka.

Proračun za početnu fazu sprezanja (t = 0), odnosno elastičnu analizu primjenom γ – metode, treba provesti primjenjujući sljedeće vrijednosti modula elastičnosti:

E_b – modul elastičnosti betona

E_d – modul elastičnosti drva

Za proračun u završnoj fazi sprezanja (t > 0) treba primijeniti proračunske (u osnovi smanjene) vrijednosti modula elastičnosti (tzv. *metoda efektivnih modula* kojom se uzima u obzir puzanje različitih materijala)[3]:

$$E_{b,eff} = \frac{E_b}{1+\varphi}$$

$$E_{d,eff} = \frac{E_d}{1+k_{def}}$$

Gdje su:

$E_{b,eff}$ – efektivni modul elastičnosti betona

$E_{d,eff}$ – efektivni modul elastičnosti drva

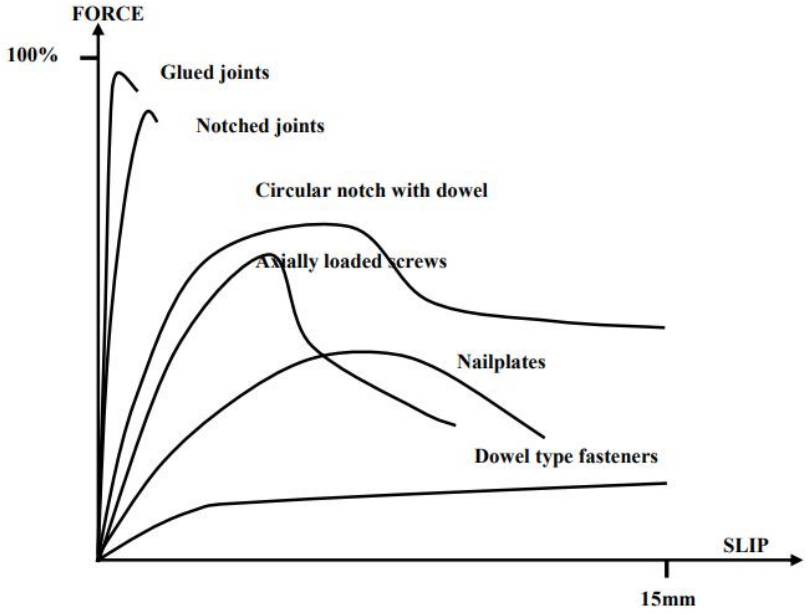
φ – faktor puzanja (beton)

k_{def} – faktor deformiranja (drvo)

Zajedničko djelovanje materijala – sprezanje, postiže se povezivanjem, tj. aktiviranjem posmične veze na dodiru dijelova T – presjeka, a za djelotvornost treba ispuniti tri uvjeta[9]:

1) neutralna os kompozitnog T – presjeka bi treba biti što bliže dodirnoj površini drvo – beton te tako osigurati poželjan raspored materijala (neraspucnli beton u tlačnoj zoni presjeka, drvo prevladavajuće u vlačnoj zoni).
2) sustav spajanja mora imati dostatnu nosivost i krutost za prijenos posmičnih sila i ostvarivanje učinka sprezanja
3) drveni dio kompozita (gredni ili pločasti) mora imati dovoljnu otpornost na kombinirano naprezanje savijanjem i (osnim) vlakom

Na učinak sprezanja (spregnuto djelovanje ili stupanj sprezanja) utječu tipologija i izbor spojnog sredstva sprezanja. Modul klizanja (parametar podatljivosti veze zbog izbora spajala, u N/mm), K_s, se određuje prema normi HRN EN 26891 [17]. Na slici 5. je prikazan dijagram sila – pomak za različite tipologije sprezanja i vrste spojnih sredstava.



Slika 5. Dijagram pomak – sila za različite tipologija sprezanja i spojna sredstva [18]

Prema normi HRN EN 1995 – 1 – 1, za TC kompozite K_s se određuje na temelju gustoće drvenog dijela presjeka, kao dvostruka vrijednost modula klizanja K_s za spojeve drvo – drvo i primjenjuje u proračunu graničnog stanja uporabljivosti. Ovakvo određivanje modula klizanja u TC kompozitima je na strani sigurnosti, ali vrlo pojednostavnjeno (zanemaruje se npr. utjecaj trenja i vrste betona). U proračunu graničnog stanja nosivosti se vrijednost modula klizanja umanjuje i iznosi K_u = 2/3 K_s.[5]

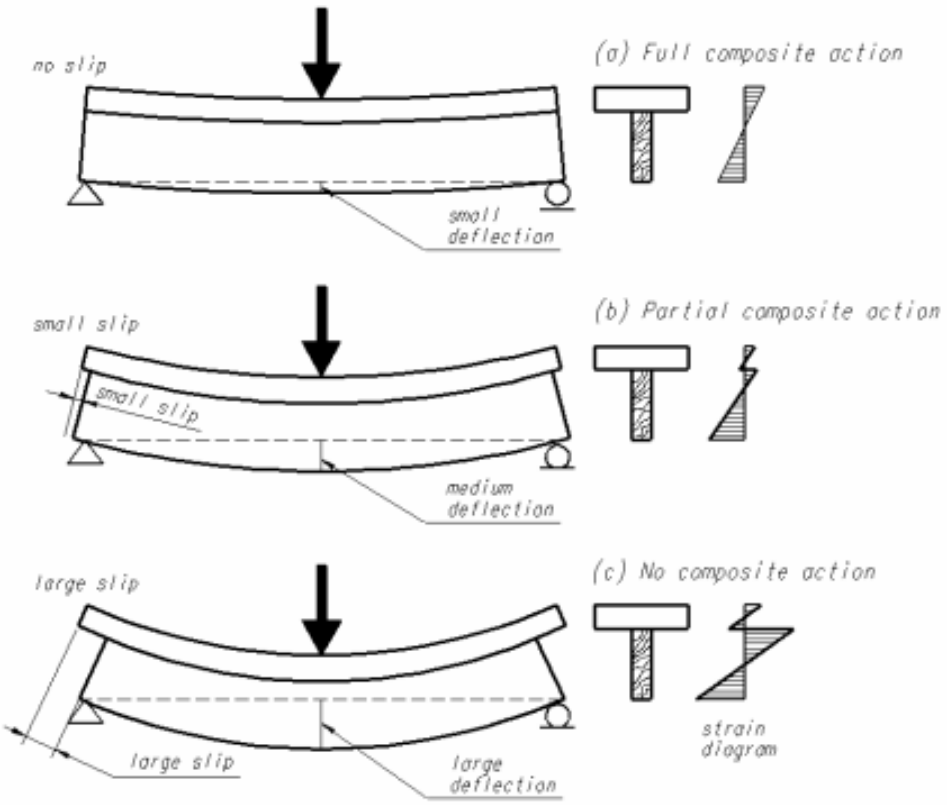
$$K_{eff} = 2K_s$$

Gdje su:

K_{eff} – proračunski modul klizanja za kompozite drvo – beton

K_s – početni modul klizanja u spojevima drvo – drvo

Na slici 6. su prikazana ponašanja poprečnog T-presjeka s obzirom na stupanj sprezanja: na gornjem prikazu je primjer ponašanja i raspodjela naprezanja po visini T – presjeka za kruto sprezanje, srednji je za podatljivo sprezanje, a donji za TC gredu izvedenu bez sprezanja.



Slika 6. Prikazi ponašanja greda različitog stupnja sprezanja i raspodjela naprezanja po visini T – presjeka [13]

Kompozitni, mehanički spregnuti presjeci drvo – beton su primjer podatljivog sprezanja, a sprezanje lijepljenjem upućuje na "idealno (potpuno)" krutu vezu s linearnom raspodjelom naprezanja po visini presjeka. U praksi je potpuno kruto sprezanje (lijepljenjem, "u mokro" ili "u suho"), sa 100 postotnim učinkom sprezanja neizgledno jer je popuštanje ljepila izvjesno bez obzira na izvedbu lijepljenja.

Učinak (stupanj) sprezanja se može odrediti primjenom sljedećeg izraza [9]:

$$Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{ef}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100 \quad (1)$$

Gdje su:

δ_{nc}- izmjereni/proračunani progib nespregnute grede proračunske krutosti na savijanje

δ_{ef}- izmjereni/proračunani progib podatljivo spregnute grede proračunske savojne krutosti

δ_{id}- izmjereni/proračunani progib idealno spregnute grede proračunske krutosti na savijanje

Ili drugačije, preko krutosti na savijanje, odnosno sljedećeg izraza [13]:

$$Učinak\ sprezanja = \frac{EI_{real} - EI_o}{EI_\infty - EI_o} \quad (2)$$

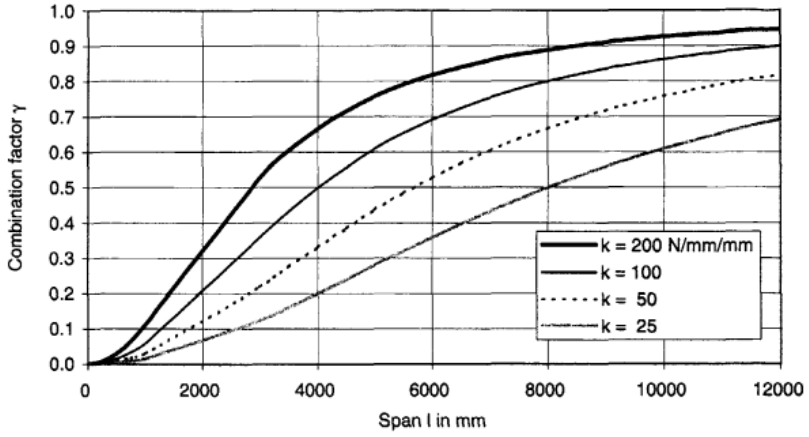
Gdje su:

EI_{real}- krutost na savijanje podatljivo spregnute grede (za koju se ocjenjuje učinak sprezanja)

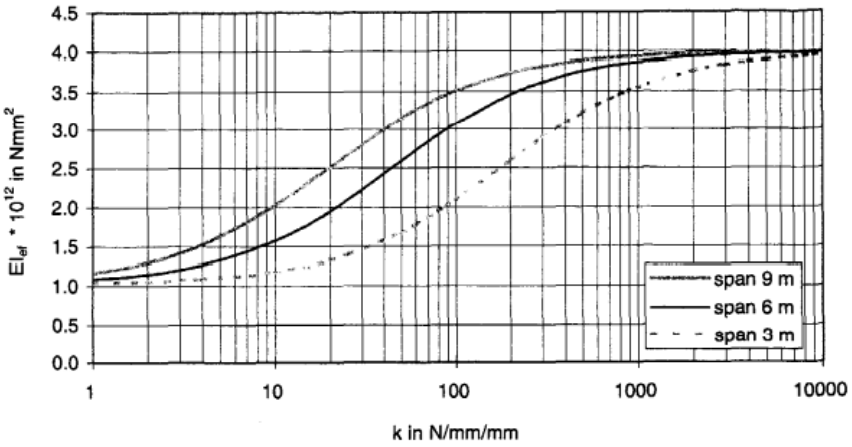
EI_o- krutost na savijanje nespregnute grede

EI_∞- krutost na savijanje idealno (potpuno) spregnute grede

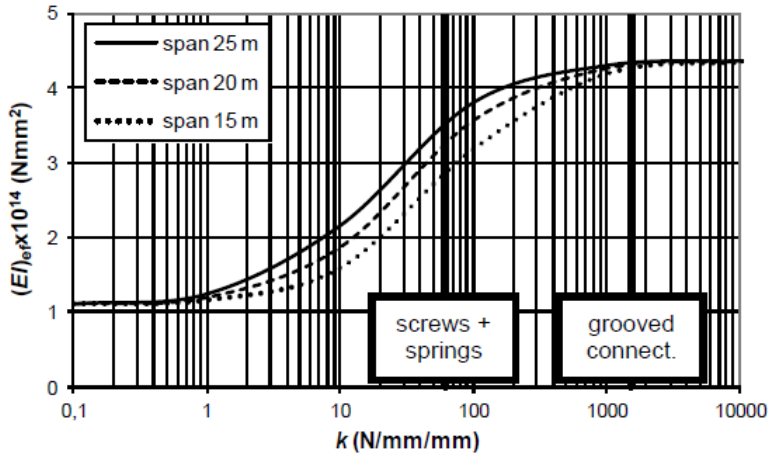
S porastom posmične krutosti spoja, proračunska krutost na savijanje TCC, $EI_{real} \rightarrow EI_\infty$, a γ – faktor jedničnoj vrijednosti (γ = 1 za 100 % ili puni učinak sprezanja) pa je razumljiv utjecaj izbora spojnih sredstava sprezanja (za istu kombinaciju materijala i geometrije dijelova presjeka). Međutim, na učinak sprezanja utječe i raspon kompozitne grede te raspored spajala (slika 7). Na slici 7, *k* (u N/mm/mm) predstavlja "razmazanu" vrijednost modula klizanja (po razmaku *s* spajala iste vrste na variranim rasponima), tj. posmičnu krutost veze. Za kraće raspone je faktor $\gamma \leq 0.3$, a za dulje raspone raste (kao i učinak / stupanj sprezanja) i s manjim brojem spajala (na većem razmaku). Utjecaj vrste i razmaka spajala na vrijednost γ faktora i stupnja sprezanja je posredno, preko proračunske krutosti na savijanje, prikazan i na slici 8. Iz prikaza je vidljiva nelinearna korelacija proračunske krutosti na savijanje TCC stropne grede i krutosti posmične veze dijelova T – presjeka. Na slici 9. je grafički prikaz korelacije ovih parametara za TCC grede mostova, ilustrativne zbog znatno većih raspona i opterećenja (prometna) u odnosu na stropne grede.



Slika 7. Odnos raspona TCC grede i γ faktora za variranu posmičnu krutost spoja [19]



Slika 8. Veza proračunske krutosti na savijanje i posmične krutosti spoja za varijacije raspona TC kompozitne stropne grede [18]



Slika 9. Veza proračunske krutosti na savijanje i posmične krutosti spoja za varijacije raspona TC kompozitne grede mosta [20]

2.2.3. Tiplogije sprezanja i spajala

Kriteriji tipološke podjele kompozita su način izvođenja (stupanj predgotovljenosti) i način sprezanja pri čemu ovaj drugi upućuje na vrstu spoja (spojnog sredstva) i pripadajući učinak (stupanj) sprezanja.

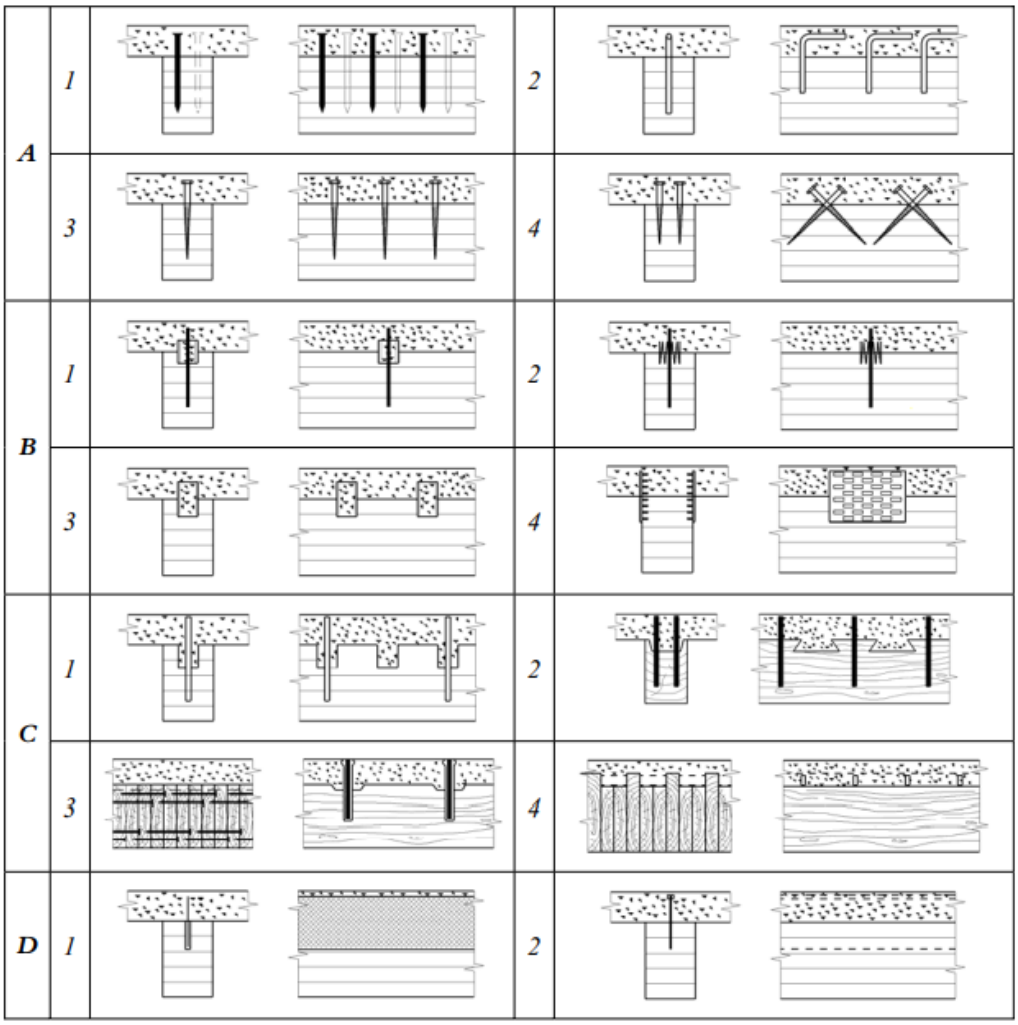
Prema načinu izvođenja, sprezanje se može izvoditi *in situ* (ugradnja spajala i betoniranje na gradilištu), kompozit može biti u cijelosti predgotovljen (tvornički izveden) ili kombinirano, primjenom npr. predgotovljenog betonskog dijela T – presjeka.

Prema kriteriju vrste spajala i stupnja sprezanja [3], [13]

- Diskretno sprezanje (mehanički, metalnim spajalima): tipa A (štapna spajala) i tipa B (pločasta spajala – moždanici)

- Sprezanje zasijecanjem, tipa C: kombinirano sa štapnim spajalima (ili bez njih, kombinirano samo s učinkom trenja)
- Kontinuirano sprezanje tipa D: ulijepljene čelične ploče (npr. trapezni ili perforirani limovi)
- Sprezanje lijepljenjem
- Ostali načini spajanja (inovativna mehanička spajala i patentirani sustavi sprezanja, sprezanje primjenom trenja, tzv. tzv. “plus – minus“ kompoziti i dr.)[1], [13]

Najveći stupanj sprezanja ostvaruje se lijepljenjem i može se smatrati krutim sprezanjem s učinkom koji se približava 100 postotnom (realno ponašanje ne ukazuje na idealnu krutost, s faktorom sprezanja $\gamma = 1$, ali je učinak sprezanja znatno viši od 90 %). Svi su ostali načini sprezanja manje ili više podatljivi, pri čemu se diskretnim sprezanjem ostvaruje najmanji učinak sprezanja (cca 50 %, ovisno o vrsti i rasporedu mehaničkih spajala), a za kontinuirane načine sprezanja (najmanje podatljivi) raste i do cca 85 % - 90 %. Na slici 10. prikazane su tipologije sprezanja (A – D) i primjeri spojnih sredstava koja se u takvim podatljivim kompozitima primjenjuju.



Legenda:

A: 1) čavli, 2) ulijepljene čelične armaturne šipke, 3) vijci za drvo, 4) križno ugrađeni vijci za drvo

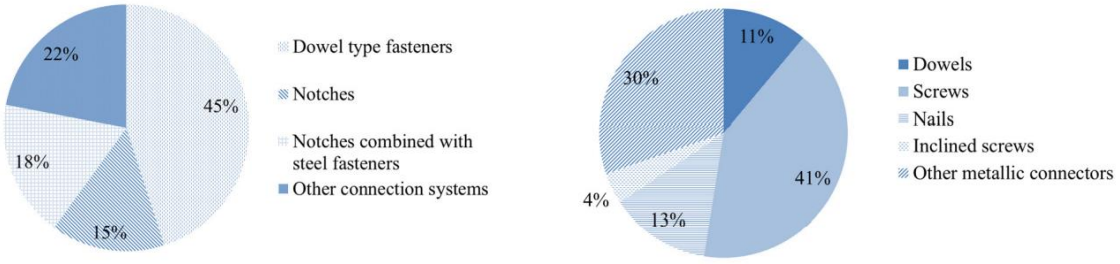
B: 1), 2) moždanici za drvo (rascijepljeni prsteni i nazubljene ploče), 3) čelične cijevi, 4) utisnute čelične ježaste ploče;

C (kombinirano zasijecanje, gredni i pločasti daščani drveni dijelovi TCC): 1), 2) kvadratni i trapezni utori sa štapnim spajalima za prevenciju odizanja, 3) kvadratni utori i prednapete čelične šipke, 4) čavlane daščane ploče i čelične posmične ploče urezane u dublje daske;

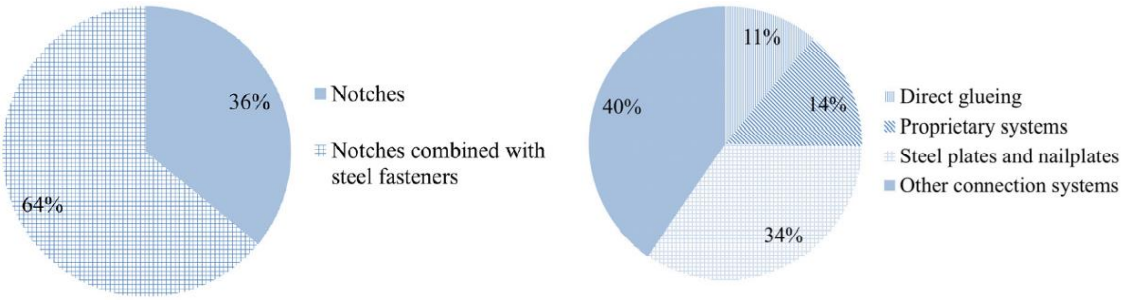
D (kontinuirano sprezanje): 1) ulijepljena rešetkasta čelična ploča, 2) ulijepljena čelična ploča
Slika 10. Primjeri tipologija sprezanja i spojnih sredstava u TC kompozitima [3], [13]

S obzirom da su način sprezanja i posmična krutost veze presudne za ostvarenje stupnja sprezanja i ponašanje kompozita, od ranih 40-ih godina 20. stoljeća (najraniji primjeri primjene TC kompozita) su provedena brojna istraživanja fokusirana na sustave spajanja, a u literaturi se može pronaći i statistička baza učestalosti primjene pojedinog sustava u provedenim istraživanjima.[1] Pregledan prikaz je dan na slikama 11. i 12. Vidljivo je da istraživanjima sustava s primjenom štapnih metalnih spajala

prevladavaju ona s vijcima za drvo čija visoka osna nosivost ima povoljan učinak na posmičnu krutost veze u kompozitu.



Slika 11. Statistički prikazi zastupljenosti tipologija podatljivog sprezanja (lijevo) i vrste mehaničkih metalnih spajala (desno) u provedenim istraživanjima [1]



Slika 12. Statistički prikazi zastupljenosti tipologija sprezanja zasijecanjem (lijevo) i ostalih tipologija sprezanja (desno) u provedenim istraživanjima [1]

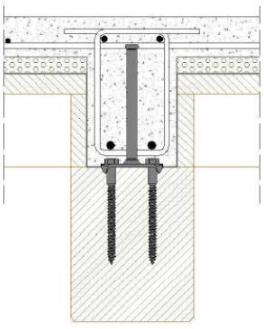
Sprezanje zasijecanjem se može izvoditi bušenjem ili zarezivanjem drvenog dijela TC kompozita ili lijepljenjem drvenih blokova na konstrukcijski drveni element pri čemu su prve dvije opcije jednostavnije i ekonomičnije. Prednost sprezanja zasijecanjem jest vrlo povoljan balans između jednostavnosti izvedbe i mehaničkih svojstava (krutost kompozita), ali ima i nedostatke – sklonost krtom lomu i nizak prag osne nosivosti spoja. Ove nedostatke je moguće prevladati dodatkom čeličnih štapnih spajala koji doprinose duktilnosti spoja, a ovisno o konfiguraciji kompozita i zasjeka, dodatno štapno spajala može samo nadopuniti mehaničko svojstvo (npr. osnu nosivosti spoja) ili biti komponenta nadgradnje posmične i osne nosivosti (prevencije odizanja).[13], [19]

Ostale tipologije sprezanja su raznovrsne (slika 12, desno): 1) lijepljenje; 2) patentirani sustavi spajanja; 3) primjena čavlanih ploča i drugih pločastih spajala (diskretno sprezanje tipa B) te čeličnih ploča (kontinuirano sprezanje tipa D) i 4) ostale sustave spajanja, između kojih su oni na osnovi isključivo trenja te brojni drugi inovativni sustavi

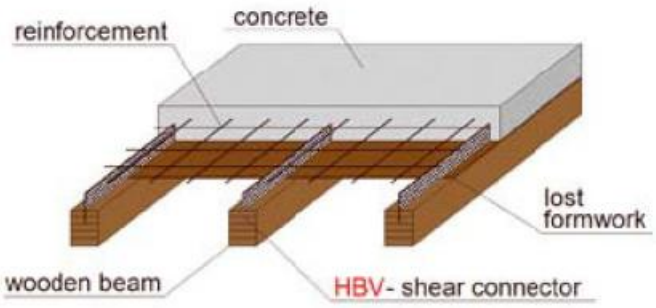
koji nisu patentirani (jer su rezultat istraživanja i u fazi razvoja) i za sada nemaju širu praktičnu primjenu.

Ad 1) Vezano za lijepljene TC kompozite, unatoč najvišem učinku sprezanja i jednostavnosti proračuna zbog jednolike raspodjele posmičnih sila po duljini spoja te izostanka lokalne koncentracije naprezanja, praktična primjena ovakvih kompozita ima sljedeća ograničenja: ponašanje pod dugotrajnim opterećenjem (popuštanje ljepila je najveća zapreka širenju primjene) te kontrola kvalitete izvedbe na gradilištu.

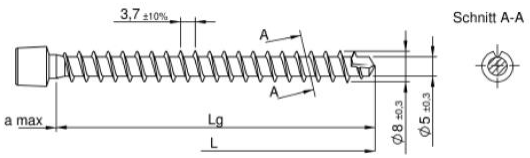
Ad 2) Patentirani sustavi sprezanja nisu obuhvaćeni standardizacijom (norme), ali imaju europsko tehničko odobrenje primjene (ETA), tj. certifikat izdan od strane za to ovlaštenog tijela temeljem dvostrukog sustava kontrole deklariranih tehničkih svojstva (proizvođač, ovlaštena vanjska institucija). Neke osnovne informacije i parametri koje mora sadržavati tehničko odobrenje za primjenu su: relevantne norme, opterećenje (tip), rang primjene, tehnička svojstva materijala (drvo, beton), razred uporabe, određivanje proračunskih sila, parametri, proračun na djelovanje požara, te izvedba.[4], [13] Patentirani sustavi sprezanja se uglavnom referiraju na primjenu inovativnih spajala, a primjeri su prikazani na slici 13.



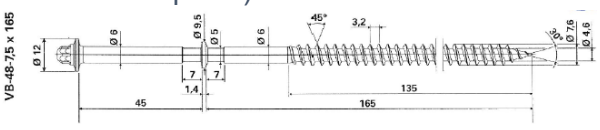
TECNARIA moždanik



HBV moždanik (ulijepljene utisnute perforirane čelične ploče)



ASSY plus VG vijak za drvo

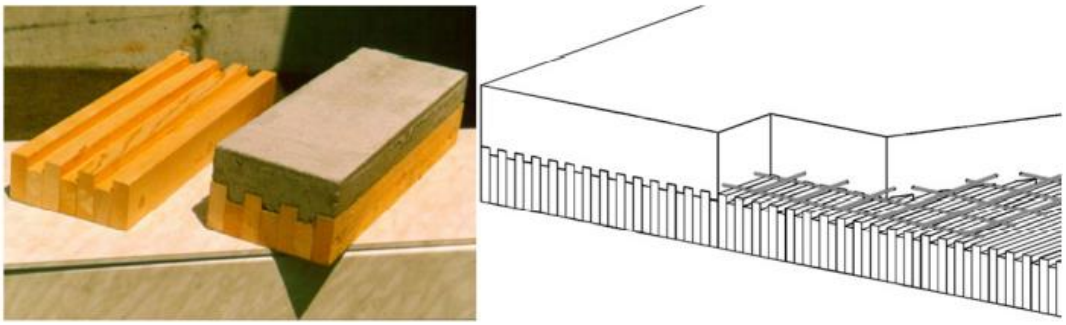


SFS VB vijci za drvo

Slika 13. Primjeri patentiranih sustava sprezanja i spajala [1]

Ad 3) Jedan od inovativnih načina spojeva je sustav “Plus – Minus“ koji se temelji na trenju između dva materijala i prikazan je na slici 14. Ovaj sistem nije patentiran, ali je korišten u brojnim projektima u prethodnih 20-ak godina. Drveni dio presjeka je sklop

od sjekomice položenih dasaka naizmjenično varirane širine (visine) i mehanički povezanih trnovima, a betonski je armiran radi prevencije skupljanja. Tehnička specifikacija sadrži tablični izračun (dostupan korisnicima) i prema kojem se kompozit proračunava kao idealno krut (100 postotni učinak sprezanja). U tipičnoj stropnoj ploči raspona 6,5 m, visina betonskog dijela TCC je 120 mm, a drvenog 140 mm.[1]



Slika 14. Plus – minus sistem [1]

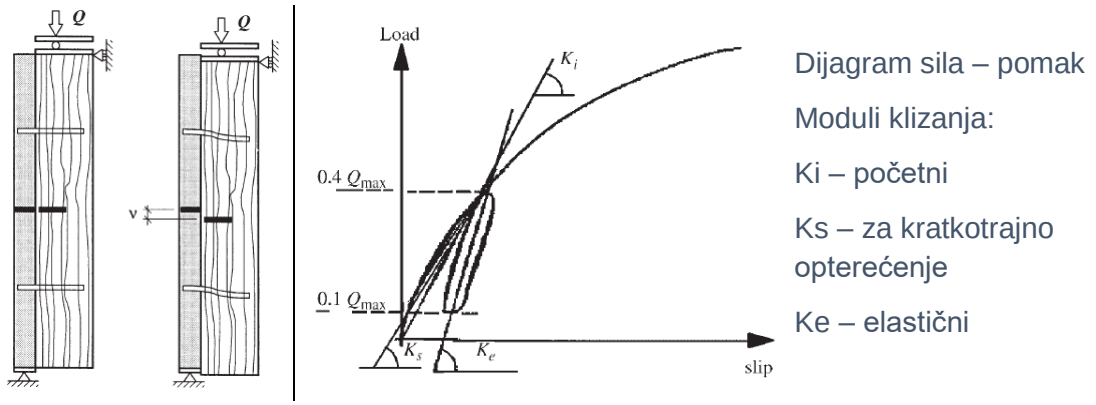
2.2.4. Mehanička svojstva i ponašanje spoja

Najvažniji indikatori ostvarivanja stupnja (učinka) sprezanja su mehanička svojstva spoja: čvrstoća i krutost. Duktilnost spoja konstitutivnih dijelova (materijala) je bitan indikator ponašanja TCC i ne smije se zanemariti – značajno utječe na nosivost i deformabilnost kompozita jer je ključna za prevenciju krtog loma i raspodjelu sila. Mehanička svojstva spoja se pouzdano mogu odrediti jedino iz rezultata ispitivanja (posmične probe), a numeričkim modelima se ona rijetko kada mogu predvidjeti s dostatnom sigurnošću.

