

Primljen / Received: 13.11.2014.

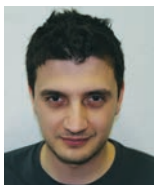
Ispravljen / Corrected: 23.1.2015.

Prihvaćen / Accepted: 27.2.2015.

Dostupno online / Available online: 10.4.2015.

Utjecaj dugotrajnog opterećenja na spregnute sustave drvo-beton

Autori:



Mislav Stepinac, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mstepinac@grad.hr



Prof.dr.sc. **Vlatka Rajčić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
vrajcic@grad.hr



Jure Barbalić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
jbarbalic@grad.hr

Pregledni rad

Mislav Stepinac, Vlatka Rajčić, Jure Barbalić

Utjecaj dugotrajnog opterećenja na spregnute sustave drvo-beton

Spregnuti sustavi drvo-beton predstavljaju vrlo dobro tehničko rješenje ne samo u sanacijama nego i u izgradnji novih objekata. Zasad se dimenzioniranje tih sustava provodi γ -postupkom definiranim u Eurokodu 5. Dugoročno ponašanje ovakvih sustava vrlo je kompleksan problem i ovisi o puzanju, bubrenju, skupljanju i temperaturnim promjenama unutar betona, puzanju i udjelu vlage u drvu, te o puzanju samog spoja. Dimenzioniranje takvih sustava prema sadašnjim propisima u određenim je uvjetima nedorečeno te postoji velik prostor za poboljšanja postojećih normi i propisa.

Ključne riječi:

spregnuti sustavi, drvo - beton, dugotrajno opterećenje, proračun spregnutih sustava, puzanje, Eurokod 5

Subject review

Mislav Stepinac, Vlatka Rajčić, Jure Barbalić

Influence of long term load on timber-concrete composite systems

Timber-concrete composite systems represent a very good technical solution both in reconstruction activities and in construction of new buildings. The design of such systems is currently conducted using the γ procedure defined in Eurocode 5. The long-term behaviour of such composites is a highly complex problem depending on the creep, swelling, shrinkage and thermal changes within concrete, creep and moisture content in wood, and creep of the connection itself. The design of composite systems according to current regulations is incomplete in some conditions, and there is ample room for improving the existing European standards and regulations.

Key words:

composite systems, timber - concrete, long-term load, design of composite systems, creep, Eurocode 5

Übersichtsarbeit

Mislav Stepinac, Vlatka Rajčić, Jure Barbalić

Einfluss langfristiger Lastbeanspruchung auf Holz-Beton-Verbundsysteme

Holz-Beton-Verbundsysteme stellen sowohl bei Sanierungsarbeiten, als auch für Neubauten eine wirksame technische Lösung dar. Derzeit wird die Bemessung dieser Systeme nach dem γ -Verfahren laut Eurocode 5 durchgeführt. Das langzeitige Verhalten von Verbundsystemen ist sehr komplex und hängt vom Kriech-, Schwell-, Schwind- und Temperaturverhalten des Betons, vom Feuchtegehalt und Kriechen des Holzes, sowie vom Kriechen der Verbindung selbst ab. Die Bemessung von Verbundsystemen ist den jetzigen Vorschriften folgend nicht vollständig und weist auf weitreichende Möglichkeiten zur Verbesserung hin.

Schlüsselwörter:

Verbundsysteme, Holz-Beton, langfristige Lasten, Berechnung von Verbundsystemen, Kriechen, Eurocode 5