Čvrstoću spoja definira najveća posmična sila na dodirnoj površini drva i betona pri čemu granični pomak u spoju (klizanje) iznosi 15 mm (prema normi HRN EN 26891) što upućuje na povezanost razine opterećenja i krutosti spoja. Krutost spoja (posmičnu) definira modul klizanja (HRN EN 26891), a kako ona utječe na proračunsku krutost na savijanje i deformiranje TC kompozita, unutrašnje sile i raspodjelu opterećenja u cijeloj konstrukciji, ima važan utjecaj i na provjere graničnih stanja (nosivosti i uporabljivosti, GSN i GSU).

Ponašanje spojeva može varirati između vrlo krutih, a malo duktilnih, do vrlo fleksibilnih i duktilnih, ovisno o izboru spajala i konfiguraciji spoja.[21] Primjer su spojevi drvo – beton sa čeličnim spajalima koji se duktilno ponašaju, a suprotnost su im zasječeni

spojevi, skloni krtom lomu. Iako duktilnost spoja načelno povećava nosivost i krutost TC kompozita, ona nije jamstvo duktilnog ponašanja kompozita – ako je krutost spoja veća od predviđene, drveni dio kompozita može dostići lomnu čvrstoću iako se spoj ponaša elastično, a ponašanje kompozita zato je manje duktilno od očekivanog (slika 15).[21], [22]



Slika 15. Model postavki ispitivanja (posmična proba, lijevo) i dijagram sila – pomak [21]

2.2.5. Mehanička svojstva i ponašanje kratkotrajno opterećenih podatljivih kompozita

Mehanizam ponašanja podatljivog kompozita može se jednostavno objasniti na primjeru slobodno oslonjene grede izložene savijanju: između konstitutivnih dijelova TCC dolazi do pojave klizanja pri čemu je relativno klizanje najveće na krajevima simetričnog sustava, a nulte vrijednosti u sredini (slika 16.a). Posljedica takvog ponašanja jest ta da se klasična gredna teorija ne može izravno primijeniti bez intervencije kojom se klizanje uzima u obzir.

U opterećenoj gredi se razvija sustav sila Q koje predstavljaju bočno opterećenje spajala i tangencijalne su na kontaktnu ravninu dijelova kompozita, a na poziciji svakog spajala ovise o pomaku u spoju, v (klizanje) i modulu klizanja, K (slika 16.b). U smjeru uzdužne osi grede, sile Q na taj način uravnotežuju unutrašnje sile u svakom dijelu kompozita (osne sile, N_i – tlačna sila, N_1 u težištu betonskog dijela i vlačna, N_2 u težištu drvenog dijela T – presjeka) na način koji odgovara deformiranju sustava (sile Q su najveće na krajevima, a nulte vrijednosti u sredini; osne sile N_i su najveće u sredini grede, a nultog intenziteta na krajevima). Osne sile N_i tvore unutrašnji spreg sila koji ovisi o posmičnoj krutosti spajala (nulte su vrijednosti ako dijelovi kompozita nisu niti

spojeni) pa ukupni unutrašnji moment savijanja predstavlja sumu momenta savijanja u svakom dijelu kompozita, M_i (M_1 + M_2) uvećanu za doprinos sprega unutrašnjih osnih sila (N_r), kako je i prikazano na slici 16.b):

$$N_1 = N_1 = N \qquad\qquad M = M_1 + M_2 + Nr$$

Posljedična raspodjela relativnih deformacija i normalnih naprezanja u podatljivo spojenom T-presjeku je prikazana na slici 16.c). Iz je je vidljivo da s porastom krutosti spoja rastu osne sile N_i, a smanjuju se vrijednosti lokalnih momenata savijanja, M_i, odnosno, porast krutosti spoja umanjuje progib grede (tj. radijuse zakrivljenosti dijelova deformiranog kompozita).

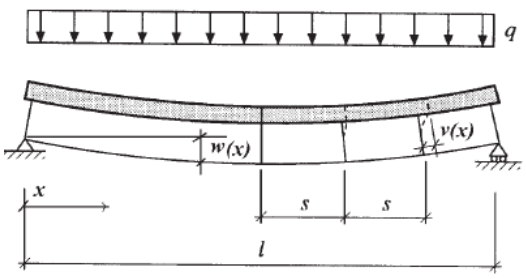
Sila Q predstavlja bočno opterećenje svakog spajala koje rezultira pomakom (klizanje) v, pri čemu se modul klizanja K određuje ispitivanjem (posmična proba):

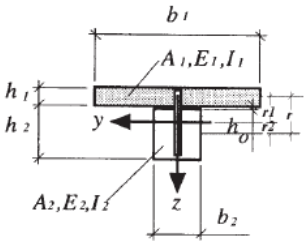
$$Q = Kv \text{ [N]}$$

Pretpostavi li se da su spajala jednoliko raspoređena na razmacima s, analiza se može provesti s “razmazanim“ modulom klizanja, ravnomjernim po duljini grede:

$$k = K/s \text{ [N/mm/mm]}$$

Takva pretpostavka omogućava da se zanemare posmične deformacija svakog sloja, a ponašanje sustava smatra linearno-elastičnim te su moguća zatvorena rješenja za predviđanje raspodjele unutrašnjih sila Q i Ni, savojne krutosti i naprezanja u dijelovima kompozita.





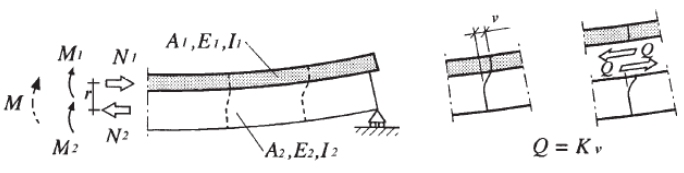
T-presjek

Legenda:

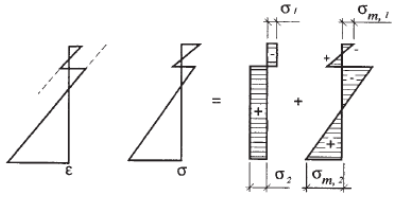
1 betonski dio

2 drveni hrbat

a) Ponašanje podatljivog kompozita drvo – beton i uloga mehaničkih spajala



b) Raspodjela unutrašnjih sila i posmična ravnina spoja



c) Relativne deformacije i naprezanja

Slika 16. Mehanički model i ponašanje podatljivog kompozita drvo – beton [21]

2.2.6. Normizacija

Trenutno je u izradi tehnička specifikacija TS 1995 – 3: Projektiranje spregnutih konstrukcija drvo – beton – opća pravila i pravila za zgrade, prethodnica trećeg dijela predstojećeg izdanja norme niza EN 1995., a područje primjene općih pravila su i konstrukcije mostova.[7]

Projektiranje kompozita i norme:

- HRN EN 1995-1-1: 2013 Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1 – 1: Općenito – Opća pravila i pravila za zgrade
- HRN EN 1995-2: 2013 Projektiranje drvenih konstrukcija – 2. dio: Mostovi
- HRN EN 1992-1-1: 2013 Projektiranje betonskih konstrukcija – Dio 1 – 1: Opća pravila i pravila za zgrade
- HRN EN 1990: 2011 Osnove projektiranja konstrukcija
- HRN EN 1991-1-(1 – 7): 2012 Opća djelovanja

Prateće norme za ispitivanje i zahtjeve na građevinske proizvode:

- HRN EN 301: 2017 Fenolni i aminoplastični adhezivi za nosive drvene konstrukcije – Klasifikacija i zahtjevi izvedbe

Norme za određivanje nosivosti spajala i krutosti spojeva (modul klizanja, K_s i K_u):

- HRN EN 1380:2009 Drvene konstrukcije – Metode ispitivanja – Nosivost čavala, vijaka za drvo, moždanika i vijaka
- HRN EN 26891:2006 Drvene konstrukcije – Spojevi izrađeni mehaničkim spajalima – Opća načela za određivanje čvrstoće i deformacijskih svojstava
- HRN EN 12512:2006 Drvene konstrukcije – Metode ispitivanja – Ciklično ispitivanje spojeva izrađenih mehaničkim spajalima
- EN 13271:2001 Spajala za drvo – karakteristična nosivost i modul klizanja u spojevima

Norma za određivanje mehaničkih svojstava laboratorijskim testovima velikih uzoraka:

- HRN EN 408:2010 Drvene konstrukcije – Konstrukcijsko i lijepljeno lamelirano drvo – određivanje nekih fizičkih i mehaničkih svojstava

2.3. Određivanje mehaničkih svojstava spojeva

Krutost spoja koja je izražava preko modula klizanja K_s (simbol naveden u normi EN 26891) i opisuje pomak između opterećenih spojenih elemenata, utječe na proračun oba granična stanja. U proračunu graničnog stanja uporabljivosti, s pretpostavkom linearnog ponašanja spoja, primjenjuje se srednja vrijednost modula klizanja koja se određuje ili eksperimentalno ili kao dvostruka vrijednost modula klizanja K_s koji je za spojeve drvo – drvo sa štapnim spajalima i moždanicima naveden u normi HRN EN 1995-1-1 (*Tablica 1*).

Tablica 1. Eurokod model za određivanje modula klizanja K_s za spojeve drvo – drvo [5]

TIP SPAJALA	Ks
Trnovi	$\rho_m^{1,5} d/23$
Vijci sa slobodnim razmakom ili bez njega*	
Vijci za drvo	
Čavli (s predbušenjem)	
Čavli (bez predbušenja)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Skobe	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$
Prstenasti moždanici tipa A u skladu s normom EN 912	$\rho_m d_c/2$
Glatki pločasti moždanici tipa B u skladu s normom EN 912	
Nazubljeni pločasti moždanici	$1{,}5\rho_m d_c/4$
a) Moždanici tipova od C1 do C9 u skladu s normom EN 912	$\rho_m d_c/2$
b) Moždanici tipova od C10 do C11 u skladu s normom EN 912	
* Slobodni razmak treba posebno dodati deformiranju	

Simboli: ρ_m - srednja gustoća drva [kg/m3]; d i d_c - proimjeri štapnog spajala

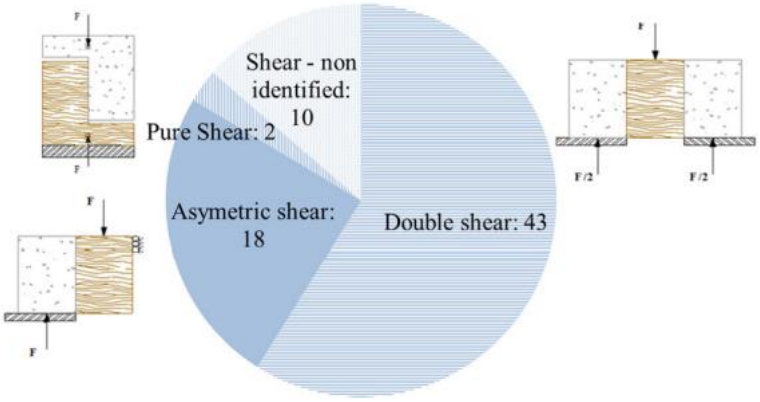
U proračunu graničnog stanja nosivosti, s pretpostavkom smanjene krutosti treba usvojiti sljedeću vrijednost modula klizanja:

$$K_u = \frac{2K_s}{3}$$

U nastavku su opisane metode koji se mogu koristiti za određivanje svojstva spojeva TCC, razvrstane na eksperimentalne metode i metode zasnovane na proračunu (analitički modeli).

2.3.1. Eksperimentalne metode

Najčešći način određivanja nosivosti i deformabilnosti spojeva je eksperimentalni, a ispitivanje malih uzoraka (posmične probe) provodi se testom “čistog“ posmika, dvostrukog tzv. “push out“ testa ili asimetričnog, jednostrukog „push out“ testa. Na slici 17. je prikazana zastupljenost određenog ispitivanja u dosadašnjoj literaturi. Uspoređivanjem numeričkih i eksperimentalnih rezultata s različitim postavkama testa nisu ustanovljene razlike značajne za inženjersku primjenu, ali je propitivana primjenjivost rezultata u ispitivanjima velikih uzoraka (greda).[1]



Slika 17. Zastupljenost ispitivanja u odnosu na cjelokupnu literaturu [1]

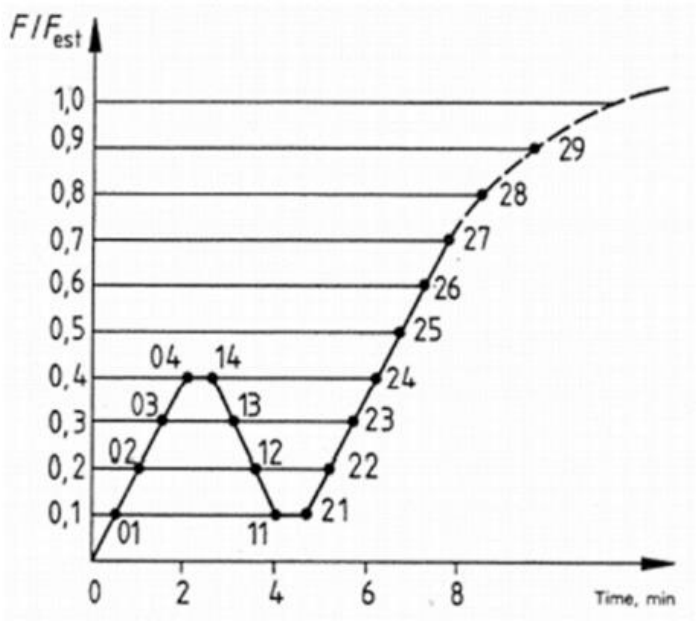
Protokol ispitivanja prema normi HRN EN 26891

HRN EN 26891 je norma izvorno namijenjena ispitivanju mehaničkih svojstava spojeva drvo – drvo, ali se (u nedostatku prikladnije) primjenjuje i za spojeve drvo – beton. Postupci nanošenja opterećenja su definirani prema početo određenom i odranije poznatom najvećem opterećenju F_{est} koje je izračunano ili preuzeto iz preliminarnih testova. Prema protokolu, 40 % te sile (40 % F_{est}) se nanosi konstantnim prirastom od 20 % opterećenja (20 % F_{est}) po minuti te zadržava 30 sekundi. Nakon toga se sila smanjuje na 10 % vrijednosti (10 % F_{est}) (konstantno smanjenje, poput prirasta pri nanošenju sile) i također zadržava 30 sekundi. Nakon se sila opet nanosi istim prirastom do 70 % opterećenja (70 % F_{est}). Nakon toga, test završava kada se dosegne najveće opterećenje (lomna sila) ili pomak (klizanje) od 15 mm. Na slici 18. je grafički prikaz prethodno napisanog procesa nanošenja opterećenja. Pomaci moraju biti zabilježeni u posebnim točkama kako bi se dobio graf prikazan na slici 19. koji služi za

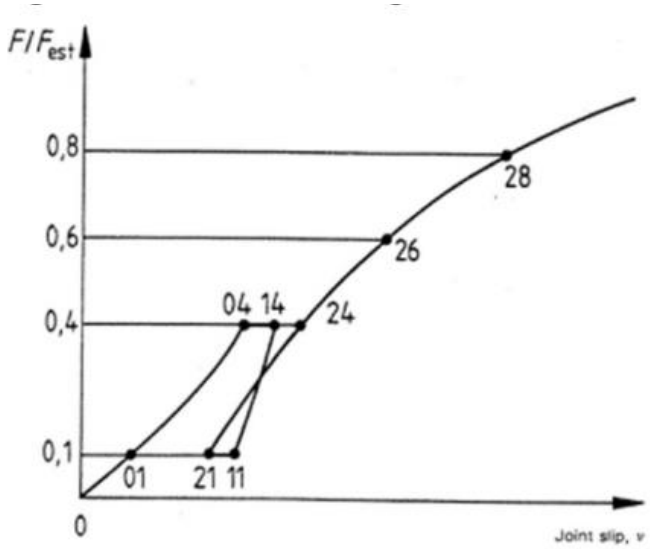
određivanje svojstava spoja. Modul klizanja spoja se određuje kao funkcija pomaka u točki 01 i 04 zajedno s odabranim maksimalnim opterećenjem ili prema formulama:

GSU → $$K_s = \frac{0.4 \cdot F_{est}}{\frac{4}{3} \cdot (v_{04} - v_{01})} \quad (3)$$

GSN → $$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_s \quad (4)$$



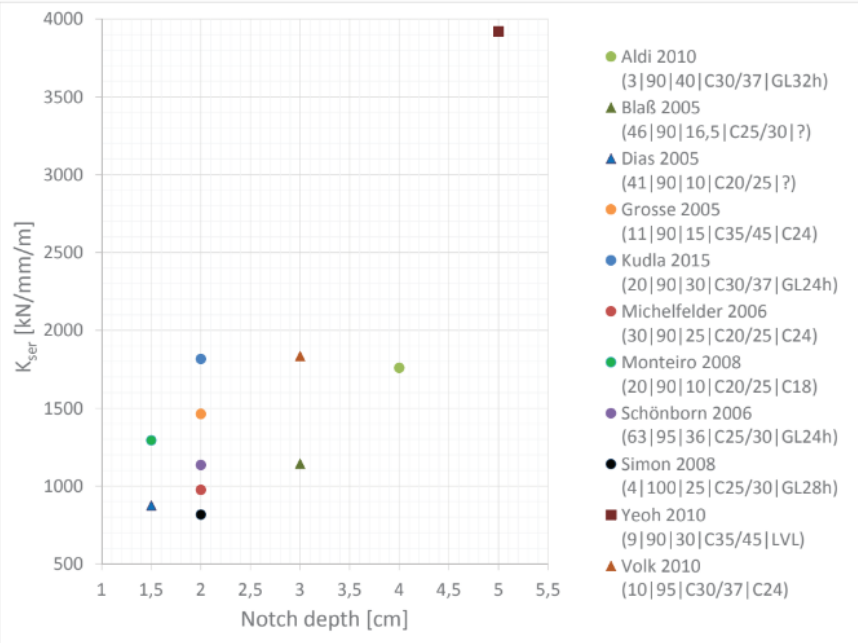
Slika 18. Postupak nanošenja opterećenja prema HRN EN 26891 [17]



Slika 19. Prikaz idealizirane krivulje opterećenje – pomak [17]

Nedostatci primjene eksperimentalnih metoda u određivanje mehaničkih svojstava spoja

Procedura dana u normi HRN EN 26891 ima i ograničenja koja mogu utjecati na rezultate, a ona uglavnom proizlaze iz kombinacije dva bitna faktora: a) nelinearnog ponašanja spoja (odnos sila – pomak) i b) određivanju mehaničkih svojstava (modula klizanja) na osnovi procjene najvećeg opterećenja koje može i do 20 % odstupati od stvarnoga.[18][18] Nelinearno ponašanje je karakteristično za spojeve sa štapnim spajalima u kojima se registrira čak i u početnoj fazi (postoji i inicijalni pomak pri nalijeganju spajala u rupu). Lijepljeni i zasječeni spojevi imaju linearnije ponašanje (manje su duktilni, lom je prevladavajuće krt) pa je ova metoda za njih pogodnija. U zasječenim spojevima modul klizanja ovisi o geometriji zasjeka (prvenstveno o dubini, donekle i o obliku) te mehaničkim karakteristikama konstitutivnih materijala. Na slici 20. su pregledno prikazani rezultati provedenih ispitivanja zasječenih spojeva, preuzeti iz literature [8], [23]. Iz priloženog dijagrama se može zaključiti da se s dubinom zasjeka povećava i modul klizanja. U legendi su navedeni i ostali bitni parametri: broj ispitivanja, kut nagiba i duljina zasjeka te čvrstoće betona i drva.



Slika 20. Pregled rezultata ispitivanja – utjecaj dubine zasjeka na modul klizanja [8], [23]

Tablica 2. Pregled rezultata ispitivanja (izvor: Alfredo M. P. G. Dias, 2005.) [18]

Uzorci (posmične probe)			Maks. Opt, F_{max} [kN]	K_s [kN/mm]
R.br.	Naziv	Opis		
Spajala - glatke armaturne šipke ϕ8 i ϕ10 mm (čelik S500)				
1)	10mmA	Spajalo - 10 mm čelična armaturna glatka šipka LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - normalne čvrstoće C25/30	22,6	15,2
2)	HSC	Spajalo - 10 mm čelična armaturna glatka šipka LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - beton velike čvrstoće C50/60	23,6	13,8
3)	LWAC	Spajalo - 10 mm čelična armaturna glatka šipka LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - lagani beton LC16/18-D1,6	18,5	14,5
4)	C	Spajalo - 10 mm čelična armaturna glatka šipka CD (cjelovito drvo) - kesten Beton - normalne čvrstoće C25/30	26,2	30,5
5)	MP	Spajalo - 10 mm čelična armaturna glatka šipka CD (cjelovito drvo) - pomorski bor Beton - normalne čvrstoće C25/30	25,5	24,4
6)	8mm	Spajalo - 8 mm čelična armaturna glatka šipka LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - normalne čvrstoće C25/30	13,6	11,5
Spajala - profilirane armaturne šipke ϕ10 mm (čelik S500)				
7)	10mmB	Spajalo - 10 mm čelična armaturna profilirana šipka (2*1 pos.ravn) LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - normalne čvrstoće C30/37	68,6	34,2
8)	INT	Spajalo - 10 mm čelična armaturna profilirana šipka (2*1 pos.ravn) LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - normalne čvrstoće C30/37 Međusloj - 20mm	63,3	22,3
Zasječeni spojevi izvedeni blokovima od LVL i CD hrasta zaljepljenim na dvreni dio kompozita				
9)	ON	Spajalo - zasjeci 100*100*15 CD - hrast crnika Beton - normalne čvrstoće C30/37	59,5	175,2
10)	dvwN	Spajalo - zasjeci 100*100*15 LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - normalna čvrstoća C30/37	138,6	304,8
11)	dvwNI	Spajalo - zasjeci od gušćeg funira 100*100*35 LLD - lijepljena lamelirana smreka Beton - normalne čvrstoće C30/37 Međusloj (drvena oplata) - 20mm	116,2	199,9

U tablici 2. su prikazana svojstva ispitanih uzoraka i dobiveni rezultati za spojeve sa štapnim spajalima (armaturne šipke od čelika S500) i zasječene spojeve, izvedene lijepljenjem blokova od LVL-a i drva hrasta.[18] U tablici 3. su prikazani rezultati ispitivanja [2], [9], [24] koja su se uglavnom bavila zasječenim spojevima LVL – beton s ili bez dodatnih vijaka za drvo.

Tablica 3. Pregled rezultata ispitivanja zasječenih spojeva LVL – beton (D. Yeoh, 2010.) [9]

Uzorci (posmične probe)			Maks. Opt, F_{max} [kN]	K_s [kN/mm]
R.br.	Naziv	Opis		
1)	A1	Spajalo - pravokutni zasjek 150*50*63 + vijak za drvo ϕ16 LVL - lamelirano furnir drvo Beton	73	80,2
2)	A3	Spajalo - pravokutni zasjek 150*25*63 + vijak za drvo ϕ16 LVL - lamelirano furnir drvo Beton	71,8	113
3)	B1	Spajalo - pravokutni zasjek 150*50*63 LVL - lamelirano furnir drvo Beton	48,3	105
4)	D1	Spajalo - zasjek s koism rubovima 150*50*63 LVL - lamelirano furnir drvo Beton	20,5	51,1
5)	E1	Spajalo - trokutni zasjek (kutevi 30 i 60 stupnnjeva) 137*60*63 LVL - lamelirano furnir drvo Beton	40,2	101
6)	R1	Spajalo - vijak za drvo ϕ16 LVL - lamelirano furnir drvo Beton	46,44	28,9

2.3.2. Metode zasnovane na proračunu

Pregled podjele podatljivih TCC u 4 tipološke skupine (slika 10) upućuje na raznovrsnost mogućih načina sprezanja, konfiguracije kompozita i izbora spajala čak i unutar pojedine skupine te je razumljivo zašto je eksperimentalna metoda utvrđivanja mehaničkih svojstava spoja najprikladniji izbor. Međutim, raznovrsnost istovremeno otežava usporedbu rezultata ispitivanja, provedbu sveobuhvatne analize i razvoj modela, prikladnog za neku tipologiju. Metode zasnovane na proračunu su analitičke i numeričke (KE metode), a očekivani rezultati (modeli) služe za procjenu ponašanja spoja (linearno elastično, nelinearno) i njegovih mehaničkih svojstava (nosivost i krutost), te određivanje funkcije sila – pomak.

Analiza do sada provedenih istraživanja i konsolidacija rezultata su omogućile da se za spojeve sa štapastim spajalima i zasječene spojeve izrade analitički modeli za određivanje mehaničkih svojstava (točke 2.3.2.1 i 2.3.2.2). Dodatno, za neke tipove spojeva su razvijeni i teorijski modeli sila – pomak (točka 2.3.2.4) prilagođeni rezultatima testova, a matematičke funkcije se zasnivaju na metodi najmanjih kvadrata. Ovi su analitički modeli deskriptivni (variraju se parametri određeni ispitivanjem), dok su numerički (KE) modeli prediktivni, primjenjivi za predviđanje ponašanja spoja, s ugrađenim mehaničkim svojstvima spoja.

2.3.2.1. Spojevi sa štapastim spajalima

Analitički modeli razvijeni za spojeve drvo – drvo izvedene štapnim spajalima i navedeni u normi HRN EN 1995-1-1, mogu se uz prilagodbu parametara primijeniti i za spojeve drvo – beton.[23] Prilagodba se odnosi na izmjenu vrijednosti modula klizanja, pri čemu u spojevima drvo – beton i drvo – čelik treba primijeniti dvostruku vrijednost modula klizanja K_S iz Tablice 1, proračunanu sa srednjom vrijednosti gustoće drvenog dijela spoja ρ_m.

Istraživanja su potvrdila da je takav analitički model prihvatljiv jer uzima u obzir da su beton i čelik materijali veće gustoće od drva. Usporedbe s rezultatima ispitivanja za nosivost spoja su pokazale da:

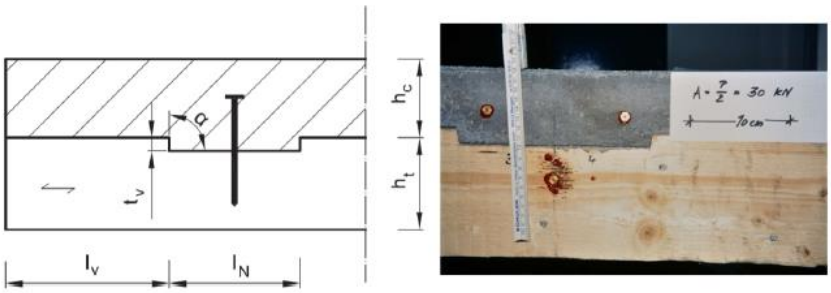
a) gustoća drvenog dijela kompozita znatno utječe na nosivost spoja
b) razvijeni model podcjenjuje nosivost spoja koja raste s tlačnom čvrstoćom betona
c) nelinearno ponašanje betona (elastično – idealno plastični, linearno – elastični i linearno – elastični model sa slomom u betonu) najbolje opisuje linearno – elastični materijalni model prikladan za spojeve drvo – debela čelična ploča (ugrađen u normu EN 1995-1-1) jer otkazivanje nosivosti spoja tako ovisi samo o čvrstoći po oplošju rupe spajala u drvu i karakteristikama spajala (slom plastifikacijom, s dva plastična zgloba, slika 16.b).[18], [25]

U procjeni svojstva krutosti spoja, su razmatrana dva modela: 1) analitički model zasnovan na gredi na elastičnoj podlozi i 2) empirijski model zasnovan na rezultatima testova spojeva drvo – drvo, s udvostručenim K_S za TC kompozite, prema normi EN 1995-1-1. Usporedbe s rezultatima ispitivanja za krutost spoja drvo – beton su pokazale da:

a) analitički model u kojem se razmatraju dva modela ponašanja betona (kruto i elastično) precjenjuje rezultate dobivene ispitivanjem, a za praktičnu primjenu nije prikladan i zato što zahtijeva poznavanje modula elastičnosti i drva i betona,
b) empirijski model prema Eurokodu 5, zasnovan samo na gustoći drva bolje procjenjuje modul klizanja iako zanemarivanje deformiranja betona, neovisno o tipu betona, ima utjecaj na rezultat (greške).[18], [26]

2.3.2.2. Zasječeni spojevi

Za razliku od spojeva sa štapastim spajalima čija mehanička svojstva ovise o duktilnosti spajala, zasječeni spojevi se ponašaju linearno i lom je prevladavajuće krt, geometrija spoja izrazito bitna (Slika 21.), a duktilnost se u određenoj mjeri može postići ugradnjom dodatnog štapnog spajala (obično vijak za drvo).[8], [9]



Slika 21. Geometrijski parametri u analizi tipičnih zasječenih spojeva [1], [8]

Za razliku od norme niza EN 1995:2004, tehnička specifikacija TS 1995-3 sadrži preporuke za primjenu i proračun ovih spojeva te navodi ograničenja za svojstva materijala, geometriju zasjeka (duljinu, l_N i dubinu, t_v), duljinu drvenog dijela kompozita na čelu zasjeka, l_v i promjer spajala (osno opterećeno, prevencija odizanja).[8] Najmanji razredi čvrstoće za konstitutivne materijale su C20/25 (beton) te GL24h i C24 (za lamelirano i cjelovito drvo), a promjer spajala $d \geq 8$ mm. Geometrija spoja mora zadovoljiti sljedeće uvjete: $l_N \geq 150$ mm; $t_v \geq 20$ mm (zgrade) i $t_v \geq 50$ mm (mostovi), a $l_v \geq 8\ t_v$.[8] Na temelju sveobuhvatne analize provedenih istraživanja nosivosti spoja [8], [27], [28] , izdvojeni su i analizirani sljedeći karakteristični mehanizmi sloma [8].

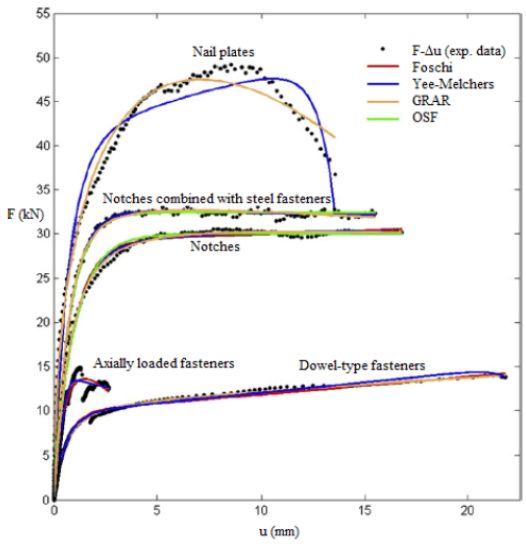
- Uzdužni posmični slom u drvu
- Tlačni slom paralelno s vlakancima u drvu
- Posmični slom u betonu
- Tlačni slom u betonu.

Konsolidacija rezultata provedenih istraživanja krutosti spoja je potvrdila da krivulje sila – pomak (rezultati push-out testova posmičnih proba) upućuju na konstantnu krutost do sloma, pa je preporuka da se proračun za oba granična stanja provede s modulom klizanja $K_s = K_u$ i sa sljedećim vrijednostima po metru dužnom grede:

- K_s = 1000 kN/mm, za zasjeke s 20 mm $\leq t_v \leq$ 30 mm,
- K_s = 1500 kN/mm, za zasjeke s $t_v >$ 30 mm.

2.3.2.3. Modeli sila – pomak

Pristup koji pretpostavlja linearno-elastično ponašanje je uobičajen jer uzima u obzir samo mehanička svojstva nosivosti i krutosti spoja te time pojednostavnjuje analizu i proračun TC kompozita. Zanemarujući time stvarno, nelinearno ponašanje spoja, pogreške u rezultatima analize mogu biti značajne.[29], [30] Poboljšanja su moguća primjenom KE modela s ugrađenim matematičkim modelima krivulja opterećenje – pomak. Ovi razvijeni matematički modeli su prilagođeni rezultatima ispitivanja, uzimaju u obzir relativno mali broj parametara i dostupni su za određene tipologije spojeva – sa štapnim i osno opterećenim spajalima, zasječene spojeve, sa i bez dodatnih spajala, te spojeve s čavlanim pločama, a primjeri usporedbe s eksperimentalno dobivenim rezultatima su prikazani na slici 22.[1], [30]



Legenda:
Usporedni teorijski modeli:
Foschi model
Goldberg-Richard-Abbott-Richard model (GRAR)
Yee-Melchers model
Wu-Chen model
Ollgaard-Slutter-Fisher model (OSF)

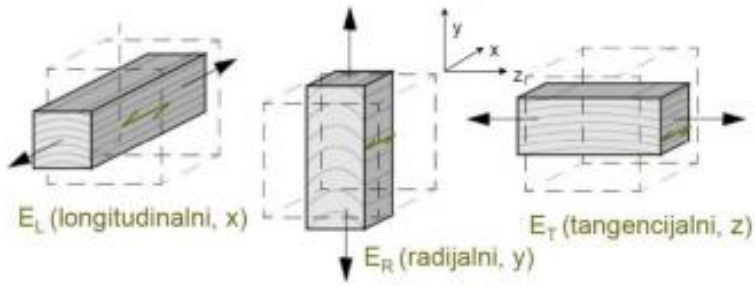
Slika 22. Primjeri usporedbe krivulja sila – pomak zasnovani na rezultatima ispitivanja i teorijskih modela [1], [30]

2.3.2.4. Numerički KE modeli

Za razliku od analitičkih modela, odnosno matematičkih izraza za predviđanje dijela ili cijele krivulje opterećenje – pomak na temelju ograničenog broja parametara, u numeričke modele zasnovane na konačnim elementima, KE modele ili KEM (engl. FE models, FEM) se mogu ugraditi i drugi utjecajni parametri, npr. nejednoliki raspored spajala i nelinearni odziv materijala. Time su KEM superiorniji od analitičkih jer

omogućavaju simulaciju i cjelovitu predikciju ponašanja spoja drvo – beton te ocjenu utjecaja svakog parametra, iako su ocjena točnosti i validacija KE modela također mogući samo usporedbom s rezultatima ispitivanja.

Parametri KE modela koji utječu na ponašanje spoja su geometrija posmične probe, rubni uvjeti (uključujući kontakt drvo – beton te spojno sredstvo – materijal) i postavke ispitivanja, te mehanička svojstva materijala (drvo, beton) i spojnog sredstva.[31] Izrada numeričkog KEM zahtijeva vještinu i odgovarajući software (favoriziraju se oni s opcijom do programiranja rutina). Numerički KE modeli mogu biti ravninski (2D) i prostorni (3D). Beton se modelira kao izotropan elastični ili elasto-plastični materijal, a konstitutivni model drva je znatno kompliciraniji – zbog utjecaja nehomogenosti i prirodnih anomalija (obilježja rasta drveta) i svakako anizotropije koja se u 3D modeliranju ne može izbjeći (slika 23.).



Slika 23. Shematski prikaz uzdužnih (L) i poprečnih (R, T) ravnina i moduli elastičnosti [4]

Simulacije s 2D modelima su pokazale dobru korelaciju s rezultatima ispitivanja za početni dio krivulje opterećenje – pomak (do popuštanja), te značajno poboljšanje simulacije ugradi li se u model i deformacije betona pri čemu utjecaj toga poboljšanja slabi s porastom deformacije. Razlozi su najvjerojatnije povezani s modelima materijala (elastično model betona) i zanemarivanjem trenja između drva i betona te drva i čelika (spajala). Prema dobivenim numeričkim rezultatima, utjecaj plastičnosti je vrlo malen za opterećenja manja od 40 % granične nosivosti spoja (lomna sila), a glavnina popuštanja zbog očvršćivanja čelika i drva se događa pri pomaku (klizanju) manjem od 10 mm. Takvi rezultati upućuju da bi graničnu nosivost prema Europskoj teoriji popuštanja trebalo usporediti s rezultatima ispitivanja za vrijednosti klizanja < 10 mm.[18]

Primjenom 3D KE modela sa štapnim spajalima, krivulje opterećenja i klizanja dobivene testovima smicanja mogu se točno modelirati do klizanja od 10 mm. Točnost

simulacije raste ako je do trenutka popuštanja većina uključenih fenomena elastična, te ako su nakon popuštanja uključeni fenomeni nelinearni elastično-plastični. Identificirana su tri glavna doprinosa ukupnom posmičnom opterećenju: mehaničko ponašanje materijala, trenje između drveta i čelika i, konačno, trenje između drveta i betona. Najveći doprinos ima mehanički model materijala (ponašanje), zatim trenje između drveta i čelika (spajalo), a najmanji je doprinos trenja između drva i betona. Iako je 3D modeliranje zahtjevnije, točnost rezultata je veća od rezultata dobivenih 2D modelima.[18]

2.4. Metode proračuna kompozitnih greda drvo – beton

Cilj analize i proračunskih postupaka je određivanje deformacija, naprezanja i unutrašnjih sila u spojevima i kompozitnom sustavu. Dimenzioniranje kompozita treba provesti za početnu fazu sprezanja, razmatrajući utjecaje podatljivosti spoja, geometrije i materijalnih svojstava presjeka, te za završnu fazu sprezanja, uzimajući u obzir i učinke dugotrajnog ponašanja na raspodjelu unutrašnjih sila (reološko ponašanje betona i drva, neelastične sile zbog utjecaja okoline – promjene temperature i vlažnosti, nelinearno ponašanje betona zbog skupljanja, volumne promjene drva – bubrenje i skupljanje, popuštanje spajala i sl.). Proračunske metode za određivanje unutrašnjih sila u kompozitu, razmatrajući podatljivost spoja su raznovrsne. Različite su prema pristupu i razini točnosti te primjeni (znanstvena analiza ili inženjerska praksa), a mogu se razvrstati u nekoliko skupina (vidjeti i Tablicu 4):[1]

a) *Metode zasnovane na diferencijalnim jednadžbama*:

   S pretpostavkom konstantne geometrije presjeka i svojstava duž osi kompozitne grede, diferencijalna jednadžba koja opisuje klizanje između kompozitnih elemenata se zasniva na pet (5) osnovnih jednadžbi (za: ravnotežu sila u horizontalnom smjeru u jednom od kompozitnih elemenata; ravnotežu sila u vertikalnom smjeru; ravnotežu momenata; zakrivljenosti u poprečnim presjecima, s pretpostavkom jednakih deformiranja dijelova kompozita zbog izostanka odizanja i razlike u naprezanjima na dodiru drva i betona), a iz nje se izvode jednadžbe za određivanje unutrašnjih sila (moment savijanja, normalna i poprečna sila te posmična sila u spoju) – složena metoda bez praktične primjene,

b) *γ - metoda* (u normi niza EN 1995): detaljnije objašnjena u točki 2.4.1

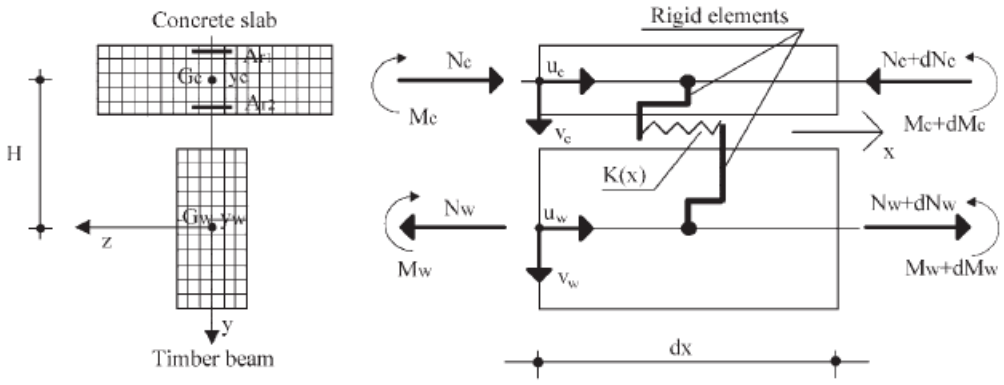
c) *Tlačno - vlačni model* (engl. Strut and tie): detaljnije objašnjena u točki 2.4.2

d) *Metoda posmične analogije*:

Kompozit se tretira kao višeslojni presjek i time se prevladava ograničenja *γ-metode* – kako i izraz proračunsku krutost kompozitnog presjeka (EI_{comp}) predstavlja sumu dvaju osnovnih izraza (1. krutosti pri savijanju svakog pojedinog sloja (ΣEI) i 2. krutosti kompozita zbog ekscentriciteta pojedinog poprečnog presjeka / sloja (ΣEA · a^2), premisa metode jest da se kompozitna greda može razmatrati kao sustav koji je superpozicija sljedeća dva: 1. sustav A – predstavlja krutost na savijanje i raspodjelu unutrašnjih sila za pojedinačni presjek; 2. sustav B – predstavlja učinke spregnutog djelovanja uključujući i deformabilnost spoja (proračunska posmičnu krutost).

e) *Metoda konačnih elemenata (KE model)*:

Primjena podrazumijeva vrlo precizan opis naprezanja i deformiranja te zahtijeva dublje razumijevanja ponašanja materijala i spoja te proračuna kompozitnih sustava i svakako vještinu modeliranja – metoda zato ima veću primjenu u području istraživanja i razvoja kompozitnih sustava, a manje se primjenjuje u praksi. Jedan od mogućih KE modela prikazan je na slici 24.



Slika 24. KE model kompozita s podatljivom vezom [21]

Tablica 4. Pregled, karakteristike i raspon primjene metoda proračuna TC kompozita [1]

METODA →	DIFERENCIJALNE JEDNADŽBE	γ METODA	TLAČNO - VLAČNI MODEL (STRUT AND TIE)	POSMIČNA ANALOGIJA	METODA KONAČNIH ELEMENATA
JEDNOSTAVNOST KORIŠTENJA					
VRIJEME POTREBNO ZA PROVEDBU	Srednje, s povećanjem rubnih uvjeta zahtjeva više vremena	Kratko	Srednje	Srednje	Dugo
JASNO ODREĐENE VRIJEDNOSTI / PARAMETRI PROVJERE	Da	Da	Da, ali diskontinuiteti (zbog modeliranja spajala kao grednih elem.) može utjecati na rezultate	Da	Ne, naprezanja na diskontinuitetima mogu utjecati na rezultate
LAKA PRILAGOLJIVOST ZA USPOREDIVE SUSTAVE	Da, mijenjaju se samo ulazne vrijednosti	Da, mijenjaju se samo ulazne vrijednosti	Ne, sve točke i elementi se trebaju mijenjati	Da, dovoljno je zamijeniti samo dvije grede	Ne, potreban je novi model
UTJECAJ MODELIRANJA NA REZULTATE	Malen, modeliraju se samo grede	Malen, modeliraju se samo grede	Srednje, razmak spajala može utjecati na rezultate	Srednje, razmak spajala može utjecati na rezultate	Visok, jer mreža i materijalni model imaju jak utjecaj na rezultate
PROVJERA REZULTATA	Ručno ili uz pomoć programa za analitičke probleme	Ručno	Računalni program	Računalni program	Računalni program
SLOŽENOST METODE	Srednje	Niska	Srednje	Srednje	Jako
JASAN UTJECAJ POJEDINOG PARAMETRA	Da	Da	Ne	Ne	Ne
DIO STANDARDA / NORME	Ne	Da	Ne	Da, Njemački ankes normi EN 1995 - 1 - 1	Ne
RASPON PRIMJENE					
RAZLIČITE DIMENZIJE POPREČNIH PRESJEKA	Da	Da	Da	Da	Da
RAZLIČITI MODULI ELAST.	Da	Da	Da	Da	Da
PODATLJIVOST SPOJA	Da	Da	Da	Da	Da
VIŠERASPONSKI SISTEMI	Da, s povećanjem rubnih uvjeta povećava se i napor	Ne	Da	Da	Da
STATIČKI NEODREĐENI SUSTAVI	Da, s povećanjem rubnih uvjeta povećava se i napor	Ne	Da	Da	Da
PROMJENE DUŽ RASPONA (npr. poprečni presjek)	Da	Ne	Da	Da	Da
BROJ SLOJEVA / DIJELOVA KOMPOZITA	2	3	Bez ograničenja, ali s većim brojem povećava se i napor	Bez ograničenja	Bez ograničenja, ali s većim brojem povećava se i napor
UTJECAJ NENOSIVIH SLOJEVA IZMEĐU ELEMENATA	Da	Da	Da	Da	Da
NELINERANO PONAŠANJE MATERIJALA	Unutar zasebnog elementa	Ne	Da	Da	Da
SUSTAVI RAZLIČITI OD RAVNE GREDE	Ne	Ne	Da	Da	Da
SPAJALA					
RAZLIČITI RAZMACI SPAJALA	Da, ako je sistem podijeljen u podsisteme, povećan napor	Okvirna procjena prosječne udaljenosti	Da	Da, ako je sistem podijeljen u podsisteme	Da
JEDNOSTRUKA SPAJALA	Da, ali napor se povećava s povećajem broja spajala	Ne	Da	Da, ako su spajala raspoređena na jednoj duljini	Da
OPTEREĆENJA					
NEJEDNOLIKO RASPODJELJENA OPTEREĆENJA	Da	Ne	Da	Da	Da
RAZMATRANJE NEELASTIČNIH NAPREZANJA POPUT TEMPERATURE I BUBRENJA	Da	Ne	Da	Da	Da

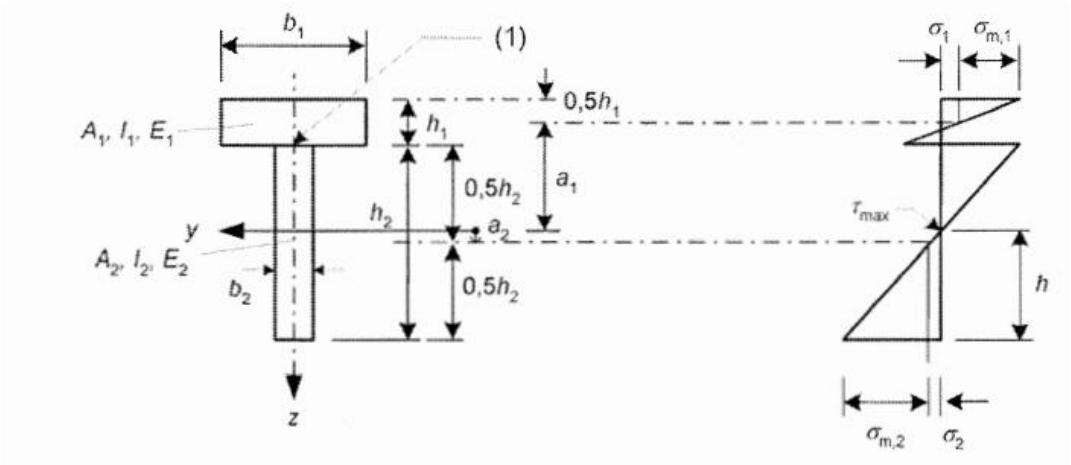
2.4.1. Analitička γ – metoda

Analitička γ metoda je normirani, pojednostavnjeni proračun mehanički sastavljenih greda, zasnovan na linearno - elastičnoj teoriji. Značajke metode su navedene u Tablici 4. Učinak prijenosa opterećenja (raspodjela unutrašnjih sila i naprezanja, slike 16. i 25.) i stupanj sprezanja se ocjenjuju pomoću tzv. γ vrijednosti u izrazu za proračunsku krutost kompozita na savijanje, EI_{ef}.

U normi HRN EN 1995 – 1 – 1 (Obavijesni dodatak B) su navedene sljedeće pretpostavke primjene ove metode na mehanički sastavljene grede [5]:

- Grede su slobodno oslonjene na rasponu *l*, za kontinuirane grede proračunski raspon iznosi 0,8*l*, a za konzole 2*l*
- Drveni dio presjeka (od drva ili zasnovan na drvu) je po cijeloj dužini grede cjelovit ili uslojen lijepljenjem
- Dvije komponente sastavljenog presjeka su spojene mehaničkim spojnim sredstvom s modulom klizanja (K_s, za spojeve drvo – drvo je naveden u Tablici 1)
- Razmak između mehaničkih spojnih sredstava *s* je konstantan ili jednoliko varira u skladu s poprečnom silom između s_{min} i s_{max}, gdje je $s_{max} \leq 4\ s_{min}$
- Opterećenje je zadano u pravcu z-osi presjeka i rezultira momentom savijanja *M* = M(x) koji varira sinusoidalno ili parabolično te poprečnom silom *V* = *V*(x).

Shematski prikaz mehanički sastavljenog T-presjeka i raspodjela normalnih naprezanja su prikazane na slici 25., a odgovarajući sljedeći navedeni izrazi preuzeti su iz norme HRN EN 1995-1-1 (Obavijesni dodatak B).



Slika 25. Mehanički sastavljen T-presjek i raspodjela normalnih naprezanja s oznakama [5]

Površina dijelova spregnutog poprečnog presjeka:

$$A_1 = h_1 \cdot b_1 \tag{5}$$

$$A_2 = h_2 \cdot b_2 \tag{6}$$

Moment tromosti:

$$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} \tag{7}$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} \tag{8}$$

Proračunski razmak spojnih sredstava, sveden na jedan (1) red spajala:

$$s_{ef} = 0{,}75 \cdot s_{min} + 0{,}25 \cdot s_{max} \tag{9}$$

Ako su spojna sredstva raspoređena na razmacima s_n u n > 1 redova, razmake s_{min} i s_{max} u prethodnom izraz treba proračunati za s_n/n.

Za podatljivo spregnute grede, savijane na rasponu *l*, koeficijentom sprezanja γ_i se uzima u obzir i utjecaj klizanja u spoju na statičke veličine sastavljenog presjeka:

$$0 < \gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{K \cdot l^2}} < 1 \tag{10}$$

$$\gamma_2 = 1 \tag{11}$$

Modul klizanja treba uvrstiti kao K_s u proračunu GSU, a $K_u = 2/3K_s$ u proračunu GSN.

Proračunska krutost savijanog spregnutog presjeka jednostavno oslonjene grede, EI_{ef}:

$$EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2 \tag{12}$$

Prema poglavlju 2.2.2., za proračun graničnih stanja u početnoj fazi sprezanja (t = 0), module elastičnosti E_i u prethodnom izrazu treba uvrstiti s odgovarajućim početnim (srednjim) vrijednostima ($E_1 = E_b$, $E_2 = E_d = E_{0,mean}$), dok u proračunu za završnu fazu sprezanja (dugotrajno ponašanje) treba primijeniti metodu efektivnih modula (uzeti u obzir reološko ponašanje, tj. puzanje betona i drva), te uvrstiti sljedeće vrijednosti modula elastičnosti:

$$\mathrm{E_1 = E_{b,eff} = \frac{E_b}{1 + \varphi}} \tag{13}$$

$$\mathrm{E_2 = E_{d,eff} = \frac{E_d}{1 + k_{def}}} \tag{14}$$

Ekscentriciteti težišta betonskog, a_1 i drvenog, a_2 dijela sastavljenog T-presjeka:

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (\frac{h_1 + h_2}{2})}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2} \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot (\frac{h_1 + h_2}{2})}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2} \quad (16)$$

Normalna naprezanja u težištima (σ_i) i na rubovima ($\sigma_{m,i}$) dijelova podatljivo spregnutog T-presjeka (napregnut momentom savijanja M_{Ed}):

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}} \quad (17)$$

$$\sigma_{m,1} = \frac{0{,}5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}} \quad (18)$$

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}} \quad (19)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{0{,}5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}} \quad (20)$$

Najveće posmično naprezanje (od poprečne sile V_{Ed}), na poziciji neutralne osi T-presjeka:

$$\tau_{2,max} = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2}{b_2 \cdot EI_{ef}} \cdot V_{Ed} \quad (21)$$

Bočno opterećenje 1 spojnog sredstva na razmaku s_1 u podatljivo spregnutom T-presjeku:

$$F_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot s_1}{EI_{ef}} \cdot V_{Ed} \quad (22)$$

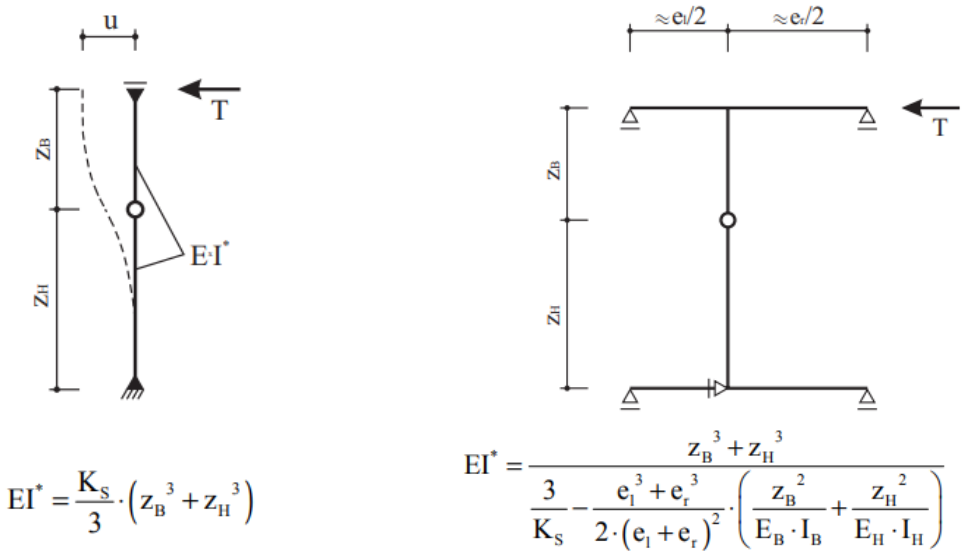
2.4.2. Tlačno – vlačni model

Iako nije normirana, numerička je i zahtijeva primjenu računalnog paketa, ovom metodom se unutrašnje sile u kompozitu mogu vrlo jednostavno odrediti i zato je pogodna za primjenu u praksi. U odnosu na γ – metodu ima i prednosti s obzirom na raspon primjene, spajala i opterećenja (Tablica 4).

Osnovne karakteristike tlačno – vlačnog modela (*engl. Strut and tie, frame / truss model*) su sljedeće:

1. Betonski i drveni dio kompozita se simuliraju pojasnicama modela okvira (u smjeru osi spregnute grede), pozicioniranim u težištima stvarnih dijelova podatljivog T-presjeka) i modeliraju kao grede (gredni KE, *engl. beam FE*)
2. Povezuju se krutim štapovima (rešetkasti KE, *engl. truss FE*), okomitim na gredne KE pojasnica (zglobna veza s pojasnicama okvira) koji tlačnoj i vlačnoj pojasnici osiguravaju jednako deformiranje.
3. Na poziciji spojnog sredstva, rešetkasti KE zamjenjuju dva gredna KE, Njih međusobno povezuje zglob u razini ravnine sprezanja koji simulira mehanizam otkazivanja spajala, dok veza s pojasnicama modela nije zglobna – spriječena je rotacija, ali moguće klizanje.

Zamjenski statički modeli spajala i spregnute grede su prikazani na slici 26.



a) b)

Legenda:

Udaljenosti težišta dijelova T-presjeka visina h_1 i h_2 od ravnine dodira:

$Z_B = h_1/2$ za betonski dio presjeka $Z_H = h_2/2$ za drveni dio presjeka

Pozicija simulacijskog grednog KE – udaljenosti do susjednih rešetkastih KE: e_l, e_r

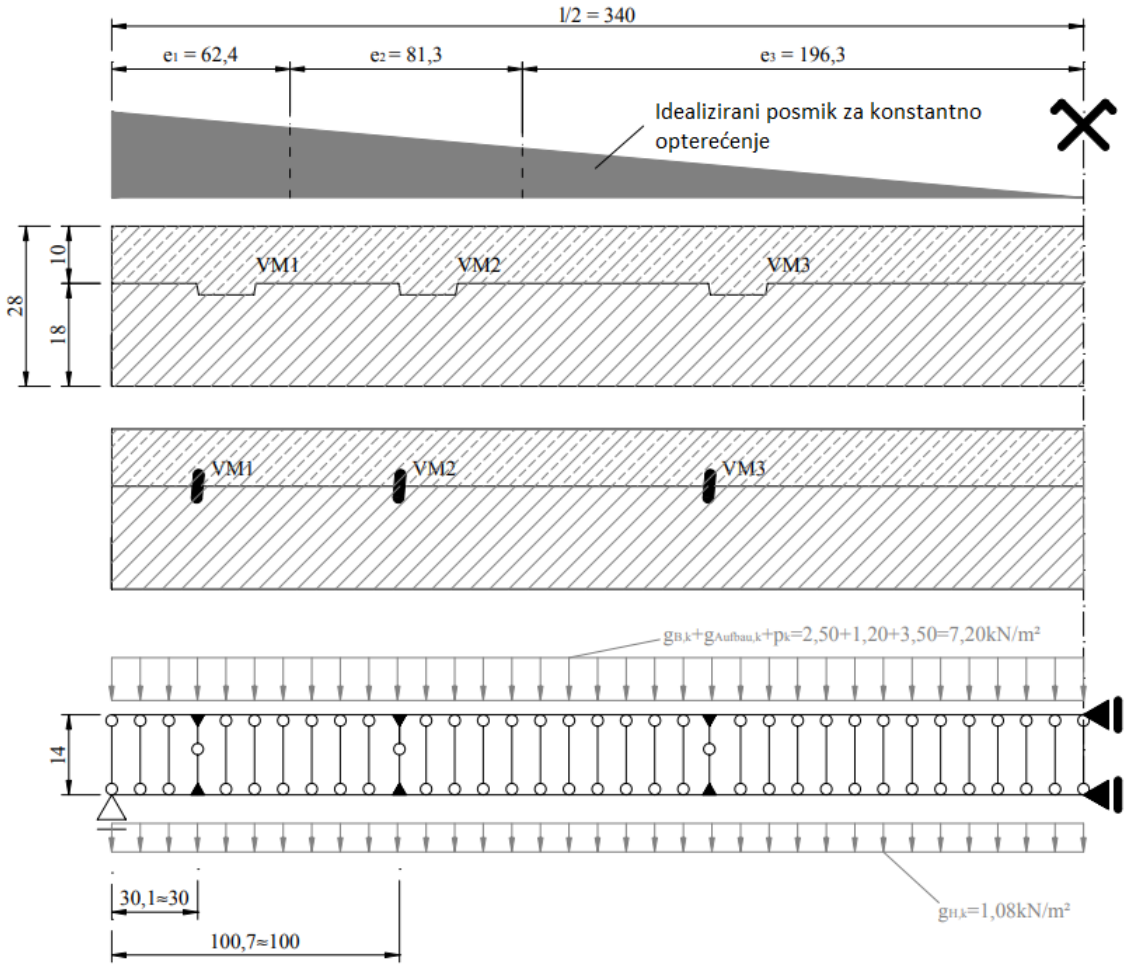
Krutost na savijanje grednog KE za simulaciju spojnog sredstva: EI*

Modul klizanja: K_s

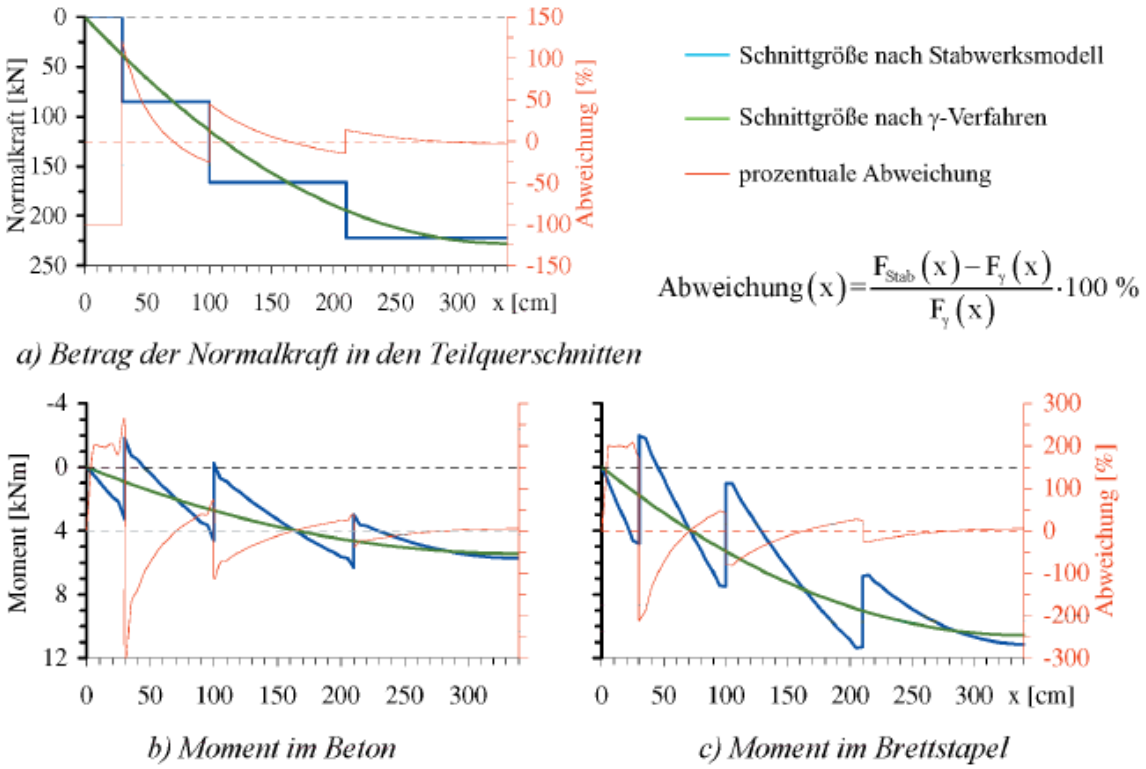
Slika 26. Zamjenski statički modeli spajala: a) zanemarene deformacije pojasnica, b) deformacije pojasnica se uzimaju u obzir [32]

Zamjenski statički modeli (spoja/spajala i spregnute grede, slika 26.) omogućavaju simulaciju mehanizma sloma u spajalu i klizanja su spoju pozicioniranjem zgloba na dodiru dijelova spregnutog presjeka te uzimaju u obzir stvarne skokovite promjene normalnih sila, zbog prijenosa poprečnih sila, te momenata savijanja, zbog ekscentričnosti opterećenja u odnosu na dijelove T-presjeka.

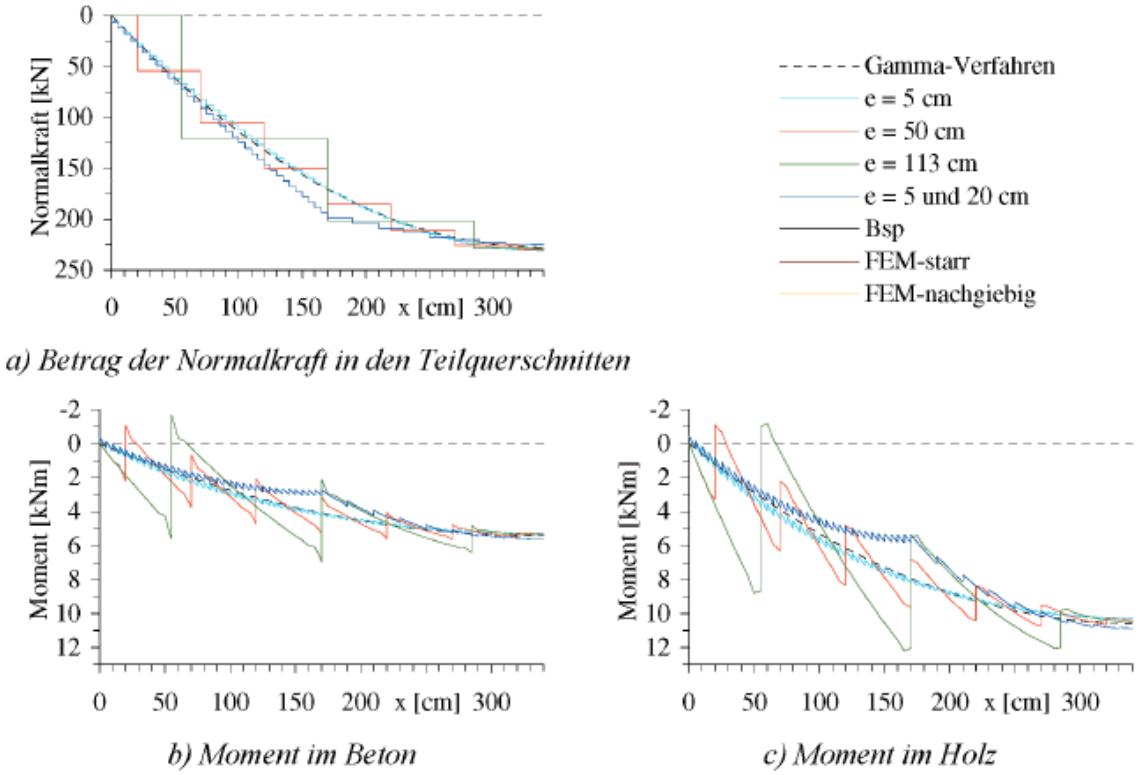
Na slici 27. je prikazan primjer modeliranja stropne grede raspona 6,8 m sastavljene od betonske ploče visine 10 cm i drvene grede visine 18 cm, spregnute zasijecanjem (zasjeci na nejednakim razmacima prate anvelopu poprečnih sila). Razmjer modula elastičnosti iznosi $n_B = 3$ (E_B/E_H = 30000/10000 N/mm^2). Zamjenski KE (modeliranje zasjeka) su pozicionirani na mjestima početka zasjeka u drvenom dijelu kompozita gdje se predviđa slom. Modul klizanja, dobiven iz posmičnih proba iznosi K_S = 539 kN/mm (manji je od vrijednosti 860 i 2235 kN/m^2 po 1 m širine, navedenih u literaturi koju su koristili autori). Na slikama od 28. do 30. su ilustracije usporedbe s rezultatima primjene γ – metode [32].



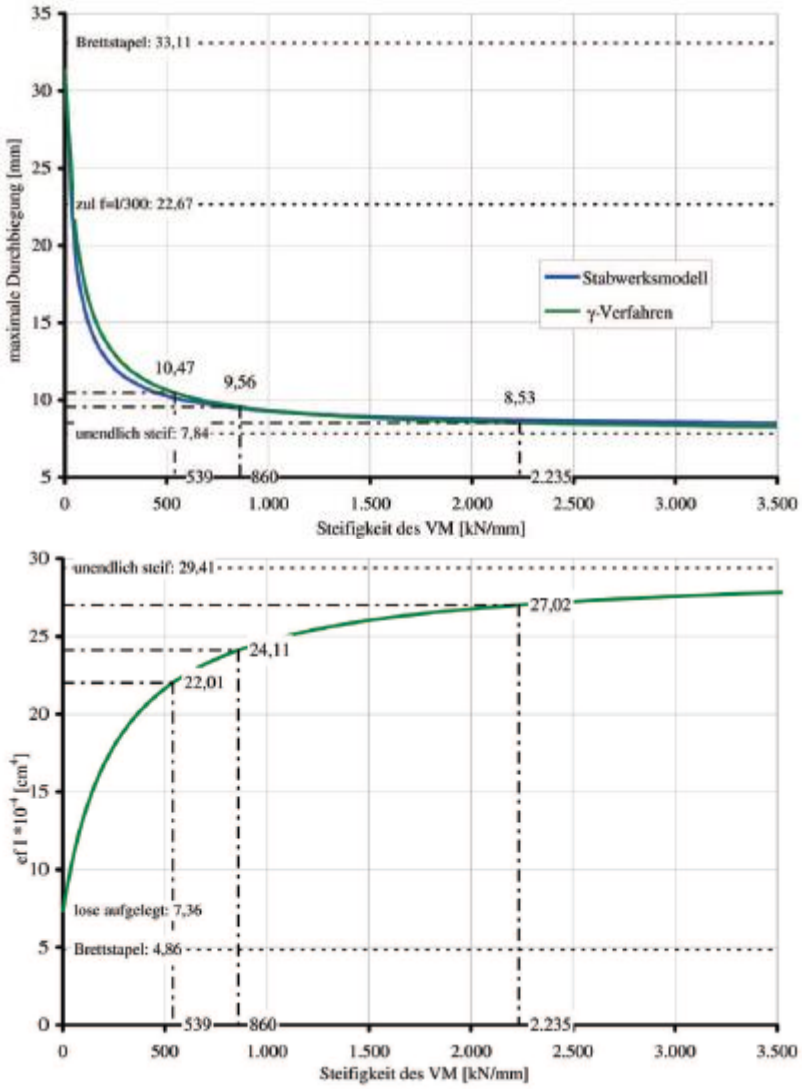
Slika 27. Primjer tlačno – vlačnog modela stropne grede spregnute zasijecanjem [32]



Slika 28. Raspodjela unutrašnjih sila i odstupanje rezultata – usporedbe s rezultatima γ – metode (proračunati za prosječnu krutost spoja, za razmake e ≈ 6,8/6 ≈ 1,13m) [32]



Slika 29. Unutrašnje sile u dijelovima kompozita za različite udaljenosti spajala (zasjeka) [32]



Slika 30. Usporedbe rezultata – progibi spregnute grede (gore) i proračunske krutosti kompozita (dolje) u ovisnosti od krutosti spoja (modul klizanja) [32]

	im Schwerpunkt flächengleicher Bereiche e_1 = 624 mm e_2 = 813 mm e_3 = 1963 mm	mittig zwischen den VM e_1 = 650 mm e_2 = 900 mm e_3 = 1850 mm	Bereich bis zum nächsten VM e_1 = 1000 mm e_2 = 1100 mm e_3 = 1300 mm	nach Stabwerksmodell
T1	75,86 (–10,6 %)	78,69 (– 7,3 %)	114,17 (+34,5 %)	84,90
T2	75,84 (– 6,5 %)	81,50 (+ 0,5 %)	80,12 (– 1,2 %)	81,12
T3	75,85 (+36,7 %)	67,37 (+21,4 %)	33,27 (–40,1 %)	55,50
ΣT	227,56 (+ 2,7 %)			221,52

Slika 31. Usporedne ovisnosti opterećenja na spajala (posmične sile) i razmaka spajala [32]

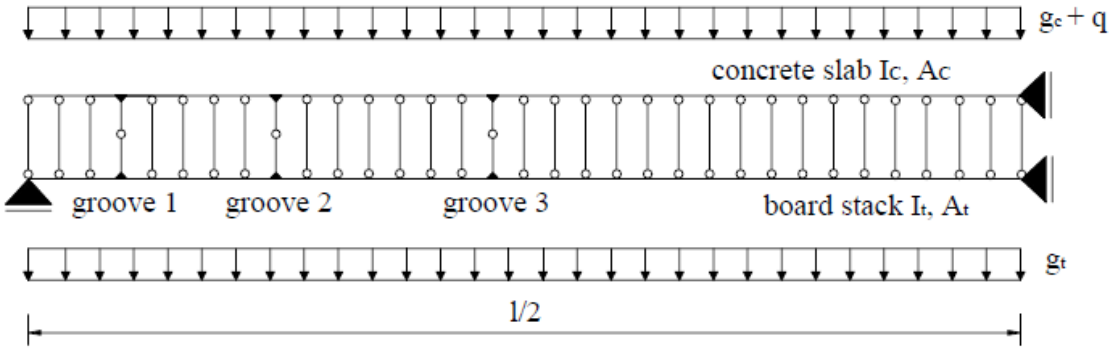
Odstupanja unutrašnjih sila (osne sile u težištima dijelova T-presjeka i momenti savijanja), prikazana na slici 28. su u odnosu na vrijednosti proračunate γ-metodom i veća: za normalne osne sile odstupaju od -100 % do 122 %, a za momente savijanja

od -200 % do 297 % u betonu i od -212 % do 209 % u drvu. Odstupanja upućuju na to da γ-metoda podcjenjuje utjecaj ekscentriciteta na normalna naprezanja (betonski dio je kritičniji) i da u tom slučaju rastu posmična naprezanja potrebna za uravnoteženje sila. Za razmake navedene uz idealiziranu raspodjelu poprečne sile (slika 27.) te u sredini udaljenosti susjednih spajala i na rasponu do susjednog spajala, na slici 31. su prikazane vrijednosti opterećenja na spajala određene iz štapnog tlačno-vlačnog modela i primjenom γ - metode, a vidljivo je da rezultati dobiveni modeliranjem realnije prate tijek poprečnih sila.

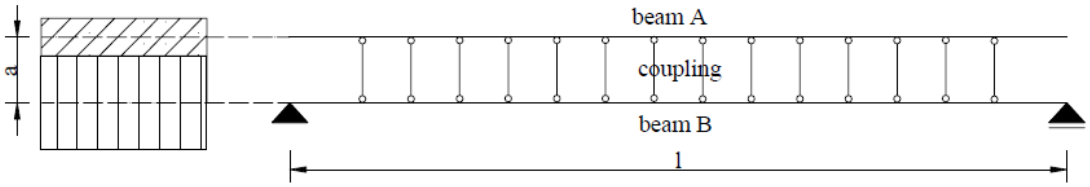
S obzirom da razmaci spojnih sredstava bitno utječu na bočna opterećenja spajala, krutosti spoja i raspodjelu unutrašnjih sila (normalne sile, momenti savijanja i poprečne sile), odstupanja prate porast proračunskog razmaka spajala: najveća su za prosječni razmak spajala e ≈ 113 cm (≈ 680 cm / 6), a gotovo podudarna za najmanji razmak, e_{min} = 5 cm (slika 29). Iz prikaza na slici 30. je vidljivo da za progibe grede i proračunske krutosti kompozita nema značajnijih razlika između rezultata primjene dviju metoda.

Na slici 32. prikazana je usporedba tlačno - vlačnog modela i modela posmične analogije (prema Njemačkom dodatku normi EN 1995-1-1). [32] U takvom modelu se stvarna spregnuta greda simulira dvama podsustavima grednih KE (pojasnice), a povezuju ih kruti štapni elementi (rešetkasti KE). Unutrašnje sile i momenti savijanja dvaju podsustava se određuju računalnim programom, podešavanjem posmične krutosti donje pojasnice (B). Greda A predstavlja krutost na savijanje stvarnog kompozita pa se momenti savijanja u betonskom i drvenom presjeku te poprečne sile izvode iz vrijednosti dobivenih za podsustava A. Podsustav B simulira spregnuto djelovanje pa se iz rezultata računalne analize modela određuju normalne sile u dijelovima stvarnog kompozita i tijek posmičnih sila. U model se može ugraditi i krutost na savijanje spajala, a unutrašnje sile stvarnog kompozita odrediti metodom posmične analogije.

Na slici 33. su prikazane postavke ispitivanja velikih uzoraka takve spregnute stropne ploče.



Tlačno – vlačni model



Model posmične analogije

$$EI_A = EI_{concrete} + EI_{timber}$$

$$EI_B = a^2 \cdot \frac{EA_{concrete} \cdot EA_{timber}}{EA_{concrete} + EA_{timber}}$$

$$GA_B = k \cdot a^2$$

Simboli:

EI_A	krutost na savijanje podsustava A
EI_B	krutost na savijanje podsustava B
GA_B	posmična krutost podsustava B
k = K/sef	posmična krutost spoja
k	modul klizanja za jedno spajalo
s_{ef}	proračunski razmak spajala

Slika 32. Primjeri modeliranja kompozita spregnutog zasijecanjem – proračunski modeli [33]

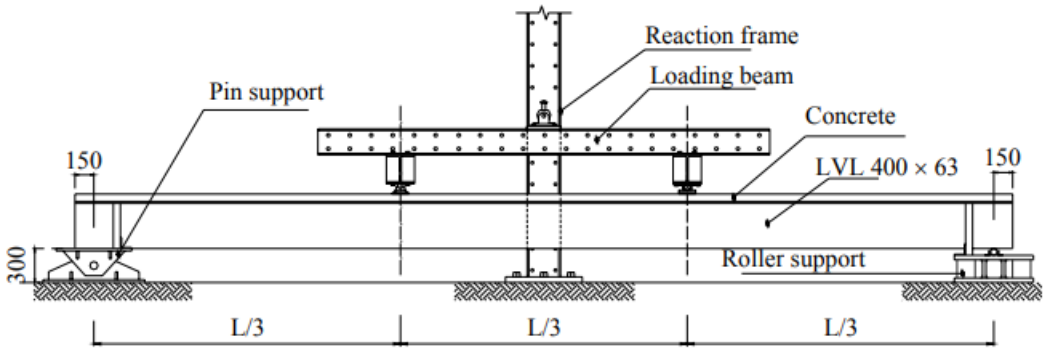
Slika 33. Laboratorijsko ispitivanje velikih uzoraka sa zasječenim spojevima [33]

3. KONSTRUKCIJSKA ANALIZA TC GREDA – SPREZANJE ZASIJECANJEM I PRIMJENOM TRNOVA

Ovo poglavlje je zapravo glavni dio rada i u njemu su kratko opisana provedena ispitivanja stropnih kompozitnih greda sa zasječenim spojevima dostupna iz literature, temeljem čijih rezultata je provedena konstrukcijska analiza za takvu tipologiju sprezanja: izrađeni su usporedni numerički modeli (tlačno – vlačni) i paralelno proveden proračun primjenom analitičke γ - metode te napravljena usporedba rezultata analize s referentnim rezultatima ispitivanja. Provedene su i usporedne analize za tipologiju sprezanja primjenom trnova budući da se posmična krutost takvih spojeva određuje za normirane vrijednosti modula klizanja (prema HRN EN 1995-1-1 i Tablici 1). U provedenim analizama nisu razmatrani učinci dugotrajnog ponašanja.

3.1. Referentna laboratorijska ispitivanja

Kako je u prethodno elaborirano, laboratorijska ispitivanja prethode svim ostalim metodama istraživanja (kad je svrha znanstvene ili razvojna) ili praktične primjene (za npr. nenormirane tipologije spojeva) jer u sve provjere i evaluacije rezultata treba ugraditi svojstva materijala, mehanička svojstva spoja te mehanička svojstva samog kompozita. Mehanička svojstva spoja se laboratorijski ispituju na posmičnim probama (mali uzorci), a mehanička svojstva i ponašanje (nosivost, deformiranje) kompozita na velikim uzorcima (savijanje do sloma). Postavke ispitivanja, uzorci i procedure ispitivanja te obrade rezultata moraju biti normirani.



Slika 34. Postavke referentnog ispitivanja velikih uzoraka stropnih kompozitnih greda [9]

3.1.1. Referentni push – out testovi posmičnih proba

Tema referentnog istraživanja su stropne kompozitne grede spregnute zasijecanjem. Drveni dio kompozita od LVL-a (lamelirano furnirsko drvo) je zasječen stepenasto, s pravokutnim utorima dimenzija 150 x 63 mm, dubina 25 mm i 50 mm, sa ili bez dodatnih štapnih spajala (vijci za drvo promjera d = 16 mm).[9] Mehanička svojstva spojeva ispitana su push-out testom uzoraka posmičnih proba, a rezultati su prikazani u Tablici 5.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava spojeva – uzorci A3, B1 i R1 [9]

Uzorci posmičnih push out testova		Maks. Opt, F_{max} [kN]	$K_{s0,4}$ [kN/mm]	$K_{s0,6}$ [kN/mm]
Naziv	Opis			
A3	Spajalo - pravokutni zasjek 150*25*63 + vijak ϕ16 Drvo - lamelirano furnir drvo Beton	71,8	113	102
B1	Spajalo - pravokutni zasjek 150*50*63 Drvo - lamelirano furnir drvo Beton	48,3	105	59,3
R1	Spajalo - vijak ϕ16 Drvo - lamelirano furnir drvo Beton	46,44	28,9	6,3

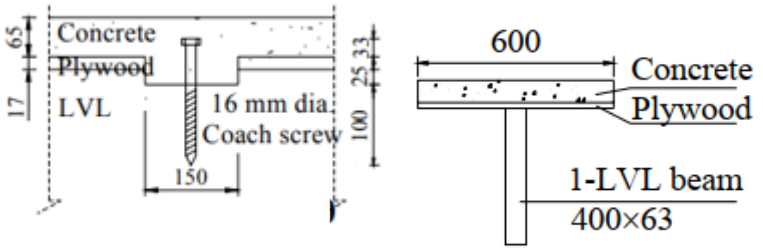
Rezultati ispitivanja prikazani u Tablici 5 su: F_{max} – najveća vrijednost sile pri ostvarenom pomaku (klizanje) koji ne prelazi 15 mm; $K_{s0,4}$ i $K_{s0,6}$ su sekantni moduli klizanja (za 40 % i 60 % vrijednosti lomne posmične sile) za granično stanje nosivosti i uporabljivosti.

3.1.2. Referentno ispitivanje velikih uzoraka na savijanje

Laboratorijski testovi velikih uzoraka, slobodno oslonjenih greda su provedeni s postavkama koje su prikazane na slici 34. Detaljnije, razmatrani su utjecaji duljine spregnute grede, broja i rasporeda spojeva po duljini grede te geometrije i vrste spojeva (zasjeka).

Karakteristični poprečni i uzdužni presjeci velikih uzoraka (zasjek drvenog dijela spregnute grede dubine 25 mm), su prikazani na slici 35.

Svojstva korištenih materijala i dimenzije poprečnog presjeka pri izradi velikih uzoraka dani su u Tablicama 6. i 7. te na slikama 36. i 37. (polovice duljine grede s rasporedom spojeva), a rezultati ispitivanja su navedeni u Tablici 8.



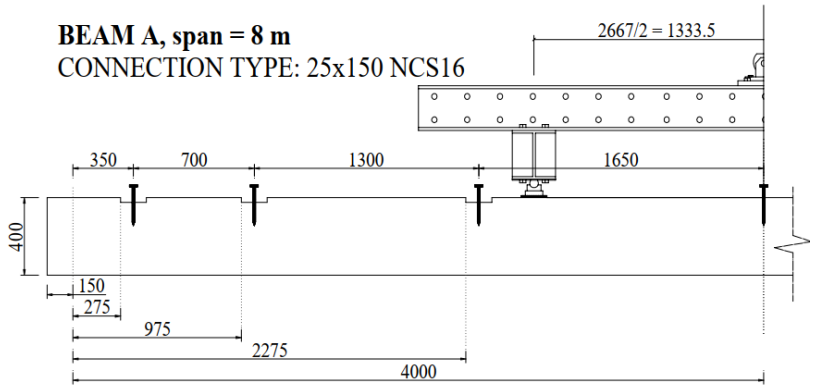
Slika 35. Zasjek s vijkom za drvo (lijevo) i poprečni presjek spregnute grede (desno) [9]

Tablica 6. Uzorci ispitivanja – geometrijske vrijednosti, mehanička i fizička svojstva [9]

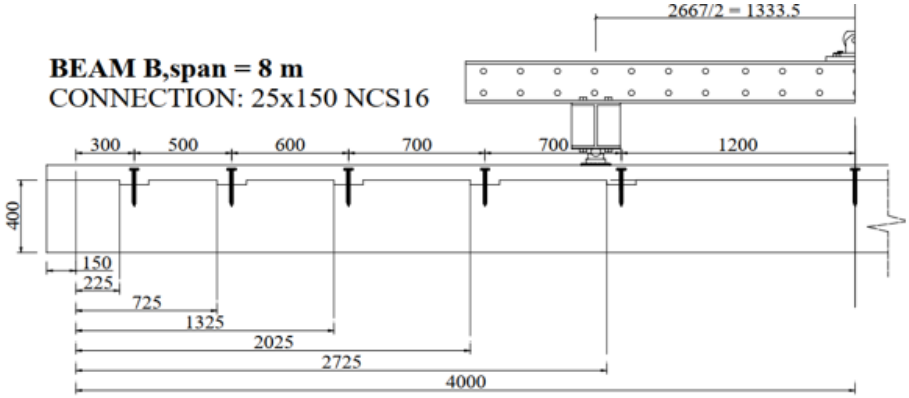
BETONSKI DIO PRESJEKA			
Širina	b_1	600	mm
Visina	h_1	65	mm
Površina	$A_1 = b_1 * h_1$	39000	mm^2
Moment inercije	$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$	13731250	mm^4
Modul elastičnosti betona	E_1	34000	Mpa
Karakteristična tlačna čvrstoća	$f_{c,k}$	35	N/mm^2
Karakteristična vlačna čvrstoća	$f_{t,k}$	2,2	N/mm^2
Gustoća	ρ_1	2405	kg/m3
Specifična težina	γ_1	24,05	kN/m^3
DRVENI DIO PRESJEKA			
Širina	b_2	63	mm
Visina	h_2	400	mm
Površina	$A_2 = b_2 * h_2$	25200	mm^2
Moment inercije	$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12}$	336000000	mm^4
Modul elastičnosti betona	E_2	10700	Mpa
Karakteristična čvrstoća na savijanje	$f_{m,k}$	48	N/mm^2
Karakteristična vlačna čvrstoća	$f_{t,0,k}$	33	N/mm^2
Karakteristična tlačna čvrstoća	$f_{c,0,k}$	45	N/mm^2
Karakteristična posmična čvrstoća	$f_{v,k}$	5,3	N/mm^2
Gustoća	ρ_2	580	kg/m3
Specifična težina	γ_2	5,8	kN/m^3

Tablica 7. Tip spoja, geometrija velikih uzoraka i spoja, lokacija (vrsta) sloma [9]

Uzorci ispitivanja mehaničkih svojstava spregnute grede (veliki uzorci - ispitivanja na savijanje)			L [m]	Broj spajala	Slom
R.br.	Naziv	Opis			
1)	A1	Spajalo - pravokutni zasjek 150*25*63 + vijak ϕ16 Drvo - lamelirano furnir drvo Beton	8	6	Spajalo
2)	B1	Spajalo - pravokutni zasjek 150*25*63 + vijak ϕ16 Drvo - lamelirano furnir drvo Beton	8	10	Drvo



Slika 36. Greda A1 – raspored spojeva na polovici duljine grede [9]



Slika 37. Greda B1 – raspored spojeva na polovici duljine grede [9]

Tablica 8. Rezultati ispitivanja velikih uzoraka spregnutih greda [9]

Uzorak	$F_{max} = 2P_c$ [kN]	M_{exp} [kNm]	w_{eq} [kN/m]		δ_{max} [mm]	GSN 2Pu [kN]	GSU 2Ps [kN]	Učinak sprezanja, GSU[%]	
			Exp.	Anal.				Exp.	Anal. $K_{0,4}$
A1	87,3	116	14,6	8,28	64,1	46,4	30,9	86,8	96,5
B1	105	140	17,5	11,3	63,1	72,2	48,1	97,3	97,8

Gdje su:

F_{max} – maksimalna lomna sila

δ_{max} – maksimalni progib na polovici grede pri slomu

$w_{eq,Exp}$ – ekvivalentno kontinuirano opterećenje na rasponu *L*, proračunato izjednačenjem za najveći moment savijanja M_{exp} pri ispitivanju silom 2*P*c ($wL^2/8 = (2Pc)L/3$).

$w_{eq,Anal.}$ – odgovarajuća analitička vrijednost izračunana γ - metodom za modul klizanja, $K_{0,6}$

Opterećenje za granično stanje nosivosti se izvodi iz maksimalne sile (eksperiment), a ovisno o predviđenom mehanizmu sloma, u drvu (vlačni) ili spoju (posmični, s pratećim

slomom betona), određuje se prema sljedećim izrazima (s k_{mod} = 0,8 i γ_M = 1,25) [9], [32]:

Za slom u spoju
$$2P_u = \frac{R_k}{R_m} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot (2 \cdot P_c) = 0{,}531 \cdot (2 \cdot P_c) \quad (23)$$

Za slom u drvu
$$2P_u = \frac{f_d}{f_m} \cdot k_{mod} \cdot (2 \cdot P_c) = 0{,}687 \cdot (2 \cdot P_c) \quad (24)$$

Gdje su:

R_k/R_m = 0,83 omjer karakteristične i srednje nosivosti spoja (slom u zasječenom spoju prvenstveno je posljedica smicanja betona u ravnini sprezanja, omjer je statistički izveden iz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće valjka) [9]

$2Pu = \gamma_M (2Pc) / 0{,}7$, za proračunsku čvrstoću $f_d = k_{mod} f_k / \gamma_M$ i $f_k \approx 70\ \% f_m$ [34]

Za granično stanje uporabljivosti, s γ_Q = 1,5, vrijede sljedeći izrazi [9]:

Za slom u spoju
$$2P_s = \frac{2 \cdot P_u}{\gamma_Q} = 0{,}354 \cdot (2 \cdot P_c) \quad (25)$$

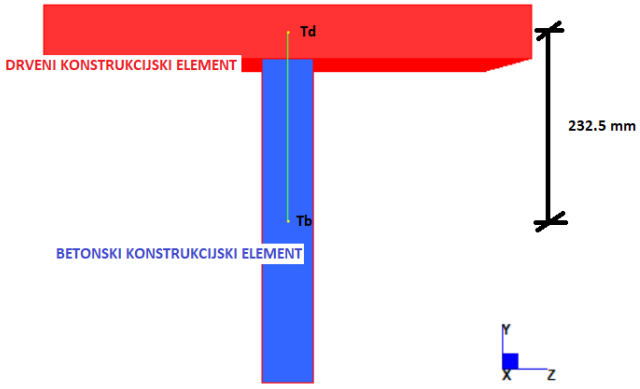
Za slom u drvu
$$2P_s = \frac{2 \cdot P_u}{\gamma_Q} = 0{,}458 \cdot (2 \cdot P_c) \quad (26)$$

3.2. Tlačno – vlačni model

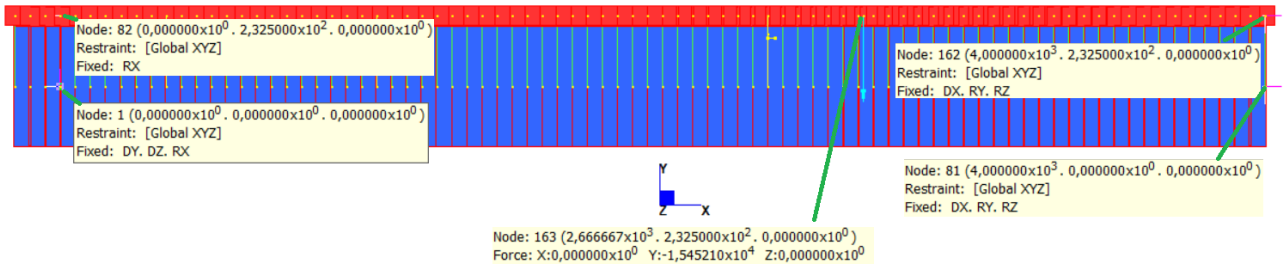
Za izvedbu i statičku analizu štapnih tlačno – vlačnih modela za usporedbu referentnih uzoraka ispitivanja A1 i B1 iz prethodnog poglavlja korišten je računalni program Straus7.[35] Za oba referentna uzorka su izrađena po dva štapna modela, različita po načinu simuliranja spoja, u skladu s poglavljem 2.4.2 ovoga rada (slika 24.). Budući da su referentni uzorci različiti samo po broju i rasporedu spojeva, a istog su poprečnog presjeka i duljine, ishodišni tlačno – vlačni modeli je primjenjiv na oba (A1 i B1), a postupak modeliranja je sljedeći:

1. modelira se polovica raspona L = 8,30 m, L/2 = 4,15 m (grede su simetrične),
2. tlačna i vlačna pojasnica su razmaknute za 232,5 mm (udaljenost težišta dijelova kompozita, T_b i T_d),
3. zadaju se geometrijska i materijalna svojstva presjeka prema Tablici 6. (slika 38.),

4. izrađuje se mreža KE za pojasnice modela koja se sastoji od 172 točke i 254 „beam“ elementa,
5. zadaju se rubni uvjeti (oslonac je na 150 mm od kraja grede kao što je prikazano na slikama 34, 36 i 37): čvor 1 je nepokretni zglobni oslonac (spriječena torzija / rotacija oko globalne x-osi, slobodne rotacije oko obje osi presjeka), u čvoru 82 (gornji pojas) je torzija spriječena radi stabilnosti modela, u krajnjim čvorovima 162 i 81 gornje i donje pojasnice je simulirana simetrija grede (spriječen pomak u smjeru x-osi i rotacije oko obje osi poprečnog presjeka), slika 39.,
6. zajedničko deformiranje pojasnica (jednaki progibi) osiguravaju “spojnice“ – kruti štapovi modelirani na razmacima 50 mm (korak mreže KE pojasnica) za koje u Straus7 programu postoji opcija izbora:“Connection“. Connection KE se koriste kada se želi zadati krutost u bilo kojem od šest stupnjeva slobode bez da se dodaju materijalne karateristike kao što bi primjerice trebalo u „truss“ elementu, a služe istoj svrsi. U ovom slučaju je zadana „velika“ krutost u uzdužnom smjeru elementa (y – globalna os modela), postavke ovakvog elementa koji omogućuje zajednički progib su prikazane na slici 41.,
7. na pozicijama spojeva kompozita (slika 36., za model A1 i slika 37., za model B1), po 2 “Beam“ KE zamjenjuju jedan (1) “Connection“ KE i simuliraju spajalo bilo zasjek s vijkom za drvo ili samo zasjek. Dva beam elementa su spojena zglobom u ravnini sprezanja prema slici 26. – zbog različitih krutosti na savijanje ovih KE i rubnih uvjeta, za svaki model A1 i B1 se izrađuju 2 modela (modeli A1 – 1 i A1 – 2, B1 – 1 i B1 – 2). Kako su zadani ovi elementi je prikazano na slici 42. Kod unosa svojstava za ovaj element, Modul elastičnosti je dobiven proračunom i promjenjiv je ovisno o modelu, geometrijske karakteristike i poprečni presjek je konstantan.

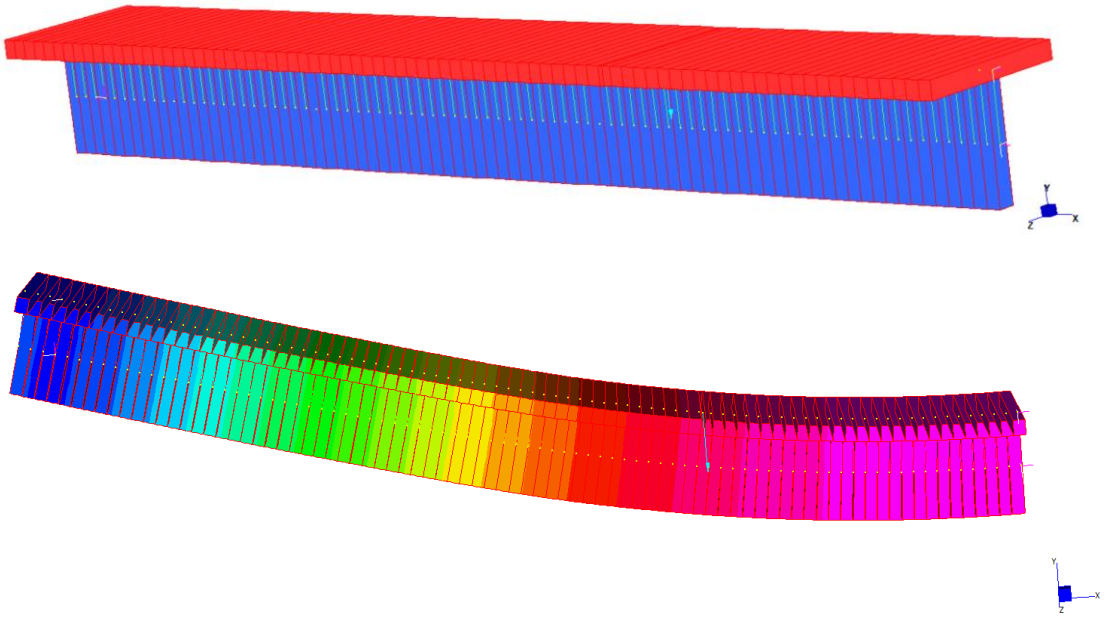


Slika 38. Poprečni presjeci modela greda A1 i B1

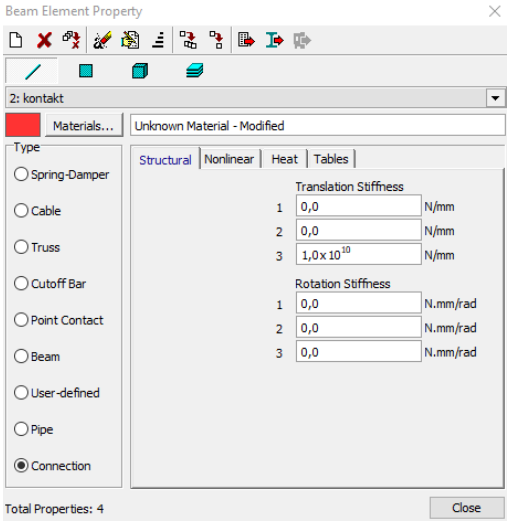


Slika 39. Rubni uvjeti greda A1 i B1

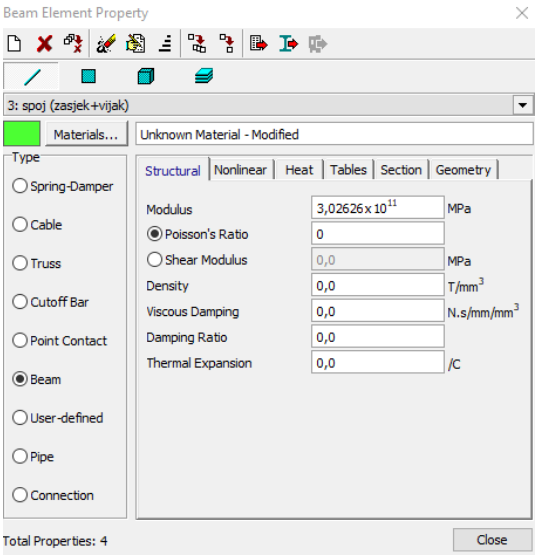
Koncentrirane sile za analizu deformiranja (progibi) i naprezanja se zadaju u čvoru 163 koji je na trećinama udaljenosti između oslonaca (prema slikama 34., 36. i 37.), s vrijednostima iz izraza (23) - (26) radi usklađivanja modela s postavkama i rezultatima referentnih ispitivanja.



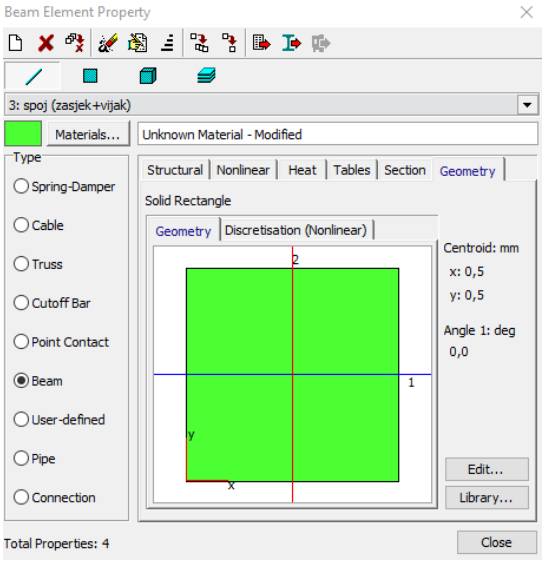
Slika 40. 3D prikaz modela greda A1 i B1, nedefermirana (gore) i deformirana (dolje)



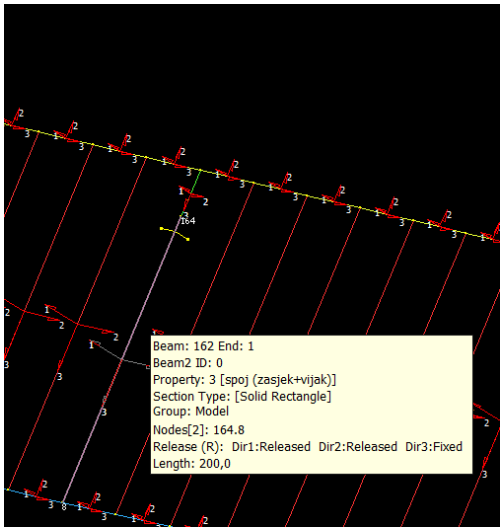
Slika 41. Simulacija zajedničkog progiba – Connection FE



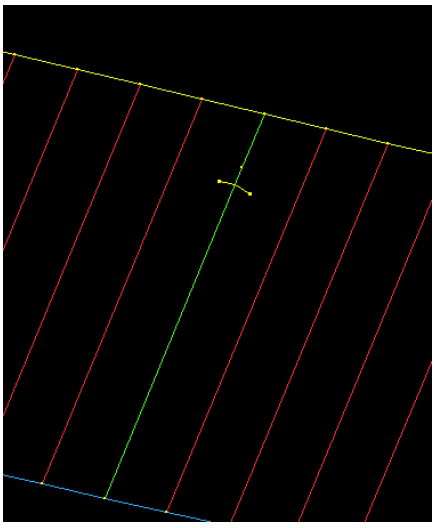
a)



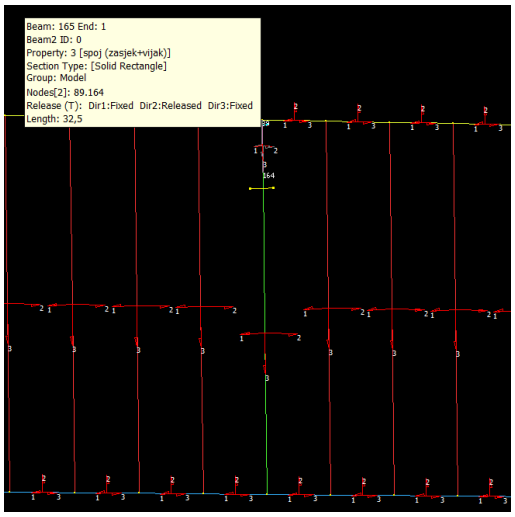
b)



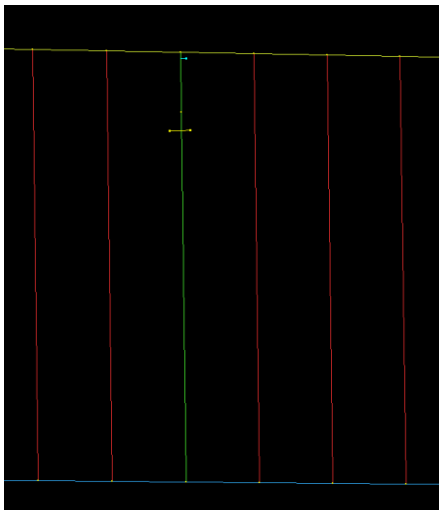
c)



d)



e)



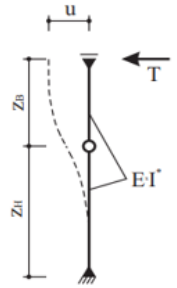
f)

Slika 42. Simulacija spoja – Beam FE a), b) materijalne i geometrijske karakteristike c), d) rubni uvjeti za model 2 e), f) rubni uvjeti za model 1

3.2.1. Greda A1 – model A1 – 1

Krutosti greda koje simuliraju spajala se računaju prema slici 26., za model 1 kojim se ne uzima u obzir krutost spajala dobiju se iduće vrijednosti koje se zadaju u postavkama greda.

ŠTAPNI MODEL 1



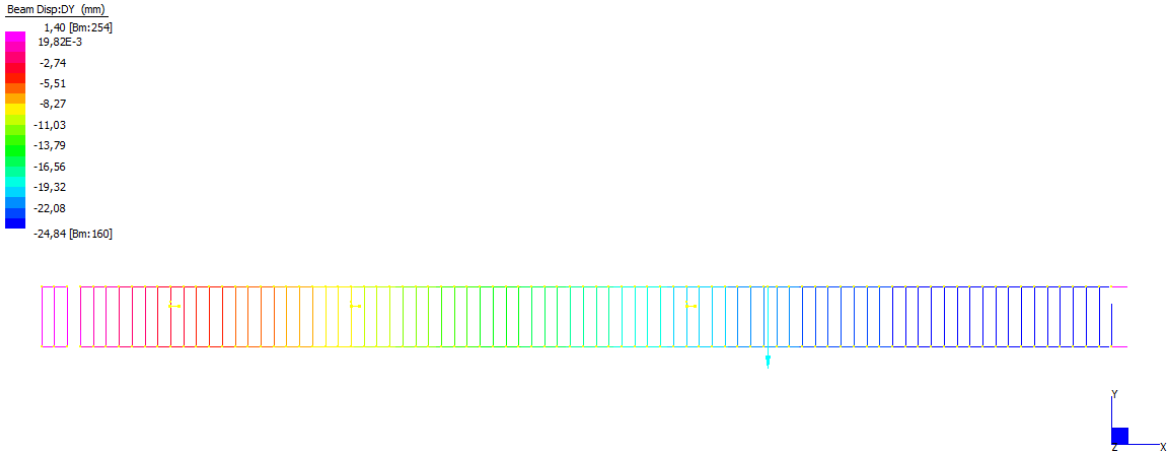
$$EI^* = \frac{K_S}{3} \cdot \left(z_B^{\ 3} + z_H^{\ 3} \right)$$

zb	32,5	mm
zh	200	mm

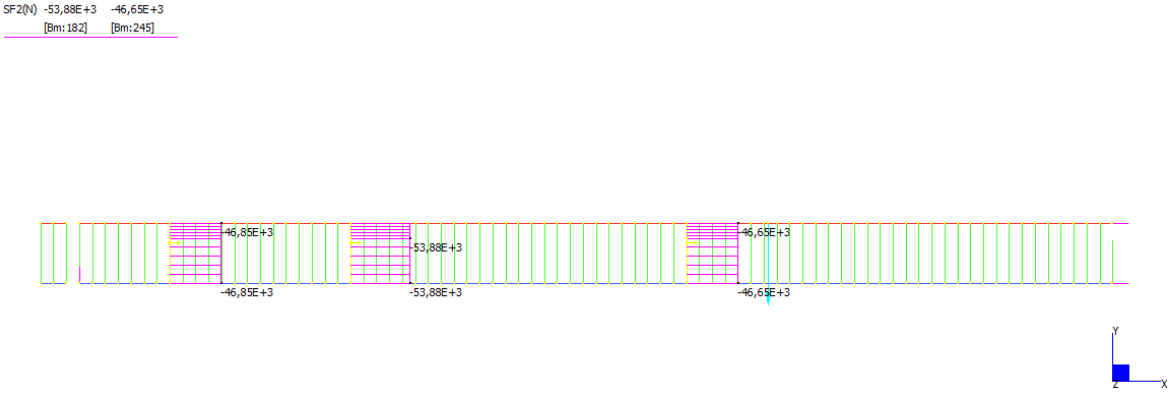
Krutost spoja za štapni model 1

$(EI)_1$	3,02626E+11	Nmm²

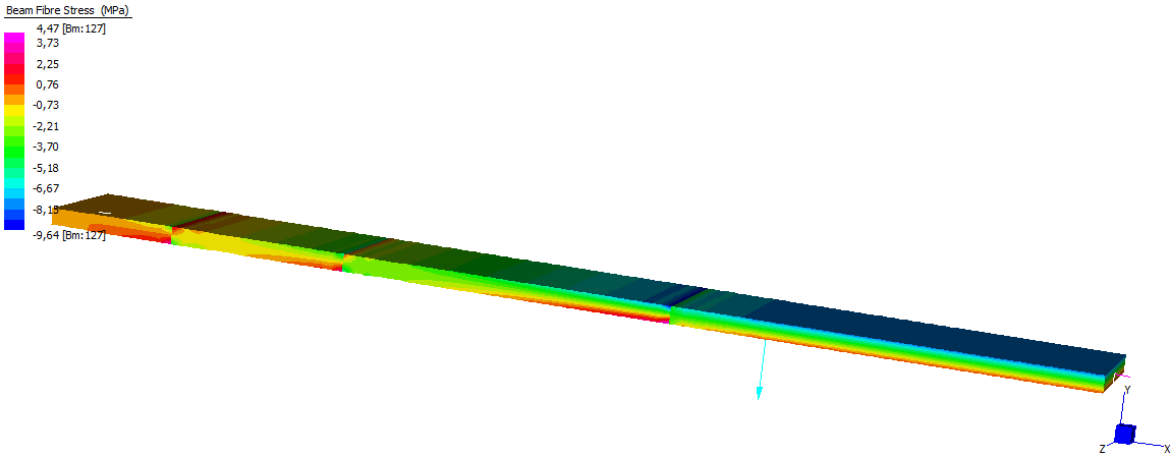
Progib i naprezanja se dobivaju za kombinaciju djelovanja sile iz ispitivanja i vlastite težine nosača. Grafički prikazi se nalaze na slikama ispod.



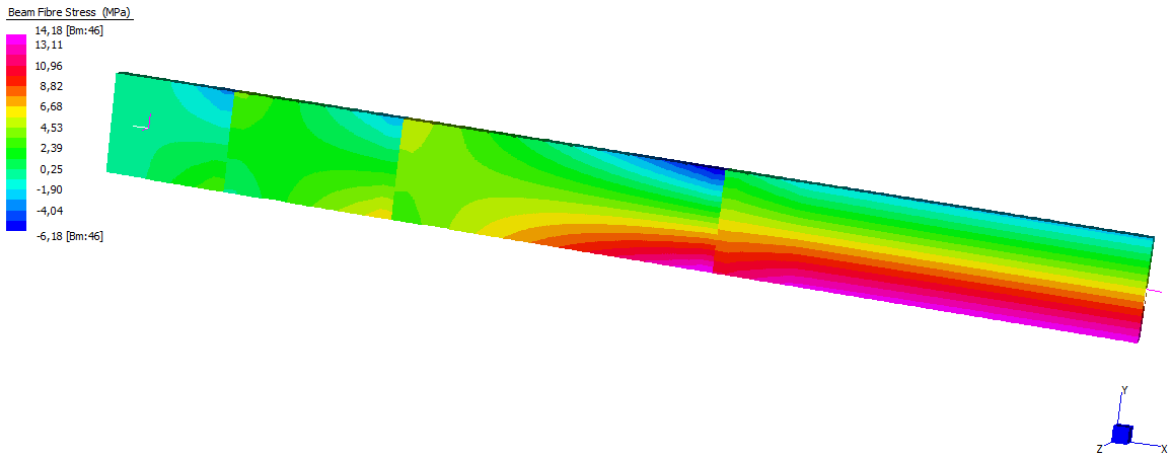
Slika 43. Progib grede A1 u y smjeru – model 1



Slika 44. Poprečne sile na spajala grede A1 – model 1



Slika 45. Naprezanja u betonskom dijelu grede A1 – model 1

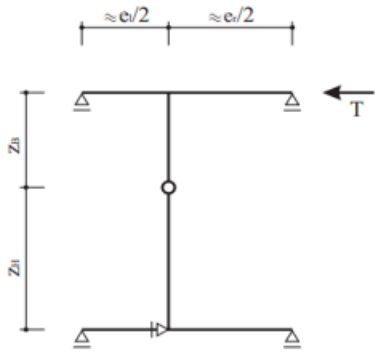


Slika 46. Naprezanja u drvenom dijelu grede A1 – model 1

3.2.2. Greda A1 – model A1 – 2

Razlika između modela 1 i modela 2 je jer se u modelu 1 ne uzima u obzir krutost spajala, a u modelu 2 da, formula koja se koristi za dobivanje krutosti je također prikazana na slici 26., a postupak je prikazan idući.

ŠTAPNI MODEL 2



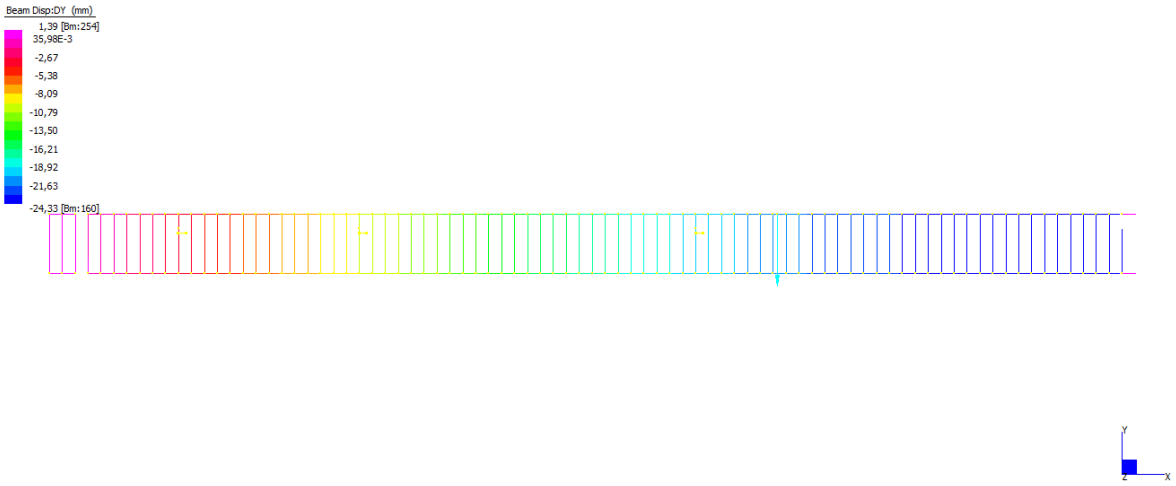
$$EI^{*} = \frac{z_B^{\,3} + z_H^{\,3}}{\frac{3}{K_S} - \frac{e_l^{\,3} + e_r^{\,3}}{2\cdot(e_l + e_r)^2}\cdot\left(\frac{z_B^{\,2}}{E_B\cdot I_B} + \frac{z_H^{\,2}}{E_H\cdot I_H}\right)}$$

Sudjelujuće duljine nosivosti spajala

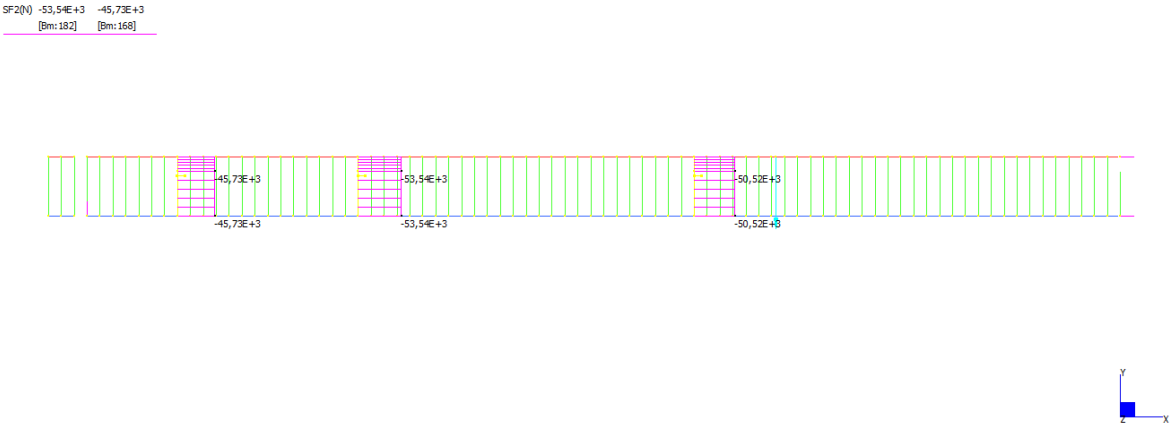
lijevo [mm]	desno [mm]
350	350
350	650
650	1650

Krutost spojeva za štapni model 2

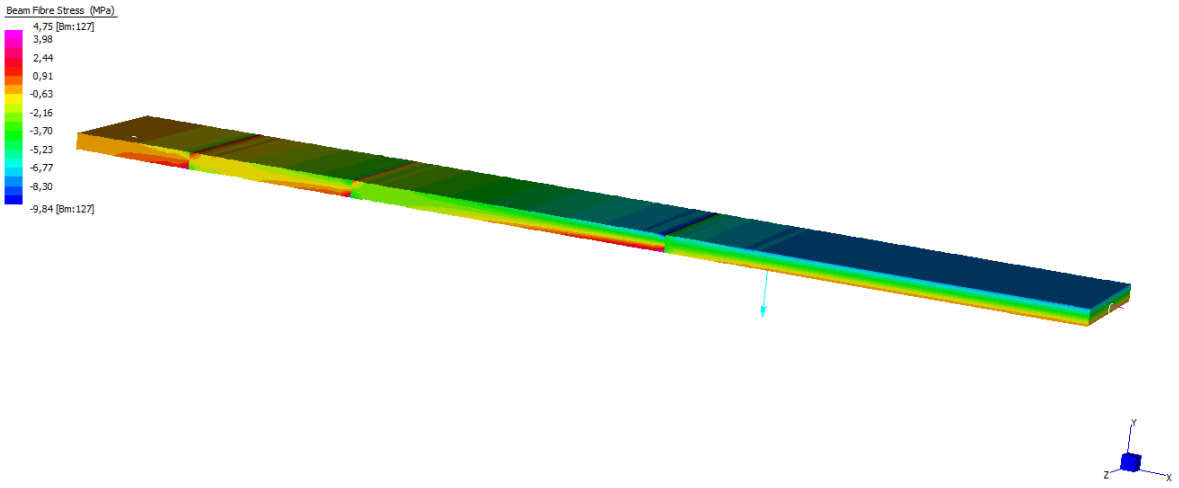
$(EI)_2$	3,16641E+11	Nmm²
	3,29049E+11	Nmm²
	3,91951E+11	Nmm²



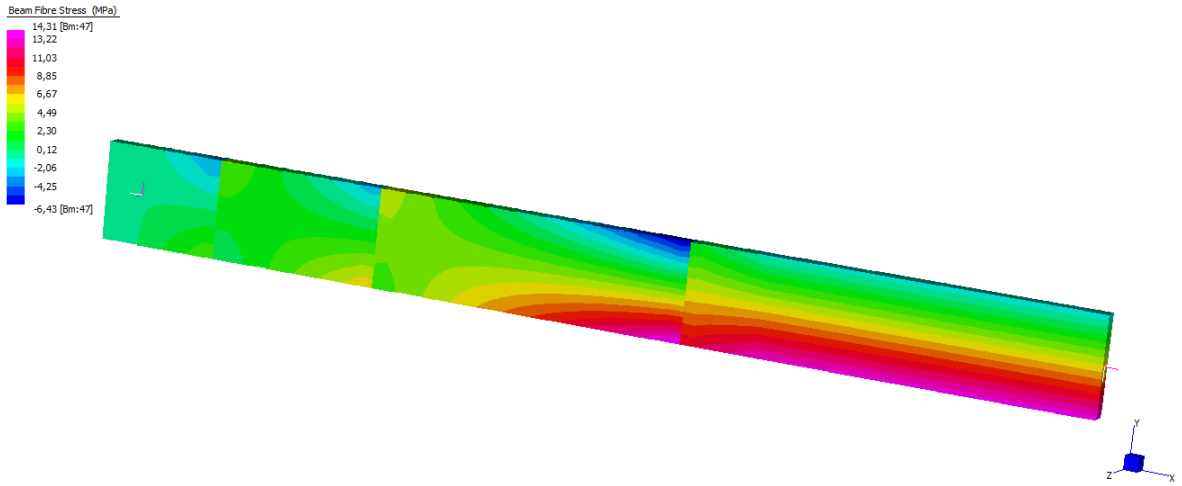
Slika 47. Progib grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2



Slika 48. Poprečne sile na spajala grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2



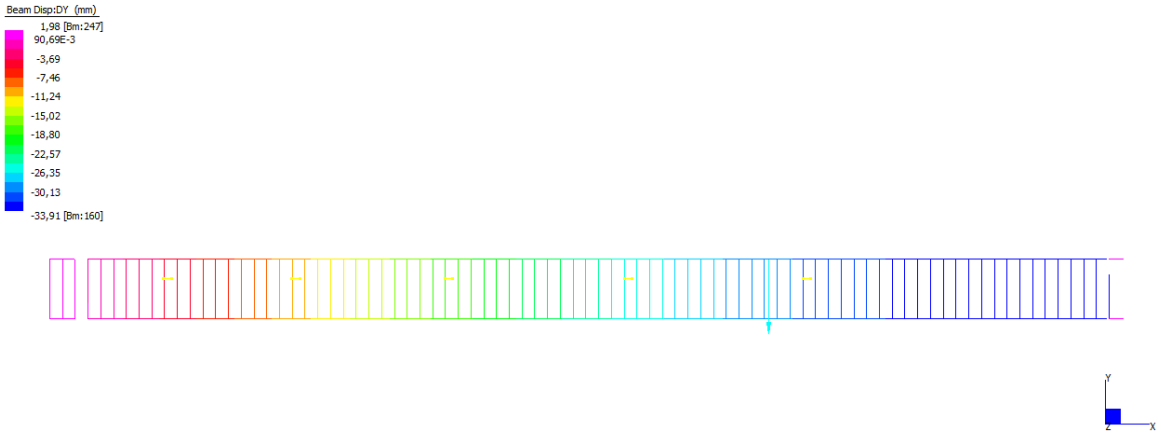
Slika 49. Naprezanja u betonskom dijelu grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2



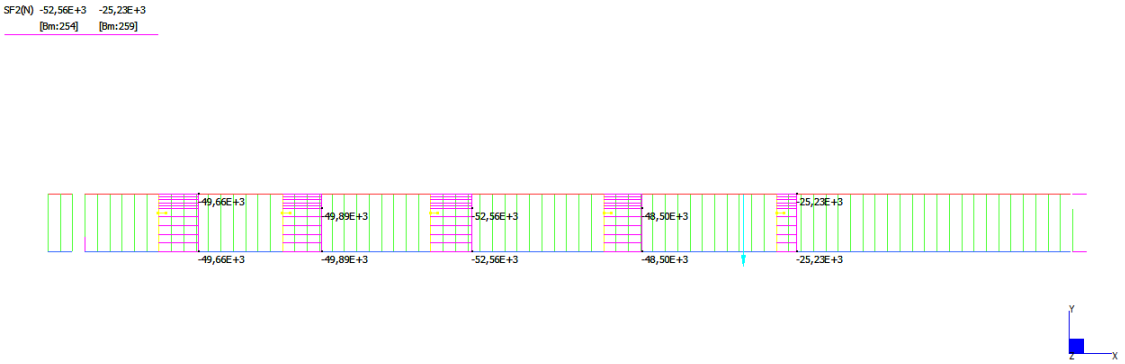
Slika 50. Naprezanja u drvenom dijelu grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2

3.2.3. Greda B1 – model B1 – 1

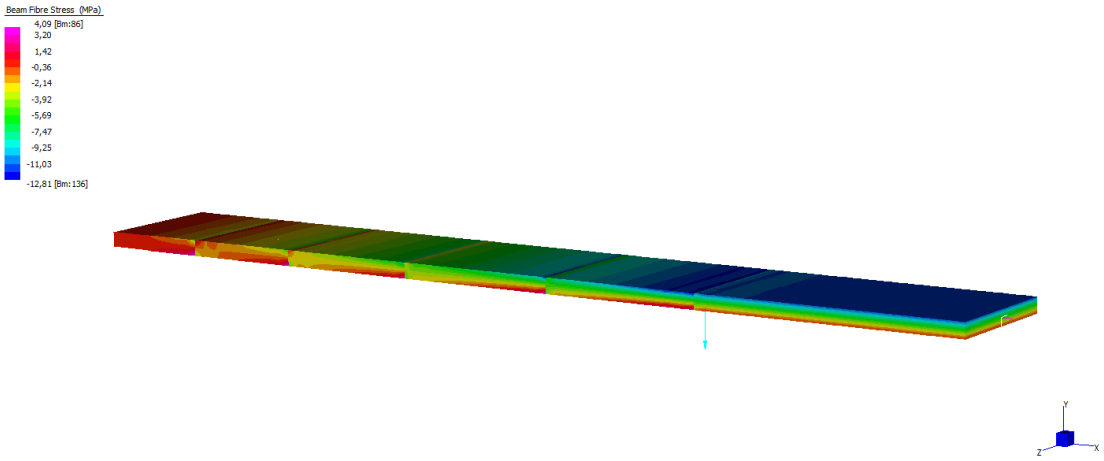
Skica polovice grede se vidi na slici 37., ova greda ima 10 spajala pa se s tim rasporedom pretpostavlja slom u elementu, ostale dimenzije su iste kao i kod grede A1. Krutost spajala za štapni model 1 je ista kao i za gredu A1.



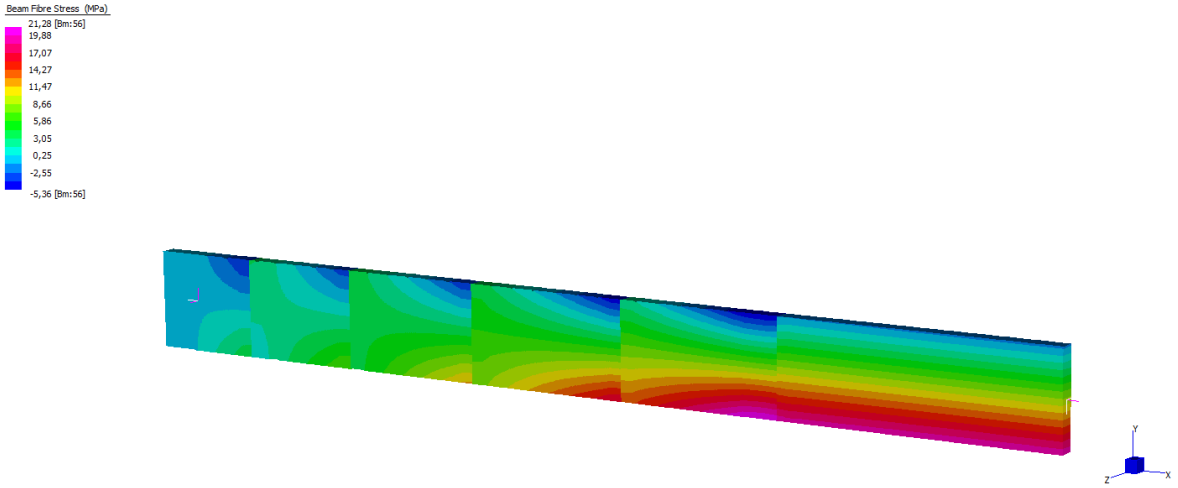
Slika 51. Progib grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1



Slika 52. Poprečne sile na spajala grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1



Slika 53. Naprezanja u betonskom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1

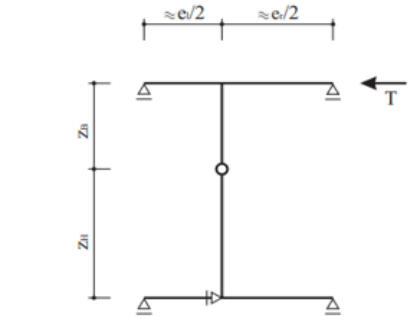


Slika 54. Naprezanja u drvenom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1

3.2.4. Greda B1 – model B1 – 2

Krutost svakog spajala za grebu B1 prikazana je ispod i različita je u odnosu na gredu A1 i njezin model 2 zbog toga što krutosti ovise o razmacima spajala.

ŠTAPNI MODEL 2



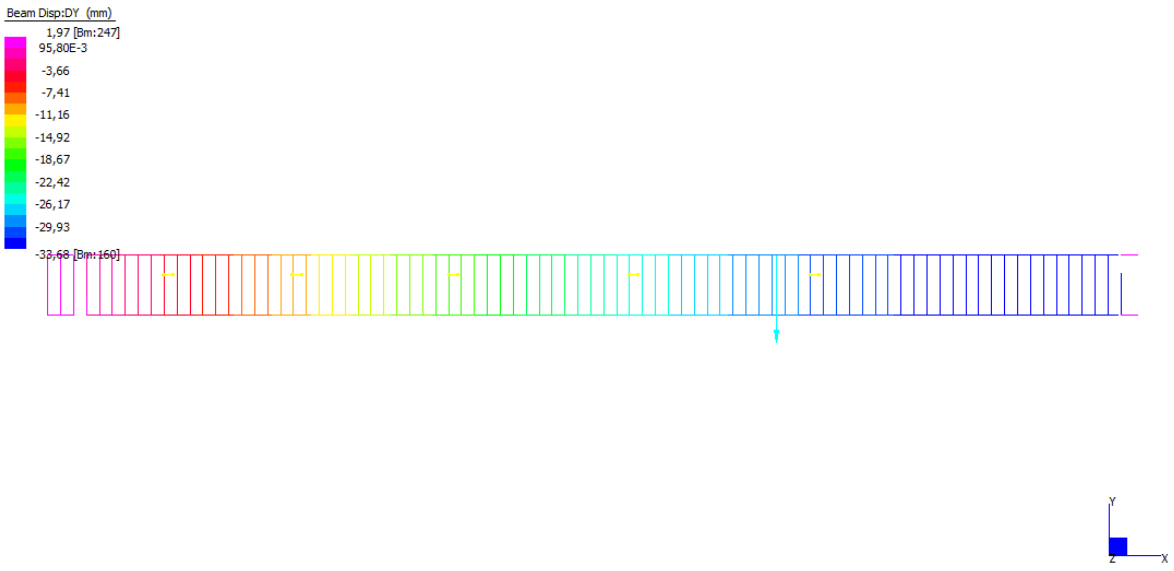
$$EI^{*} = \frac{z_B^{3} + z_H^{3}}{\frac{3}{K_S} - \frac{e_l^{3} + e_r^{3}}{2\cdot(e_l + e_r)^{2}} \cdot \left(\frac{z_B^{2}}{E_B \cdot I_B} + \frac{z_H^{2}}{E_H \cdot I_H} \right)}$$

Sudjelujuće duljine nosivosti spajala

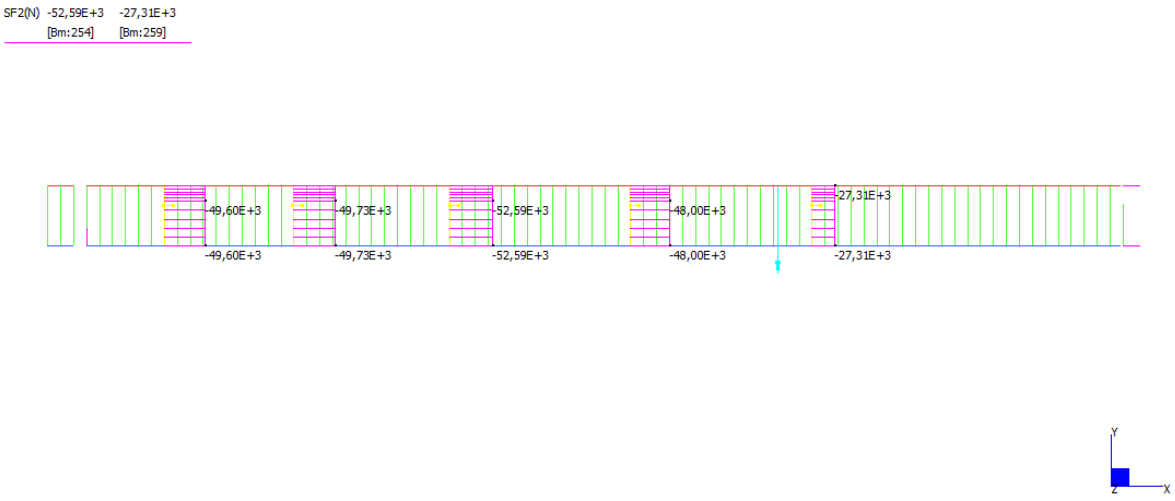
lijevo [mm]	desno [mm]
300	250
250	300
300	350
350	350
350	1200

Krutost spojeva za štapni model 2

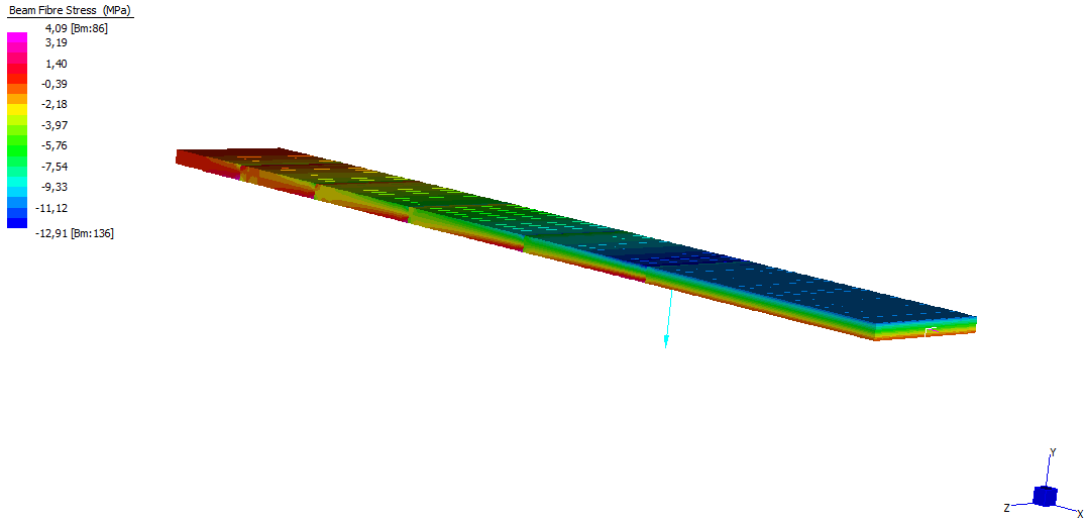
$(EI)_2$	3,1381E+11	Nmm²
	3,1381E+11	Nmm²
	3,15837E+11	Nmm²
	3,16641E+11	Nmm²
	3,7197E+11	Nmm²



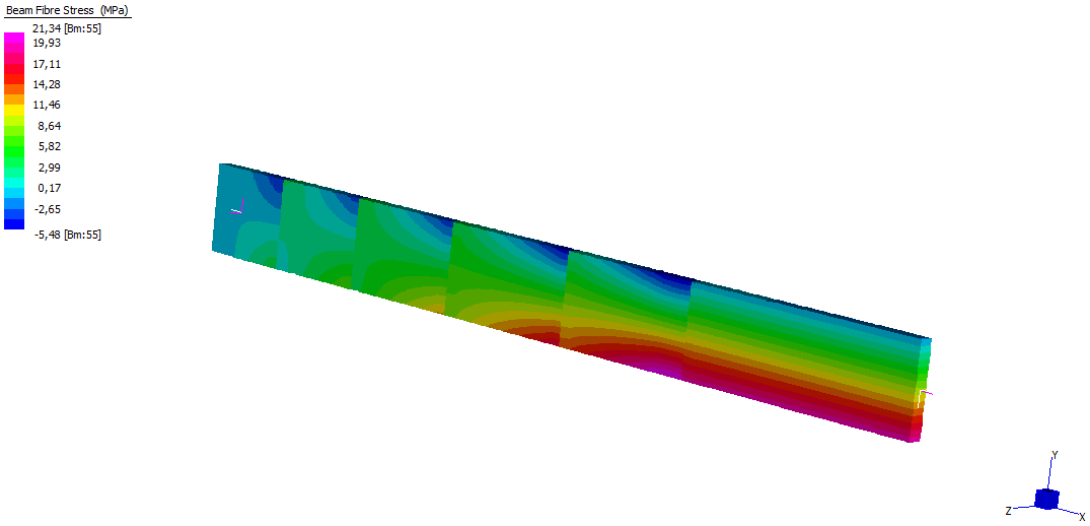
Slika 55. Progib grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2



Slika 56. Poprečne sile na spajala grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2



Slika 57. Naprezanja u betonskom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2



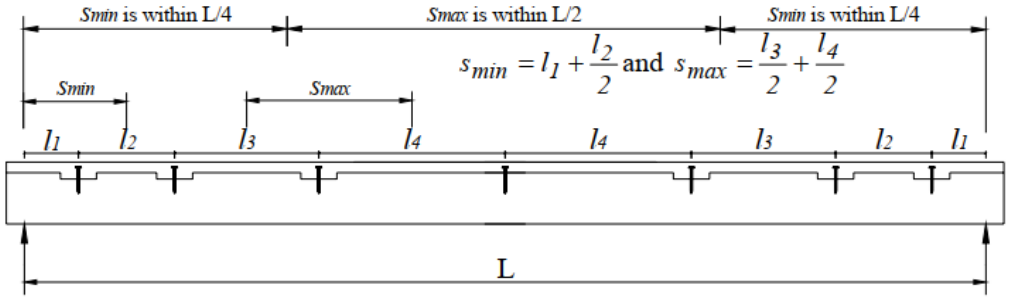
Slika 58. Naprezanja u drvenom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2

3.3. Analitička γ – metoda

3.3.1. Greda A1

Ulazni podaci za analitički proračun su dani u tablici 9.

Maksimalni i najmanji razmak spajala su dobiveni prema slici 59.



Slika 59. Preporuka za razmake spajala [9]

Tablica 9. Ulazni podaci za gredu i spajala A1

1. Osnovne informacije			
1.1. Dimenzije poprečnog presjeka i svojstva materijala			
1.1.1. Betonski dio presjeka			
Širina	b_1	600	mm
Visina	h_1	65	mm
Površina	$A_1 = b_1 * h_1$	39000	mm²
Moment inercije	$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$	13731250	mm⁴
Modul elastičnosti betona	E_1	33400	MPa
Karakteristična tlačna čvrstoća	$f_{c,k}$	35	N/mm²
Karakteristična vlačna čvrstoća	$f_{t,k}$	2,2	N/mm²
Gustoća	ρ_1	2405	kg/m³
Specifična težina	γ_1	24,05	kN/m³
1.1.2. Drevni dio presjeka			
Širina	b_2	63	mm
Visina	h_2	400	mm
Površina	$A_2 = b_2 * h_2$	25200	mm²
Moment inercije	$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12}$	336000000	mm⁴
Modul elastičnosti drva	E_2	10700	MPa
Karakteristična čvrstoća na savijanje	$f_{m,k}$	48	N/mm²
Karakteristična vlačna čvrstoća	$f_{t,0,k}$	33	N/mm²
Karakteristična tlačna čvrstoća	$f_{c,0,k}$	45	N/mm²
Karakteristična posmična čvrstoća	$f_{v,k}$	5,3	N/mm²
Gustoća	ρ_2	580	kg/m³
Specifična težina	γ_2	5,8	kN/m³
1.1.3. Međusloj			
Šperploča	h_3	17	mm
1.1.4. Svojstva spoja - Zasjek + spajalo			
Modul klizanja za GSN	$K_{s0,6}$	102	kN/mm
Moul klizannja za GSU	$K_{s0,4}$	113	kN/mm
Maksimalni razmak spajala	s_{max}	1475	mm
Minimalni razmak spajala	s_{min}	700	mm
Razmak spoja	$s_{ef} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max}$	893,75	mm
1.1.5. Opterećenje			
Raspon	L	8000	mm
Statički sistem - slobodno oslonjena greda			
Eksperimentalno određena sila sloma	2Pc	87,30	kN
Eksp. Sila za provjeru GSU (slom u spajalu)	$2P_s = 0{,}354 \cdot (2 \cdot P_c)$	30,90	kN
Eksp. Sila za provjeru GSN (slom u elementu)	$2P_u = 0{,}531 \cdot (2 \cdot P_c)$	46,36	kN
Eksp. Sila GSU na trećini nosača (L/3)	P_s	15,45	kN
Eksp. Sila GSN na trećini nosača (L/3)	P_u	23,18	kN
Trećina nosača	L/3	2666,67	mm
Vlastita vrijednost težina nosača	$g_{0,k}$	1,08	kN/m
Proračunski moment savijanja GSU	M_{ed}	50794160,00	Nmm
Proračunska vertikalna sila na ležaju GSU	V_{ed}	25397,08	N

Da bi se mogla koristiti formula (1) potrebno je odrediti progibe za podatljivi, idealni i nespregnuti spoj. Također je potrebno odrediti ekvivalentno opterećenje za provjeru progiba pomoću γ metode iz uvjeta jednakih progiba koji glasi:

$$\frac{5 \cdot w_{eq} \cdot L^4}{384 \cdot EI_{ef}} = \frac{P_s \cdot \frac{L}{3} \cdot (3 \cdot L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2)}{24 \cdot EI_{ef}} \qquad (27)$$

Gdje je EI_{ef} – efektiva savojna krutost određena u idućem koraku.

Ekvivalentno opterećenje za provjeru progiba (Iz uvjeta jednakih progiba):

$$w_{eq} = \frac{384 \cdot EI_{ef}}{5 \cdot L^4} \cdot \frac{P_s \cdot \frac{L}{3} \cdot (3 \cdot L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2)}{24 \cdot EI_{ef}} \quad 5{,}27 \quad \text{N/mm}$$

Tablica 10. Proračun efektivne savojne krutosti za podatljivi spoj

PODATLJIVI SPOJ			
Modul klizanja	$K_{s0,4}$	113000	N/mm
γ faktor $\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{K_{s0,4} \cdot L^2}}$		0,39	
	γ_2	1	
2.1. Efektivna čvrstoća na savijanje podatljivog spoja			
$H = \frac{h_1 + h_2}{2} + h_3$		249,5	mm
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		162,45	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		87,05	mm
Efektivna čvrstoća na savijanje $EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,49825E+13	Nmm^2
Progib s podatljivim spojem $\delta_{ef} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_{ef}}$		22,60	mm

Tablica 11. Proračun efektivne savojne krutosti za nespregnuti spoj

NESPREGNUTI		
2.2. Efektivna čvrstoća na savijanje nespregnutog spoja		
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_o = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2$	4,05382E+12 Nmm²
Progib s nespregnutim spojem	$\delta_{nc} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_o}$	83,53 mm

Tablica 12. Proračun efektivne savojne krutosti za idealno spregnuti spoj

IDEALNO SPREGNUTI SPOJ		
γ faktor		
	γ_1	1
	γ_2	1
2.3. Efektivna čvrstoća na savijanje idealnog spoja		
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka	$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$	206,71 mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka	$a_1 = H - a_2$	42,79 mm
Čvrstoća na savijanje idealnog	$EI_\infty = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$	1,79603E+13 Nmm²
Progib s idealnim spojem	$\delta_{id} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_\infty}$	18,85 mm

Progib određen eksperimentalno:

Progib određen eksperimentalno	δeksp.	22,7 mm

Tablica 13. Učinak sprezanja za gredu A1

Učinak sprezanja (progib eksperimentalni)

$$Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{eksp}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$$

94,05 %

Učinak sprezanja (progib podatljivog)

$$Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{ef}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$$

94,21 %

Tablica 14. Naprezanja u gredi A1

2.4. Naprezanja

BETON

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 3,81 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,1} = \frac{0.5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 3,68 MPa

Naprezanja u gornjem dijelu betona -7,49 MPa

Naprezanja u donjem dijelu betona -0,13 MPa

DRVO

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 5,89 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,2} = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 7,26 MPa

0,33 ≤ 1

Tablica 15. Poprečne sile na spajala

2.5 Sile			
Osne udaljenosti spojeva od ležaja			
	x_1	350	mm
	x_2	1050	mm
	x_3	2350	mm
Poprečna sila na spoj 1			
	V_1	23174,84	N
	V_2	18730,35	N
	V_3	10476,30	N
Duljina na kojoj pojedini spoj preuzima silu			
	s_1	700	mm
	s_2	1000	mm
	s_3	1475	mm
Uzdužna sila koja djeluje poprečno na spoj			
$F_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot s_1}{EI_{ef}} \cdot V_{Ed}$	F_1	47427,17	N
	F_2	54759,36	N
	F_3	45176,47	N
Suma sila		147363,00	N

3.3.2. Greda B1

Geometrijske karakteristike su iste kao i za gredu A1.

Tablica 16. Ulazni podaci za spajala B1 i opterećenje

1.1.4. Svojstva spoja- Zasjek + spajalo			
Modul klizanja za GSN	$K_{s0,6}$	102	kN/mm
Moul klizanja za GSU	$K_{s0,4}$	113	kN/mm
Maksimalni razmak spajala	s_{max}	950	mm
Minimalni razmak spajala	s_{min}	550	mm
Razmak spoja	$s_{ef} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max}$	650	mm
1.1.5. Opterećenje			
Raspon	L	8000	mm
Statički sistem - slobodno oslonjena greda			
Eksperimentalno određena sila sloma	2Pc	105,00	kN
Eksp. Sila za provjeru GSU (slom u elementu)	$2P_s = 0{,}458 \cdot (2 \cdot P_c)$	48,09	kN
Eksp. Sila za provjeru GSN (slom u elementu)	$2P_u = 0{,}687 \cdot (2 \cdot P_c)$	72,14	kN
Eksp. Sila GSU na trećini nosača (L/3)	P_s	24,05	kN
Eksp. Sila GSN na trećini nosača (L/3)	P_u	36,07	kN
Trećina nosača	L/3	2666,67	mm
Vlastita vrijednost težina nosača	$g_{0,k}$	1,08	kN/m
Proračunski moment savijanja GSU	M_{ed}	74217768,89	Nmm
Proračunska vertikalna sila na ležaju GSU	V_{ed}	37108,88	N

Ekvivalentno opterećenje:

Ekvivalentno opterećenje za provjeru progiba (Iz uvjeta jednakih progiba)

$$w_{eq} = \frac{384 \cdot EI_{ef}}{5 \cdot L^4} \cdot \frac{P_s \cdot \frac{L}{3} \cdot \left(3 \cdot L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2\right)}{24 \cdot EI_{ef}} \qquad 8{,}19 \quad \text{N/mm}$$

Tablica 17. Proračun efektivne savojne krutosti za podatljivi spoj

PODATLJIVI SPOJ			
Modul klizanja	$K_{s0,4}$	113000	N/mm
γ faktor	$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{K \cdot l^2}}$	0,464	
	γ_2	1	
2.1. Efektivna čvrstoća na savijanje podatljivog spoja			
	H	249,5	mm
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka	$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$	172,52	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka	$a_1 = H - a_2$	76,98	mm
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$	1,56603E+13	Nmm²
Progib s podatljivim spojem	$\delta_{ef} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_{ef}}$	31,59	mm

Tablica 18. Proračun efektivne savojne krutosti za nespregnuti spoj

NESPREGNUTI			
2.2. Efektivna čvrstoća na savijanje nespregnutog spoja			
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_o = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2$	4,05382E+12	Nmm²
Progib s nespregnutim spojem	$\delta_{nc} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_o}$	122,05	mm

Tablica 19. Proračun efektivne savojne krutosti za idealno spregnuti spoj

IDEALNO SPREGNUTI		
γ faktor		
	γ_1	1
	γ_2	1
2.3. Efektivna čvrstoća na savijanje idealnog spoja		
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		206,71 mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		42,79 mm
Čvrstoća na savijanje idealnog $EI_\infty = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,79603E+13 Nmm²
Progib s idealnim spojem $\delta_{id} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_\infty}$		27,55 mm

Progib određen eksperimentalno:

Progib određen eksperimentalno	δeksp.	26,5 mm

Tablica 20. Učinak sprezanja za gredu B1

Učinak sprezanja (progib eksperimentalni) $Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{eksp}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$		101,11 %
Učinak sprezanja (progib podatljivog) $Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{ef}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$		95,72 %

Tablica 21. Naprezanja u gredi B1

2.4. Naprezanja		
BETON		
Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile		
$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$	5,65	MPa
Normalno naprezanje od momenta savijanja		
$\sigma_{m,1} = \frac{0.5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$	5,14	MPa
Naprezanja u gornjem dijelu betona	-10,80	MPa
Naprezanja u donjem dijelu betona	-0,51	MPa
DRVO		
Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile		
$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$	8,75	MPa
Normalno naprezanje od momenta savijanja		
$\sigma_{m,2} = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$	10,14	MPa
0,48 $\leq$	1	

Tablica 22. Poprečne sile na spajala

2.5 Sile			
Osne udaljenosti spojeva od ležaja			
	x_1	300	mm
	x_2	800	mm
	x_3	1400	mm
	x_4	2100	mm
	x_5	2800	mm
Poprečna sila na spoj 1			
	V_1	34325,72	N
	V_2	29687,11	N
	V_3	24120,77	N
	V_4	17626,72	N
	V_5	11132,67	N
Duljina na kojoj pojedini spoj preeuzima silu			
	s_1	550	mm
	s_2	550	mm
	s_3	650	mm
	s_4	700	mm
	s_5	950	mm
Uzdužna sila koja djeluje poprečno na spoj			
$F_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot s_1}{EI_{ef}} \cdot V_{Ed}$	F_1	56080,52	N
	F_2	48502,07	N
	F_3	46573,01	N
	F_4	36652,14	N
	F_5	31416,12	N
Suma sila		219223,87	N

3.4. Usporedba rezultata greda A1 i B1

Za gredu A1 razlika između eksperimentalnih rezultata progiba i analitičkih manja je od 1 %. Razlika između progiba štapnih modela ovisno o tome uzima li se krutost spajala u obzir ili ne manja je od 2 %. Razlika između rezultata dobivenih numerički i eksperimentalno iznosi oko 8 %. Dobiveni učinak sprezanja je u skladu s onim navedenim u radu [9].

Za gredu B1 razlika između eksperimentalnih i analitičkih rezultata je 16 %. Razlika između štapnih modela je 1 %, nešto veća nego kod grede A1, razlika između rezultata štapnih modela i onih dobivenih eksperimentalno je oko 21 %. I ovdje potvrđeno da je γ – metoda konzervativnija (na strani sigurnosti). U tablici 23. se nalazi pregled ovih napisanih podataka.

Analitički dobivena naprezanja u presjeku za beton i drvo u gredi B1 su veća nego za gredu A1.

Tablica 23. Usporedba rezultata za grede A1 i B1

Greda A1						
	Eksperimentalno	Analitički			Štapni model	
		Podatljivi	Idealni	Nespregnuti	Model A1 - 1	Model A1 - 2
Progib, δ [mm]	22,70	22,60	18,85	83,53	24,84	24,33
Učinak sprezanja	94,21%					
Greda B1						
	Eksperimentalno	Analitički			Štapni model	
		Podatljivi	Idealni	Nespregnuti	Model B1 - 1	Model B1 - 2
Progib, δ [mm]	26,50	31,59	27,55	122,05	33,91	33,68
Učinak sprezanja	95,72%					

3.5. Priprema za ispitivanje

Kao zadatak ovog rada potrebno je napraviti i pripremu za ispitivanje kompozitnih nosača te prirediti proračunsku proceduru. Prilikom sastavljanja modela za ispitivanje potrebno ga je dimenzionirati, što se radi uz pomoć γ metode. Za slom u drvu vrijedi formula [5]:

$$\frac{\sigma_m}{f_m} + \frac{\sigma_t}{f_t} \leq 1 \tag{28}$$

Gdje je:

σ_m – proračunsko naprzanje od savijanja

σ_t – proračunsko naprezanje od osne sile

f_m – proračunska čvrstoća na savijanje

f_t – proračunska vlačna čvrstoća paralelno s vlakancima

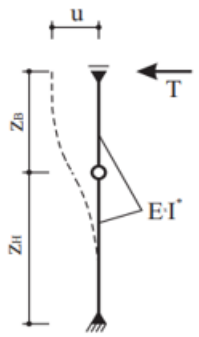
Formula (29) će se koristiti kod određivanja sile sloma koja je u prethodnim primjerima grede A1 i B1 bila određena eksperimentalno. Proračunski postupak se nalazi u nastavku.

3.5.1. Greda X1 – zasjek 150x60x63 mm

Greda, naziva npr. X1, je zamišljena samo sa zasjecima dimenzije 150*50*63, za takve spojeve je poznat modul klizanja iz literature [9], radi se o spoju B1 iz tablice 5. Proračun je isti kao i za grede A1 i B1 osim dijela sa silom koja djeluje na sustav.

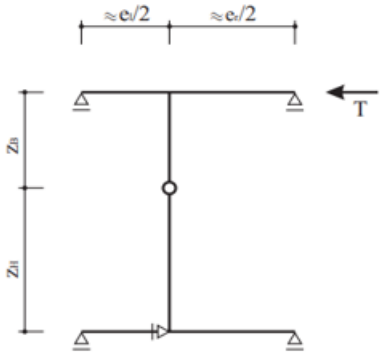
Radi usporedbe s dolje analitičkim vrijednostima, napravljeni su štapni modeli, krutosti spajala iznose:

ŠTAPNI MODEL 1



$$EI^* = \frac{K_S}{3} \cdot \left(z_B{}^3 + z_H{}^3 \right)$$

ŠTAPNI MODEL 2



$$EI^* = \frac{z_B{}^3 + z_H{}^3}{\frac{3}{K_S} - \frac{e_l{}^3 + e_r{}^3}{2 \cdot (e_l + e_r)^2} \cdot \left(\frac{z_B{}^2}{E_B \cdot I_B} + \frac{z_H{}^2}{E_H \cdot I_H} \right)}$$

zb	52,5	mm
zh	200	mm

Krutost spoja za štapni model 1

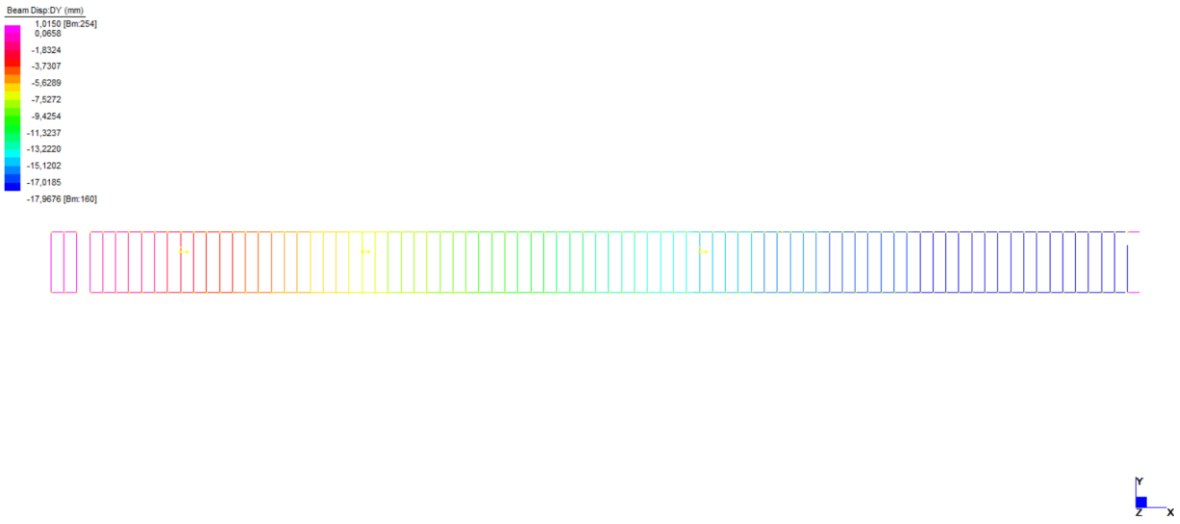
$(EI)_1$	2,851E+11	Nmm²

Sudjelujuće duljine nosivosti spajala

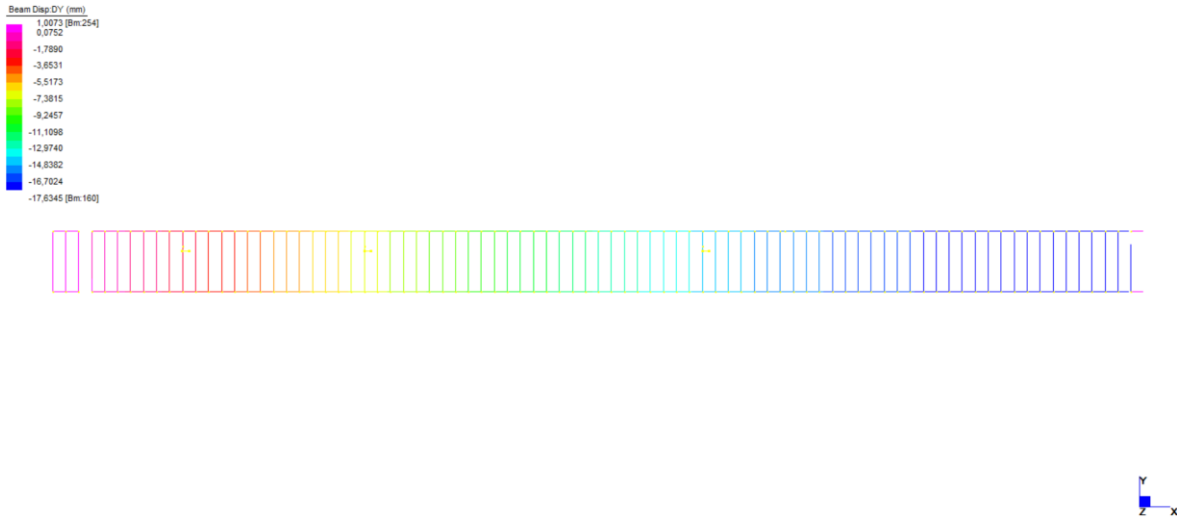
lijevo [mm]	desno [mm]
350	350
350	650
650	1650

Krutost spojeva za štapni model 2

$(EI)_2$	3,009E+11	Nmm²
	3,151E+11	Nmm²
	3,906E+11	Nmm²



Slika 60. Progibi za gredu X1 – model 1



Slika 61. Progibi za gredu X1 – model 2

Proračun za GSU opterećenje u nastavku.

1.1.4. Svojstva spoja- Zasjek			
Modul klizanja za GSN	$K_{s0,6}$	59,3	kN/mm
Moul klizanja za GSU	$K_{s0,4}$	105	kN/mm
Maksimalni razmak spajala	s_{max}	1475	mm
Minimalni razmak spajala	s_{min}	700	mm
Razmak spoja	$s_{ef} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max}$	893,75	mm
1.1.5. Opterećenje			
Raspon	L	8000	mm
Statički sistem - slobodno oslonjena greda			
Eksperimentalno određena sila sloma	2Pc	57594,02	N
Eksp. Sila za provjeru GSU (slom u spajalu)	$2P_s = 0{,}354 \cdot (2 \cdot P_c)$	20388,28	N
Eksp. Sila za provjeru GSN (slom u spajalu)	$2P_u = 0{,}531 \cdot (2 \cdot P_c)$	30582,43	N
Eksp. Sila GSU na trećini nosača (L/3)	P_s	10194,14	N
Eksp. Sila GSN na trećini nosača (L/3)	P_u	15291,21	N
Trećina nosača	L/3	2666,67	mm
Vlastita vrijednost težina nosača	$g_{0,k}$	1,08	kN/m
Proračunski moment savijanja GSU	M_{ed}	36461356,99	Nmm
Proračunska vertikalna sila na ležaju GSU	V_{ed}	18230,68	N
Kontinuirana sila sloma	w_{slom}	19,20	Nmm
Ekvivalentno opterećenje za provjeru progiba (Iz uvjeta jednakih progiba)			
$w_{eq} = \frac{384 \cdot EI_{ef}}{5 \cdot L^4} \cdot \frac{P_s \cdot \frac{L}{3} \cdot (3 \cdot L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2)}{24 \cdot EI_{ef}}$		3,47	N/mm

PODATLJIVI SPOJ			
Modul klizanja	$K_{s0,4}$	105000	N/mm
γ faktor			
$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{K \cdot l^2}}$		0,369	
	γ_2	1	
2.1. Efektivna čvrstoća na savijanje podatljivog spoja			
	H	249,5	mm
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		159,84	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		89,66	mm
Efektivna čvrstoća na savijanje $EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,4807E+13	Nmm²
Progib s podatljivim spojem $\delta_{ef} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_{ef}}$		16,42	mm

NESPREGNUTI			
2.2. Efektivna čvrstoća na savijanje nespregnutog spoja			
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_o = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2$	4,0538E+12	Nmm²
Progib s nespregnutim spojem $\delta_{nc} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_o}$		59,96	mm

IDEALNO SPREGNUTI			
γ faktor			
	γ_1	1	
	γ_2	1	
2.3. Efektivna čvrstoća na savijanje idealnog spoja			
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		206,71	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		42,79	mm
Čvrstoća na savijanje idealnog $EI_\infty = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,796E+13	Nmm^2
Progib s idealnim spojem $\delta_{id} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_\infty}$		13,53	mm

Učinak sprezanja (progib podatljivog) $Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{ef}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$	93,79	%

2.4. Naprezanja

BETON

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 2,72 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,1} = \frac{0.5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 2,67 MPa

Naprezanja u gornjem dijelu betona -5,39 MPa

Naprezanja u donjem dijelu betona -0,05 MPa

DRVO

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 4,21 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,2} = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 5,27 MPa

0,24 ≤ 1

2.5 Sile

Osne udaljenosti spojeva od ležaja

x_1	350	mm
x_2	1050	mm
x_3	2350	mm

Poprečna sila na spoj 1

V_1	16635,49	N
V_2	13445,13	N
V_3	7520,15	N

Duljina na kojoj pojedini spoj preuzima silu

s_1	700	mm
s_2	1000	mm
s_3	1475	mm

Uzdužna sila koja djeluje poprečno na spoj

$$F_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot s_1}{EI_{ef}} \cdot V_{Ed}$$

F_1	33894,82	N
F_2	39134,92	N
F_3	32286,31	N

Suma sila 105316,06 N

Proračun za GSN opterećenje u nastavku.

1.1.4. Svojstva spoja- Zasjek			
Modul klizanja za GSN	$K_{s0,6}$	59,3	kN/mm
Moul klizanja za GSU	$K_{s0,4}$	105	kN/mm
Maksimalni razmak spajala	s_{max}	1475	mm
Minimalni razmak spajala	s_{min}	700	mm
Razmak spoja	$s_{ef} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max}$	893,75	mm
1.1.5. Opterećenje			
Raspon	L	8000	mm
Statički sistem - slobodno oslonjena greda			
Eksperimentalno određena sila sloma	2Pc	55837,28	N
Eksp. Sila za provjeru GSU (slom u spajalu)	$2P_s = 0{,}354 \cdot (2 \cdot P_c)$	19766,40	N
Eksp. Sila za provjeru GSN (slom u spajalu)	$2P_u = 0{,}531 \cdot (2 \cdot P_c)$	29649,59	N
Eksp. Sila GSU na trećini nosača (L/3)	P_s	9883,20	N
Eksp. Sila GSN na trećini nosača (L/3)	P_u	14824,80	N
Trećina nosača	L/3	2666,67	mm
Vlastita vrijednost težina nosača	$g_{0,k}$	1,08	kN/m
Proračunski moment savijanja GSU	M_{ed}	49084179,04	Nmm
Proračunska vertikalna sila na ležaju GSU	V_{ed}	24542,09	N
Kontinuirana sila sloma	w_{slom}	18,61	Nmm
Ekvivalentno opterećenje za provjeru progiba (Iz uvjeta jednakih progiba)			
$w_{eq} = \frac{384 \cdot EI_{ef}}{5 \cdot L^4} \cdot \frac{P_u \cdot \frac{L}{3} \cdot (3 \cdot L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2)}{24 \cdot EI_{ef}}$		5,05	N/mm

PODATLJIVI SPOJ			
Modul klizanja	$K_{s0,6}$	59300	N/mm
γ faktor			
$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{K \cdot l^2}}$		0,248	
	γ_2	1	
2.1. Efektivna čvrstoća na savijanje podatljivog spoja			
	H	249,5	mm
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka			
$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		136,06	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka			
$a_1 = H - a_2$		113,44	mm
Efektivna čvrstoća na savijanje			
$EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,3207E+13	Nmm²
Progib s podatljivim spojem			
$\delta_{ef} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_{ef}}$		24,78	mm

NESPREGNUTI			
2.2. Efektivna čvrstoća na savijanje nespregnutog spoja			
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_o = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2$	4,0538E+12	Nmm²
Progib s nespregnutim spojem			
$\delta_{nc} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_o}$		80,72	mm

IDEALNO SPREGNUTI		
γ faktor		
	γ_1	1
	γ_2	1
2.3. Efektivna čvrstoća na savijanje idealnog spoja		
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		206,71 mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		42,79 mm
Čvrstoća na savijanje idealnog $EI_\infty = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,796E+13 Nmm²
Progib s idealnim spojem $\delta_{id} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_\infty}$		18,22 mm

Učinak sprezanja (progib podatljivog) $Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{ef}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$		89,51 %

2.4. Naprezanja

BETON

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 3,50 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,1} = \frac{0.5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 4,03 MPa

Naprezanja u gornjem dijelu betona -7,53 MPa

Naprezanja u donjem dijelu betona 0,54 MPa

DRVO

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 5,41 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,2} = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 7,95 MPa

0,33 ≤ 1

2.5 Sile

Osne udaljenosti spojeva od ležaja

x_1	350	mm
x_2	1050	mm
x_3	2350	mm

Poprečna sila na spoj 1

V_1	22394,66	N
V_2	18099,79	N
V_3	10123,61	N

Duljina na kojoj pojedini spoj preuzima silu

s_1	700	mm
s_2	1000	mm
s_3	1475	mm

Uzdužna sila koja djeluje poprečno na spoj

$$F_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot s_1}{EI_{ef}} \cdot V_{Ed}$$

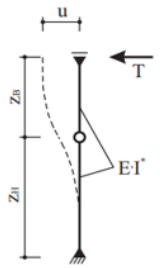
F_1	43545,83	N
F_2	50277,97	N
F_3	41479,32	N

Suma sila 135303,13 N

3.5.2. Greda X2 – trn φ12

Za spajala u gredi X2 su korišteni trnovi, na istim razmacima kao i razmaci u gredi X1. Za trnove u ovom slučaju nije poznata vrijednost modula klizanja, ali ona je određena prema tablici 1. čija dvostruka vrijednost označava pravi modul klizanja za TC kompozite. Vrijednost modula klizanja za GSN je dobivena kao 2/3 te vrijednosti. Kako je prethodno utvrđeno da su razlike između modela 1 i 2 neznatne, za ovaj primjer se koristio samo model 1 odnosno onaj koji ne uzima obzir krutost svih spajala. Na slici 62. je progib modela s 6 trnova, a na slici 63. je progib modela s 10 trnova.
Krutosti spajala:

ŠTAPNI MODEL 1

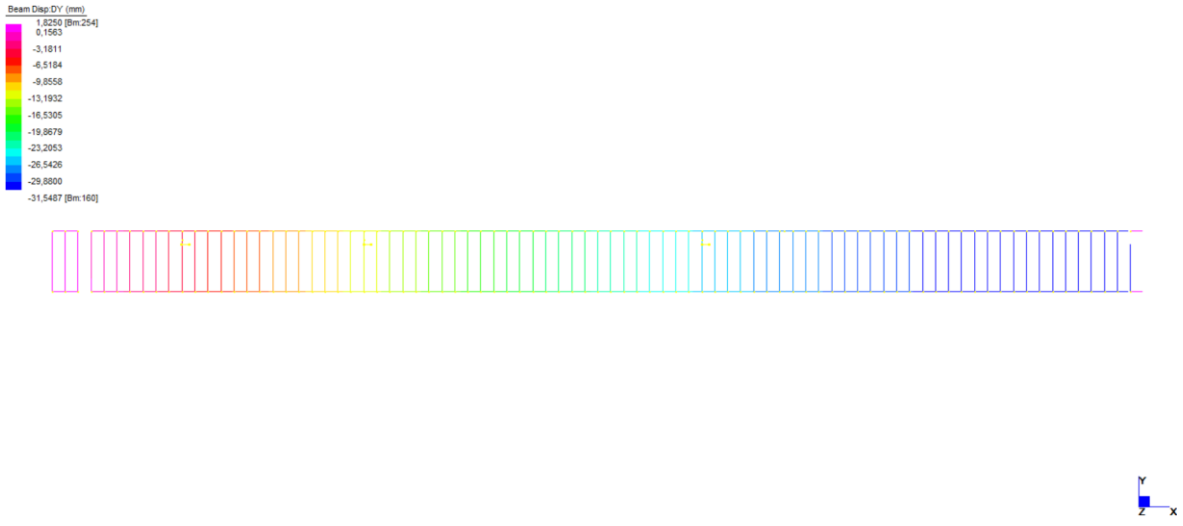


$$EI^* = \frac{K_S}{3} \cdot \left(z_B^{\ 3} + z_H^{\ 3} \right)$$

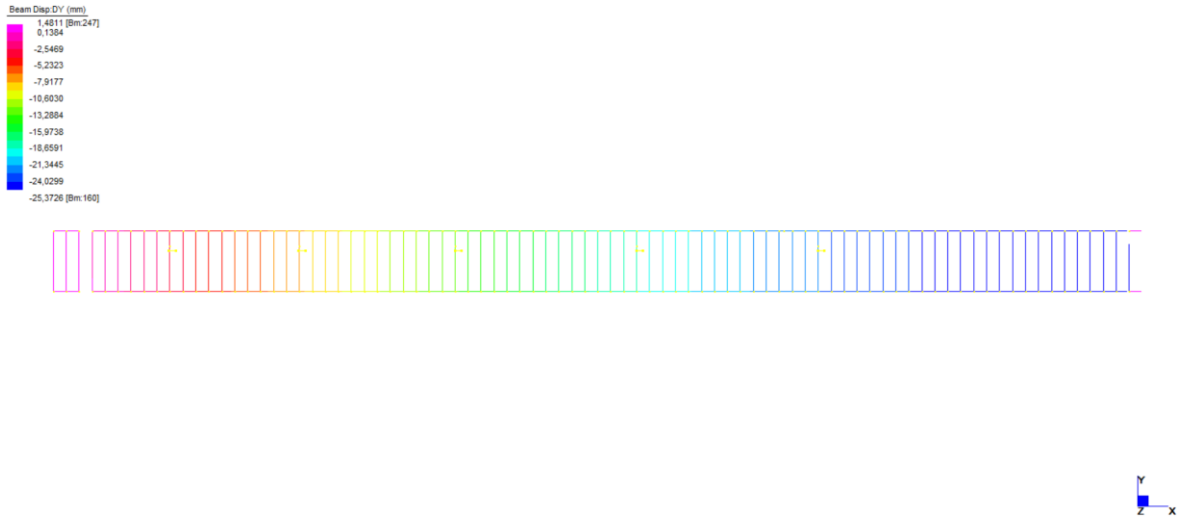
zb	32,5 mm
zh	200 mm

Krutost spoja za štapni model 1

$(EI)_1$ 1,952E+10 Nmm²



Slika 62. Progibi za gredu X2 (6*12) – model 1



Slika 63. Progibi za gredu X2 10*φ12 – model 1

Postupak proračuna za GSU opterećenje u nastavku.

1.1.4. Svojstva spoja- Zasjek			
Promjer trna	d	12	mm
Modul klizanja za GSN	(2/3)Ks	4858,52164	N/mm
Moul klizanja za GSU	2*Ks	7287,78246	N/mm
Maksimalni razmak spajala	Smax	1475	mm
Minimalni razmak spajala	Smin	700	mm
Razmak spoja	$s_{ef} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max}$	893,75	mm
1.1.5. Opterećenje			
Raspon	L	8000	mm
Statički sistem - slobodno oslonjena greda			
Eksperimentalno određena sila sloma	2Pc	43863,85	N
Eksp. Sila za provjeru GSU (slom u spajalu)	$2P_s = 0{,}354 \cdot (2 \cdot P_c)$	15527,80	N
Eksp. Sila za provjeru GSN (slom u spajalu)	$2P_u = 0{,}531 \cdot (2 \cdot P_c)$	23291,70	N
Eksp. Sila GSU na trećini nosača (L/3)	Ps	7763,90	N
Eksp. Sila GSN na trećini nosača (L/3)	Pu	11645,85	N
Trećina nosača	L/3	2666,67	mm
Vlastita vrijednost težina nosača	g0,k	1,08	kN/m
Proračunski moment savijanja GSU	Med	29836698,33	Nmm
Proračunska vertikalna sila na ležaju GSU	Ved	14918,35	N
Kontinuirana sila sloma	wslom	14,62	Nmm
Ekvivalentno opterećenje za provjeru progiba (Iz uvjeta jednakih progiba)			
$w_{eq} = \frac{384 \cdot EI_{ef}}{5 \cdot L^4} \cdot \frac{P_s \cdot \frac{L}{3} \cdot (3 \cdot L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2)}{24 \cdot EI_{ef}}$		2,65	N/mm

PODATLJIVI SPOJ			
Modul klizanja	2*Ks	7287,78246	N/mm
γ faktor	$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{K \cdot l^2}}$	0,039	
	γ2	1	
2.1. Efektivna čvrstoća na savijanje podatljivog spoja			
	H	249,5	mm
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka	$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$	39,56	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka	$a_1 = H - a_2$	209,94	mm
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$	6,7154E+12	Nmm²
Progib s podatljivim spojem	$\delta_{ef} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_{ef}}$	29,62	mm

NESPREGNUTI			
2.2. Efektivna čvrstoća na savijanje nespregnutog spoja			
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_o = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2$	4,0538E+12	Nmm²
Progib s nespregnutim spojem	$\delta_{nc} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_o}$	49,07	mm

IDEALNO SPREGNUTI			
γ faktor			
	γ_1	1	
	γ_2	1	
2.3. Efektivna čvrstoća na savijanje idealnog spoja			
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		206,71	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		42,79	mm
Čvrstoća na savijanje idealnog $EI_\infty = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,796E+13	Nmm^2
Progib s idealnim spojem $\delta_{id} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_\infty}$		11,08	mm

Učinak sprezanja (progib podatljivog)

$$Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{ef}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$$

51,19 %

2.4. Naprezanja

BETON

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 1,22 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,1} = \frac{0.5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 4,82 MPa

Naprezanja u gornjem dijelu betona -6,04 MPa

Naprezanja u donjem dijelu betona 3,61 MPa

DRVO

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 1,88 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,2} = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 9,51 MPa

0,26 ≤ 1

2.5 Sile

Osne udaljenosti spojeva od ležaja

x_1	350	mm
x_2	1050	mm
x_3	2350	mm

Poprečna sila na spoj 1

V_1	13612,99	N
V_2	11002,28	N
V_3	6153,82	N

Duljina na kojoj pojedini spoj preuzima silu

s_1	700	mm
s_2	1000	mm
s_3	1475	mm

Uzdužna sila koja djeluje poprečno na spoj

$$F_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot s_1}{EI_{ef}} \cdot V_{Ed}$$

F_1	15137,30	N
F_2	17477,51	N
F_3	14418,94	N

Suma sila 47033,75 N

Proračun za GSN opterećenje u nastavku, dio sa svojstvima je kompletno isti kao i za GSU.

Ekvivalentno opterećenje za provjeru progiba (Iz uvjeta jednakih progiba)

$$w_{eq} = \frac{384 \cdot EI_{ef}}{5 \cdot L^4} \cdot \frac{P_u \cdot \frac{L}{3} \cdot (3 \cdot L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2)}{24 \cdot EI_{ef}}$$ 3,76 N/mm

PODATLJIVI SPOJ			
Modul klizanja	(2/3)Ks	4858,52	N/mm
γ faktor $\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot s_{ef}}{K \cdot l^2}}$		0,026	
	γ2	1	
2.1. Efektivna čvrstoća na savijanje podatljivog spoja			
	H	249,5	mm
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		28,17	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		221,33	mm
Efektivna čvrstoća na savijanje $EI_{ef} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		5,9491E+12	Nmm²
Progib s podatljivim spojem $\delta_{ef} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_{ef}}$		43,40	mm

NESPREGNUTI			
2.2. Efektivna čvrstoća na savijanje nespregnutog spoja			
Efektivna čvrstoća na savijanje	$EI_o = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2$	4,0538E+12	Nmm²
Progib s nespregnutim spojem $\delta_{nc} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_o}$		63,69	mm

IDEALNO SPREGNUTI			
γ faktor			
	γ_1	1	
	γ_2	1	
2.3. Efektivna čvrstoća na savijanje idealnog spoja			
Udaljenost težišta drvenog dijela i težišta presjeka $a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot H}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}$		206,71	mm
Udaljenost težišta betonskog dijela i težišta presjeka $a_1 = H - a_2$		42,79	mm
Čvrstoća na savijanje idealnog $EI_\infty = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$		1,796E+13	Nmm^2
Progib s idealnim spojem $\delta_{id} = \frac{5 \cdot (w_{eq} + g_{0,k}) \cdot L^4}{384 \cdot EI_\infty}$		14,38	mm

Učinak sprezanja (progib podatljivog) $Učinak\ sprezanja = \frac{\delta_{nc} - \delta_{ef}}{\delta_{nc} - \delta_{id}} \cdot 100$	41,15	%

2.4. Naprezanja

BETON

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 1,27 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,1} = \frac{0.5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 7,07 MPa

Naprezanja u gornjem dijelu betona -8,33 MPa

Naprezanja u donjem dijelu betona 5,80 MPa

DRVO

Normalno naprezanje u betonu od uzdužne sile

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 1,96 MPa

Normalno naprezanje od momenta savijanja

$$\sigma_{m,2} = \frac{0.5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{EI_{ef}}$$ 13,93 MPa

0,35 ≤ 1

2.5 Sile

Osne udaljenosti spojeva od ležaja

x_1	350	mm
x_2	1050	mm
x_3	2350	mm

Poprečna sila na spoj 1

V_1	17670,42	N
V_2	14281,58	N
V_3	7988,00	N

Duljina na kojoj pojedini spoj preuzima silu

s_1	700	mm
s_2	1000	mm
s_3	1475	mm

Uzdužna sila koja djeluje poprečno na spoj

$$F_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot s_1}{EI_{ef}} \cdot V_{Ed}$$

F_1	15794,26	N
F_2	18236,04	N
F_3	15044,73	N

Suma sila 49075,04 N

3.5.3. Provjera nosivosti spajala

Smjernice za provjere nosivosti su dane u radu [1], [7] i u [5]. Nosivost spajala se provjerava preko formule:

$$\frac{F_{v.Ed}}{F_{v.Rd}} \leq 1 \tag{29}$$

Gdje je

$F_{v.Ed}$ – proračunsko opterećenje na spajalo

$F_{v.Rd}$ - proračunska nosivost spajala

Proračunske vrijednosti se množe s k_{mod} / γ_M. K_{mod} predstavlja koeficijent izmjene čvrstoće, a γ_M parcijalni koeficijent sigurnosti (za slom u drvu iznosi 1.3, a za slom u spajalu 1.1)

3.5.3.1. Trnovi

Za trnove i ostala štapasta spajala je navedeno u [36] da se za određivanje karakteristične nosivosti koriste Johansenovi modeli spojeve drvo – drvo s jednom posmičnom ravninom koje glase ovako:

$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \tag{30}$$

$$F_{v,Rk} = f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \tag{31}$$

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \tag{32}$$

$$F_{v,Rk} = 1{,}05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2+\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2+\beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot (t_1)^2}} - \beta \right] \tag{33}$$

$$F_{v,Rk} = 1{,}05 \cdot \frac{f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d}{1+2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1+2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot (t_2)^2}} - \beta \right] \tag{34}$$

$$F_{v,Rk} = 1{,}15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \tag{35}$$

Mjerodavna $F_{v,Rk}$ iz formula (31) – (36) je najmanja vrijednost.

$f_{h,1,k}$ – predstavlja karakterističnu čvrstoću po oplošju rupe i određuje se prema formuli:

$$f_{h,1,k} = 0{,}082 \cdot (1 - 0{,}01 \cdot d) \cdot \rho_d \quad (36)$$

Gdje je d – promjer spajala, a ρ_d- gustoća drva.

$M_{y,Rk}$- predstavlja karakteristični moment popuštanja spajala i određuje se prema formuli:

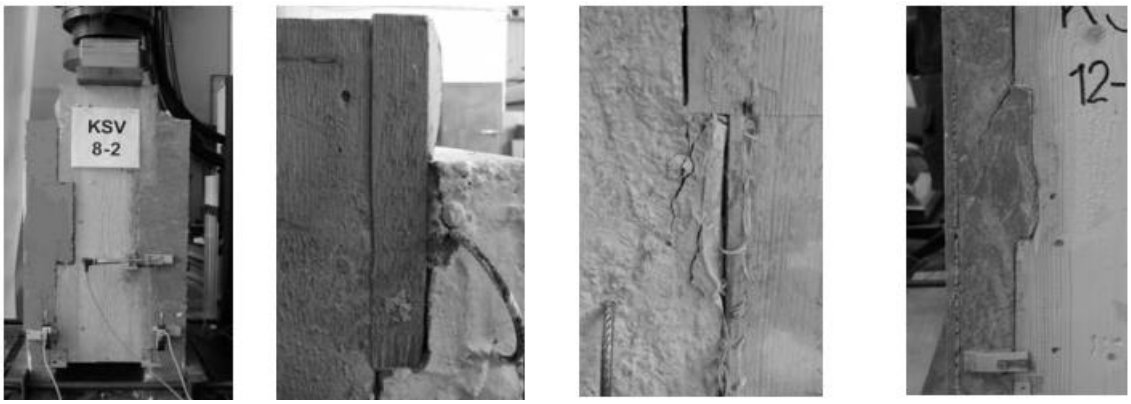
$$M_{y,Rk} - = 0{,}3 \cdot f_{h,1,k} \cdot d^{2,6} \quad (37)$$

β – je omjer čvrstoća ($f_{h,2,k}/f_{h,1,k}$)

t_1 i t_2 su dubine prodora spajala.

3.5.3.2. Zasjeci

Nešto o nosivosti zasječenih spojeva je spomenuto pod 2.3.2.2. u ovom radu, u nastavku detaljniji pristup. Na slici 64. su prikazani česti modeli sloma zasječenih spojeva i na temelju njih su izvedene formule u nastavku.



Slika 64. Opisi prikaza s lijeva na desno: (1) postavke testa (2) slom u drvu (3) tlačni slom betona (4) posmični slom betona [33]

Nosivost zasječenih spojeva se određuje preko prema formulama koje su navedene u [7], a i u [36]:

$$F_{v.Rd} = f_{v,c,d} \cdot b_N \cdot l_N \quad (38)$$

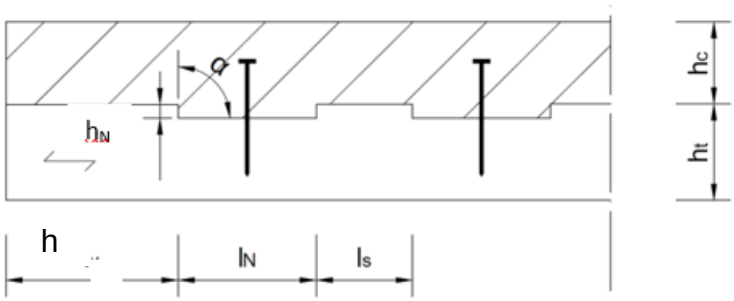
$$F_{v.Rd} = f_{c,d} \cdot b_N \cdot h_N \quad (39)$$

$$F_{v.Rd} = f_{v,t,d} \cdot k_{cr} \cdot b_N \cdot \min(l_V; l_s) \quad (40)$$

$$F_{v.Rd} = f_{c,0,d} \cdot b_N \cdot h_N \quad (41)$$

Mjerodavna je najmanja dobivena vrijednost prema formulama (39) – (42).

Oznake u formulama koje se odnose na geometriju zasjeka se nalaze na slici 65.



Slika 65. Geometrijske oznake zasječenog spoja

h_t – označava visinu drvenog dijela

h_c – visina betonskog dijela

l_V – duljina drva ispred zasjeka

l_s – razmak između zasjeka

l_N – duljina zasjeka

b_N – širina zasjeka

h_N – dubina zasjeka

k_{cr} – koeficijent pukotina (za CD i LLD iznosi 0.67)

$f_{v,t,d}$ – proračunska vrijednost posmične čvrstoće drva

$f_{c,0,d}$ – proračunska vrijednost tlačne čvrstoće drva paralelno s vlakancima

$f_{c,d}$ – proračunska vrijednost tlačne čvrstoće betona

$f_{v,c,d}$ – proračunska vrijednost posmične čvrstoće betona i određuje se prema formuli:

$$f_{v,c,d} = \frac{v \cdot f_{c,d}}{ctg\theta + tg\theta} \tag{42}$$

Gdje su:

θ- nagib tlačnih štapova

v – redukcijski faktor kojim se uzima u obzir utjecaj pucanja betona na posmični prijenos i određuje se prema formuli:

$$v = 0.6 \cdot (1 - \frac{f_{c,k}}{250\ [\frac{N}{mm^2}]} \tag{43}$$

Zasječeni spojevi se ponašaju obično lineano elastično sve do sloma stoga je u radu [34] navedeno da se uzima isti modul klizanja, neovisno o kojem graničnom stanju je riječ.

Kao dodatak modelima sloma potrebno je uzeti u obzir i odizajuću silu koja ovisi o pretpostavljenom nagibu tlačnih štapova u betonu i određuje se kao maksimalna vrijednost:

$$F_{odz,d} = max\begin{cases} 0{,}1 \cdot F_{E,d} \\ F_{R,d} \cdot tg\theta \end{cases} \tag{44}$$

θ predstavlja nagib tlačnog štapa između dodirnog dijela drva, betona i usidrenja spoja kojeg prenosi odizajuću silu, donja granica je određena:

$$\theta \leq max\begin{cases} arctg\left(\dfrac{h_N}{2 \cdot (l_N + l_s)}\right) \\ arctg\left(\dfrac{h_N}{l_N}\right) \end{cases} \tag{45}$$

3.5.4. Usporedba podataka greda X1 i X2

Za gredu X1 razlika između analitičkog proračuna i štapnog modela je manja od 9 %. Kod grede X2 se javljaju veći progibi i posljedično manja učinkovitost jer je modul klizanja spoja korištenog u X2 manji. Razlike između proračuna i modela i u X2 su između 6 i 7 % što pokazuje dobru korelaciju. Obje grede pokazuju manju učinkovitost u odnosu na grede A1 i B1. Tablični prikaz se nalazi ispod.

Tablica 24. Usporedba rezultata za grede X1 i X2

Greda X1			
	Analitički	Štapni model	
		Model 1	Model 2
Progib, δ [mm]	16,42	17,96	17,63
Učinak sprezanja	93,79		
Greda X2 6ϕ12			
	Analitički	Štapni model	
		Model 1	Model 2
Progib, δ [mm]	29,62	31,54	/
Učinak sprezanja	51,19		
Greda X2 10ϕ12			
	Analitički	Štapni model	
		Model 1	Model 2
Progib, δ [mm]	27,50	25,37	/
Učinak sprezanja	59,05		

4. ZAKLJUČAK

Na temelju napisanog može se zaključiti da najveći stupanj sprezanja za razmatrane stropnih grede postižu zasječeni spojevi ojačani vijkom za drvo iako zasječeni spojevi i bez ojačanja dostižu stupanj sprezanja veći od 90 %. Prednost opcije s ojačanjima je i poboljšana duktilnost spoja za koji je inače karakterističan krti lom. Spojevi izvedeni trnovima očekivano postižu niži stupanj sprezanja. Općenito, na stupanj sprezanja utječe broj i raspored spajala te raspon spregnute grede, a svakako i materijalne i geometrijske karakteristike presjeka.

Za usporedbu s eksperimentalno dobivenim rezultatima, u ovom su radu korištene dvije metode prikladne za primjenu u praksi – analitička (normirana) i numerička (nenormirana, primjena tlačno – vlačnog modela) metoda. Usporedbe rezultata dobivenih eksperimentalno i analitički su pokazale da je γ – metoda u pristupu i rezultatima konzervativna (na strani sigurnosti) za oba granična stanja. Rezultati dobiveni numerički (statička analiza tlačno – vlačnih modela) i analitički su relativno usklađeni, osim kod grede B1 koja je dimenzionirana na slom u elementu, s time i veću silu.

Razlog radi kojega se ovaj rad prevladavajuće bavi zasječenim spojevima jest taj što u važećoj normi EN 1995-1-1:2004 nisu navedene vrijednosti modula klizanja niti druge smjernice za analitički proračun (npr. lokacija, geometrija i raspored spajala) nužne za određivanje γ faktora. Radi toga su napravljene usporedbe eksperimentalno dobivenih rezultata s rezultatima dobivenim numerički i analitički. Dodatni je razlog i taj što će smjernice za proračun biti dostupne po objavi Tehničke specifikacije (prethodi budućoj normi EN 1995-1-3), a odnose se na preporuke za vrijednost modula klizanja, minimalno potrebnu kvalitetu materijala (C24, GL24 – drvo prosječnog razreda čvrstoće te C25/30 za beton) te uzimaju u obzir činjenicu da se spoj ponaša linearno elastično o sloma, a različito u odnosu na spojeve s mehaničkim spajalima.

Sumirano, TCC pokazuju veliku raznolikost u vidu materijala korištenih za poprečni presjek, spajala pa čak i u pristupu proračunu i dimenzioniranju. Glavni razlog raspršenosti je vjerojatno u tome što je svako istraživanje ove teme krenulo samostalno, neutemeljeno na nečem standardiziranom. Dakle, iako ima puno provedenih ispitivanja nisu sva prikladna za korištenje u znanstvene svrhe. Kada je u

pitanju drvo, svi materijali dozvoljeni EC5 mogu se koristiti, ali primjerice za zasječene spojeve potrebno je koristiti minimalnu čvrstoću drva C24, GL24. Beton je dozvoljeno koristiti klase veće od C12/15, a manje od C60/80. Za zasječene spojeve preporuka je koristiti minimalnu klasu C25/30 jer nema dovoljno informacija kod korištenja betona manje čvrstoće. Dozvoljena armatura je propisana EC2. Uporaba TCC je dozvoljena samo za klase uporabljivosti 1 i 2. Provjere otpornosti se izvode zasebno za drveni i betonski dio onako kako je propisano EC2 i EC5. Provjera nosivosti spajala za trnove se izvodi prema EC5, a provjera nosivosti zasječenih spojeva je dana novom tehničkom specifikacijom. Kada je riječ o proračunu najkorištenija je γ metoda, problem kod ove metode je u tom što se s njom ne mogu uzeti u obzir neelastična naprezanja, ali metoda je dobila svoj nastavak kojim se onda pokrivaju primjerice drugačija temperaturna izduljenja, skupljanje, puzanje na način da se ta neelastična naprezanja nanose putem fiktivnih opterećenja. Jednostavnim problemima su pronađena rješenja, polagano se otkrivaju i za kompleksnije probleme. Razvojem normi za TCC ovakvi nosači i konstrukcije će zasigurno naići na još širu primjenu, posebno zbog pozitivnijeg ekološkog utjecaja koji je u današnje vrijeme jako bitna stavka u graditeljstvu.

5. POPIS SLIKA

Slika 1. Primjeri primjene TC kompozita u novim konstrukcijama mostova i zgrada
Slika 2. Poprečni i uzdužni presjek kompozitne grede drvo – beton [13] (gore) i primjeri različitih tipologija sprezanja (štapna spajala – trnovi), zasijecanje i pločasta spajala [14]
Slika 3. Prikaz odnosa vlastite težine i raspona stropnih konstrukcija za uporabno opterećenje a) drvena stropna konstrukcija, b) TCC i c) betonska stropna konstrukcija [3]
Slika 4. Razvoj deformacija betona u vremenu za konstantno opterećenje i nakon rasterećenja [16]
Slika 5. Dijagram pomak – sila za različite tipologija sprezanja i spojna sredstva [18]
Slika 6. Prikazi ponašanja greda različitog stupnja sprezanja i raspodjela naprezanja po visini T-presjeka [13]
Slika 7. Odnos raspona TCC grede i γ faktora za variranu posmičnu krutost spoja [19]
Slika 8. Veza proračunske krutosti na savijanje i posmične krutosti spoja za varijacije raspona TC kompozitne stropne grede [18]
Slika 9. Veza proračunske krutosti na savijanje i posmične krutosti spoja za varijacije raspona TC kompozitne grede mosta [20]
Slika 10. Primjeri tipologija sprezanja i spojnih sredstava u TC kompozitima [3], [13]
Slika 11. Statistički prikazi zastupljenosti tipologija podatljivog sprezanja (lijevo) i vrste mehaničkih metalnih spajala (desno) u provedenim istraživanjima [1]
Slika 12. Statistički prikazi zastupljenosti tipologija sprezanja zasijecanjem (lijevo) i ostalih tipologija sprezanja (desno) u provedenim istraživanjima [1]
Slika 13. Primjeri patentiranih sustava sprezanja i spajala [1]
Slika 14. Plus – minus sistem[1]
Slika 15. Model postavki ispitivanja (posmična proba, lijevo) i dijagram sila – pomak [21]
Slika 16. Mehanički model i ponašanje podatljivog kompozita drvo – beton [21]
Slika 17. Zastupljenost ispitivanja u odnosu na cjelokupnu literaturu[1]
Slika 18. Postupak nanošenja opterećenja prema HRN EN 26891 [17]
Slika 19. Prikaz idealizirane krivulje opterećenje – pomak [17]

Slika 20. Pregled rezultata ispitivanja – utjecaj dubine zasjeka na modul klizanja [8], [23]
Slika 21. Geometrijski parametri u analizi tipičnih zasječenih spojeva [1], [8]
Slika 22. Primjeri usporedbe krivulja sila – pomak zasnovani na rezultatima ispitivanja i teorijskih modela [1], [30]
Slika 23. Shematski prikaz uzdužnih (L) i poprečnih (R, T) ravnina i moduli elastičnosti [4]
Slika 24. KE model kompozita s podatljivom vezom [21]
Slika 25. Mehanički sastavljen T-presjek i raspodjela normalnih naprezanja s oznakama [5]
Slika 26. Zamjenski statički modeli spajala: a) zanemarene deformacije pojasnica, b) deformacije pojasnica se uzimaju u obzir [32]
Slika 27. Primjer tlačno – vlačnog modela stropne grede spregnute zasijecanjem [32]
Slika 28. Raspodjela unutrašnjih sila i odstupanje rezultata – usporedbe s rezultatima γ – metode (proračunati za prosječnu krutost spoja, za razmake e ≈ 6,8/6 ≈ 1,13m) [32]
Slika 29. Unutrašnje sile u dijelovima kompozita za različite udaljenosti spajala (zasjeka) [32]
Slika 30. Usporedbe rezultata – progibi spregnute grede (gore) i proračunske krutosti kompozita (dolje) u ovisnosti od krutosti spoja (modul klizanja) [32]
Slika 31. Usporedne ovisnosti opterećenja na spajala (posmične sile) i razmaka spajala [32]
Slika 32. Primjeri modeliranja kompozita spregnutog zasijecanjem – proračunski modeli [33]
Slika 33. Laboratorijsko ispitivanje velikih uzoraka sa zasječenim spojevima [33]
Slika 34. Postavke referentnog ispitivanja velikih uzoraka stropnih kompozitnih greda [9]
Slika 35. Zasjek s vijkom za drvo (lijevo) i poprečni presjek spregnute grede (desno) [9]
Slika 36. Greda A1 – raspored spojeva na polovici duljine grede [9]
Slika 37. Greda B1 – raspored spojeva na polovici duljine grede [9]
Slika 38. Poprečni presjeci modela greda A1 i B1
Slika 39. Rubni uvjeti greda A1 i B1
Slika 40. 3D prikaz modela greda A1 i B1, nedefermirana (gore) i deformirana (dolje)

Slika 41. Simulacija zajedničkog progiba – Connection FE
Slika 42. Simulacija spoja – Beam FE a), b) materijalne i geometrijske karakteristike c), d) rubni uvjeti za model 2 e), f) rubni uvjeti za model 1
Slika 43. Progib grede A1 u y smjeru – model 1
Slika 44. Poprečne sile na spajala grede A1 – model 1
Slika 45. Naprezanja u betonskom dijelu grede A1 – model 1
Slika 46. Naprezanja u drvenom dijelu grede A1 – model 1
Slika 47. Progib grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 48. Poprečne sile na spajala grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 49. Naprezanja u betonskom dijelu grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 50. Naprezanja u drvenom dijelu grede A1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 51. Progib grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1
Slika 52. Poprečne sile na spajala grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1
Slika 53. Naprezanja u betonskom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1
Slika 54. Naprezanja u drvenom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 1
Slika 55. Progib grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 56. Poprečne sile na spajala grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 57. Naprezanja u betonskom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 58. Naprezanja u drvenom dijelu grede B1 za kombinaciju vlastita težina + sila – model 2
Slika 59. Preporuka za razmake spajala [9]
Slika 60. Progibi za gredu X1 – model 1
Slika 61. Progibi za gredu X1 – model 2
Slika 62. Progibi za gredu X2 (6*12) – model 1
Slika 63. Progibi za gredu X2 10*φ12 – model 1

Slika 64. Opisi prikaza s lijeva na desno: (1) postavke testa (2) slom u drvu (3) tlačni slom betona (4) posmični slom betona [33]

6. POPIS TABLICA

Tablica 1. Eurokod model za određivanje modula klizanja K_{ser} (K_s) za spojeve drvo – drvo [5]
Tablica 2. Pregled rezultata ispitivanja (izvor: Alfredo M. P. G. Dias, 2005.) [18]
Tablica 3. Pregled rezultata ispitivanja zasječenih spojeva LVL – beton (D. Yeoh, 2010.) [9]
Tablica 4. Pregled, karakteristike i raspon primjene metoda proračuna TC kompozita [1]
Tablica 5. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava spojeva – uzorci A3, B1 i R1 [9]
Tablica 6. Uzorci ispitivanja – geometrijske vrijednosti, mehanička i fizička svojstva [9]
Tablica 7. Tip spoja, geometrija velikih uzoraka i spoja, lokacija (vrsta) sloma [9]
Tablica 8. Rezultati ispitivanja velikih uzoraka spregnutih greda [9]
Tablica 9. Ulazni podaci za gredu i spajala A1
Tablica 10. Proračun efektivne savojne krutosti za podatljivi spoj
Tablica 11. Proračun efektivne savojne krutosti za nespregnuti spoj
Tablica 12. Proračun efektivne savojne krutosti za idealno spregnuti spoj
Tablica 13. Učinak sprezanja za gredu A1
Tablica 14. Naprezanja u gredi A1
Tablica 15. Poprečne sile na spajala
Tablica 16. Ulazni podaci za spajala B1 i opterećenje
Tablica 17. Proračun efektivne savojne krutosti za podatljivi spoj
Tablica 18. Proračun efektivne savojne krutosti za nespregnuti spoj
Tablica 19. Proračun efektivne savojne krutosti za idealno spregnuti spoj
Tablica 20. Učinak sprezanja za gredu B1
Tablica 21. Naprezanja u gredi B1
Tablica 22. Poprečne sile na spajala
Tablica 23. Usporedba rezultata za grede A1 i B1
Tablica 24. Usporedba rezultata za grede X1 i X2

7. POPIS LITERATURE

[1] Dias, A., Schänzlin, J., Dietsch, P. (eds.). Design of timber-concrete composite structures: A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4, Shaker Verlag Aachen, 2018.

[2] Yeoh, D. et all.:“State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review“, American Society of Civil Engineerings, 2011. (DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353.)

[3] Ceccotti, A: “Timber-concrete composite structures.” Timber engineering STEP 2, (H. Blass, et al., ed.), 1st Ed., Centrum Hout, Netherlands, 1995. (E13/1–E13/12)

[4] Bjelanović, A. Nastavni materijali (kolegij Drvene konstrukcije ak. god 2020./2021.)

[5] HRN EN 1995-1-1: Eurokod 5 - Projektiranje drvenih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila – Opća pravila i pravila za zgrade, HZN, 2013

[6] HRN EN 1995-2: Eurokod 5 - Projektiranje drvenih konstrukcija - Dio 2: Mostovi, HZN, 2013

[7] Dias, A.; Schanzlin, J.: “Outlook on the future design of timber-concrete-composite structures in the Eurocode“, 24. Internationales Holzbau-Forum IHF 2018.

[8] Kudla, K.: “Short Term Scientific Mission: Notched Connections for TCC Structures as Part of the Standard. Cost Action FP1402“, 2015.

[9] Yeoh, D.: Behaviour and Design of Timber-Concrete Composite. PhD, University of Canterbury, 2010.

[10] Zakon o građevnim proizvodima; Zakon o izmjenama zakona o građevnim proizvodima (NN 76/2013, NN 30/2014)

[11] NN 17/2017 (24.2.2017.), Tehnički propis za građevinske konstrukcije (TPGK) https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_02_17_403.html

[12] NN 7/2022 (17.1.2022.), Tehnički propis o izmjenama i dopunama TPGK https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_01_7_72.html

[13] Lukaszewska, E.: Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors, PhD thesis Luleå University of Technology, Sweden, 2009.

[14] Mirdad, H.A. et all: “ Analytical Procedure for TCC System with Mechanical Connectors“, Buildings 2022, 12, 885. https://doi.org/10.3390/buildings12070885,

[15] Mirdad, H.A. et all: “Sustainability Design Considerations for Timber-Concrete Composite Floor Systems“, Hindawi, Advances in Civil Engineering, Volume 2021,
[16] Grandić, D.: Nastavni materijali (kolegij Osnove betonskih konstrukcija, ak. god 2019./2020.)
[17] HRN EN 26891: Drvene konstrukcije – priključci izvedeni mehaničkim spajalima. Opća pravila za određivanje svojstava čvrstoće i deformiranja, HZN, 2006
[18] Dias, A.M.P.G.: Mechanical behaviour of timber concrete joints, PhD thesis, TU Delft, 2005.
[19] Van der Linden M.L.R.: Timber – concrete composite floor systems, PhD thesis, TU Delft, 1999.
[20] Rodrigues et all: “Review of TCC bridges”, BioResources 8(4), 2013.
[21] Ceccoti, A.: “Composite concrete – timber structures“, Progress in Structural Engineering Materials, 4, 264-275, 2002
[22] Dias, A. M. P. G.; Jorge, L. F. C.: “The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams“, Engineering Structures, 33, 3033-3042, 2011.
[23] Dias, A.M.P.G.; Kuhlmann, U.; Kudla, K.; Mönch, S.; Dias, A.M.A.: “Performance of dowel-type fasteners and notches for hybrid timber Structures“, Engineering Structures 171, 40–46, 2018
[24] Yeoh, D., Fragiacomo, M., De Franceschi, M., and Buchanan, A.: “Experimental tests of notched and plate connectors for LVL-concrete composite beams”, J. Struct. Eng., 137(2), 261–269, 2011.
[25] Dias, A.M.P.G.; Lopes, S.M.R.; Van de Kuilen, J.W.G.; Cruz, H.M.P.: “Load-Carrying Capacity of Timber–Concrete Joints with Dowel-Type Fasteners“, J. Struct. Eng. 133, 720-727, 2007.
[26] Dias, A.M.P.G.; Cruz, H.M.P.; Lopes, S.M.R.; Van de Kuilen, J.W.: “Stiffness of dowel-type fasteners in timber-concrete joints“, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, 163, 257-266, 2010.
[27] Schönborn, F.: Holz-Beton-Fertigteilelemente. PhD thesis, Leopold-Franzens-Universität, 2006.
[28] Michelfelder, B.: Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken, PhD thesis, University of Suttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2006.

[29] Dias, A.M.P.G.; Martins, A.R.D.; Simones, L.M.C.; Providencia, P.M.; Andrade, A.A.M.: “Statistical analysis of timber-concrete connections - Mechanical properties“, Computers & Structures, 155, 67-84, 2015.
[30] Dias, A.M.P.G.: “Analysis of the Nonlinear Behavior of Timber-Concrete Connections“, Journal of Structural Engineering, ASCE, 138, 1128-1137, 2012.
[31] Grosse, M.; Rautenstrauch, K.: “Numerical modelling of timber and connection elements used in timber-concrete composite constructions“, CIB-W18/37-7-15, Edinburgh, 2004.
[32] Grosse, M.; Hartnack, R.; Lehmann, S.; Rautenstrauch, K.: “Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen“, Bautechnik 80 (2003), pp. 534 – 541 and 693 – 701, 2003.
[33] Kuhlmann, U., Michelfelder, B.: “Optimised design of grooves in timber-concrete composite slabs“, Proc., 9th World Conf. on Timber Engineering, Portland, OR., 2006.
[34] Ceccotti, A.; Fragiacomo, M.; Giordano, S.: „Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection“, Materials and Structures 40:15–25, 2006.
[35] Straus7, User Manual, Strand7 Pty Ltd.
[36] Dias A.; Fragiaocomo M.; Harris R.; Kuklic P.; Rajicic V.; Schänzlin J.: Technical Specification – Final Draft - Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-3: Structural design of timber concrete composite structures / Project Team CEN/TC 250-SC5.T2. 2018.