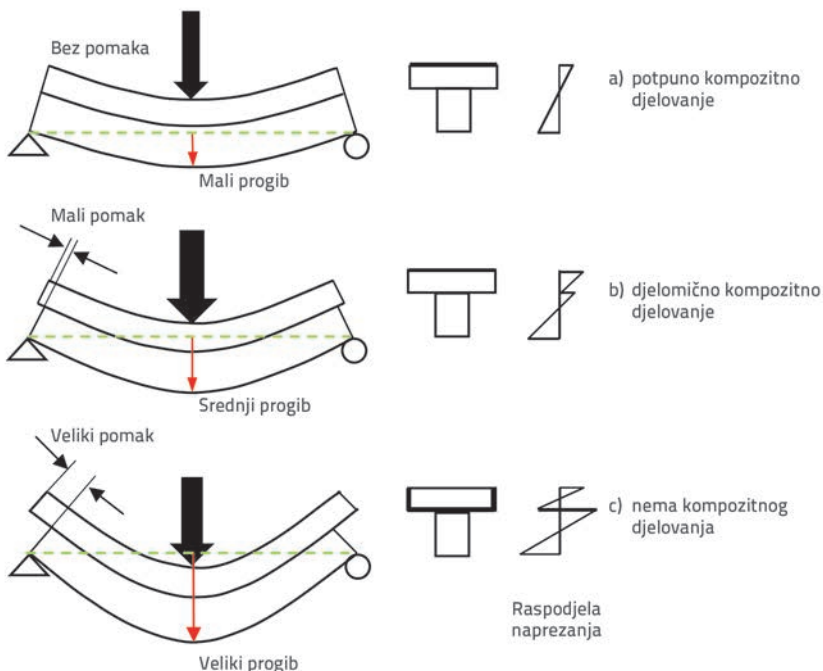
1. Uvod

Istraživanja u području optimalizacije gradnje i upotrebe nosivih sustava zasnovanih na osnovnim materijalima koji se koriste u graditeljstvu (beton, čelik, drvo) dovela su do razvoja "hibridnih" ili "kompozitnih sustava", ali i do inovacija u području "kompozitnih materijala". Najpoznatiji su kompozitni sustavi zasnovani na sprezanju betona i čelika (područje Eurokoda 4 [1]). Područje spregnutih sustava na osnovi drva obuhvaća sustave drvo - materijali na osnovi drva, drvo/materijal na osnovi drva - čelik kao i drvo/materijal na osnovi drva - beton, a u novije vrijeme i drvo/materijal na osnovi drva - staklo (paneli i predgotovljeni elementi I-presjeka). Spregnuti sustavi predstavljaju vrlo dobro tehničko rješenje kako u sanacijama tako i u izgradnji novih objekata. Sustavi u kojima drvo prenosi vlačna, beton tlačna, a samo spojno sredstvo posmična naprezanja sve su više kompetitivni sustavima u kojima se koristi ili samo drvo ili samo beton. Osnovna prednost ovih sustava jest manja vlastita težina u odnosu na deblje AB ploče, odnosno veća nosivost u odnosu na tradicionalnu drvenu gradnju. Također, povećana je i krutost što rezultira boljim seizmičkim karakteristikama samog objekta. Povećana masa u odnosu na tradicionalnu drvenu konstrukciju rezultira boljim akustičnim svojstvima, boljom izolacijom i smanjenim vibracijama. Također, sustavi imaju vrlo dobre termičke karakteristike kao i visoku otpornost na požar. Dimenzioniranje ovih sustava provodi se γ -postupkom definiranim odredbama Eurokoda 5 (EC5) [2]. Osnovna zamjerka proračunu u EC5 [2] jest ta što nisu svi činitelji uzeti u obzir i što su potrebna daljnja istraživanja na tom području. Općenit zaključak je da je metoda prihvatljiva za proračun i uporabu spregnutih sustava drvo - beton u prvoj klasi uporabivosti, dok se već za drugu klasu uporabivosti dolazi do nekonzervativnih i neprihvatljivih rješenja upravo zbog dugotrajnog opterećenja i značajnijih promjena u okolišnim uvjetima.

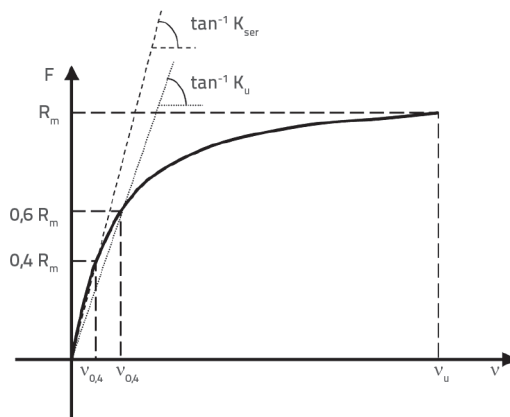
2. Definicija problema i osnove proračuna

Posmični spoj između betonske ploče i drvene grede kritični je dio svakog spregnutog elementa jer određuje u kojoj je mjeri ostvareno kompozitno djelovanje između dva materijala. Krutost i čvrstoća sustava moraju biti kvantificirani i uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja te posebnu pozornost treba usmjeriti na duktilnost samog spoja. Slika 1. prikazuje različita stanja kompozitnog djelovanja.

Godine 1995. Cecotti [3] je predstavio pristup koji u obzir uzima nelinearno ponašanje u posmičnoj zoni simulirajući ponašanje spoja uporabom dviju vrijednosti modula krutosti - na 40 % (K_{ser}) i 60 % (K_u) maksimalnog opterećenja koje element može podnijeti (slika 2.).



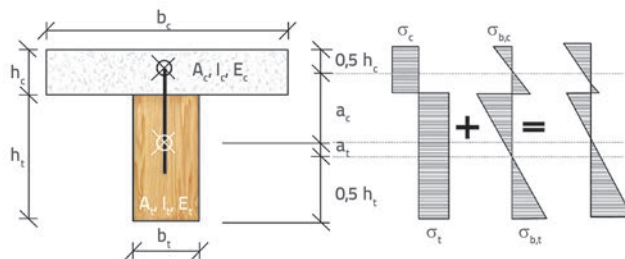
Slika 1. Kompozitna djelovanja



Slika 2. Modul klizanja spoja za granično stanje nosivosti i uporabivosti

Aproksimacija krutosti i modula klizanja može zahtijevati laboratorijsku i eksperimentalnu potvrdu. Proračun spregnutog sustava drvo - beton (slika 3.) definiran je na sličan način u EC5 [2] te se sastoji od nekoliko koraka, kako slijedi:

KORAK 1: Potrebno je odrediti efektivnu krutost



Slika 3. Presjek spregnutog elementa drvo - beton

$$(EI)_{ef} = E_c I_c + E_t I_t + \gamma_c E_c A_c a_c^2 + \gamma_t E_t A_t a_t^2 \quad (1)$$

$$I_c = \frac{b_c h_c^3}{12} \quad I_t = \frac{b_t h_t^3}{12} \quad (2)$$

$$\gamma_c = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_c A_c s_{ef}}{K l^2}} \quad \gamma_t = 1 \quad (3)$$

$$A_c = b_c \cdot h_c \quad A_t = b_t \cdot h_t \quad (4)$$

$$a_c = \frac{\gamma_t E_t A_t H}{\gamma_c E_c A_c + \gamma_t E_t A_t} \quad a_t = \frac{\gamma_c E_c A_c H}{\gamma_c E_c A_c + \gamma_t E_t A_t} \quad (5)$$

$$H = \frac{h_c}{2} + a + \frac{h_t}{2} \quad (6)$$

$$s_{ef} = 0,75 \cdot s_{min} + 0,25 \cdot s_{max} \quad (7)$$

Oznake imaju ovo značenje:

E - Youngov modul,

I - moment tromosti,

A - površina,

K - modul klizanja,

l - raspon,

b - širina poprečnog presjeka,

h - visina poprečnog presjeka,

s_{min} - minimalni razmak spajala,

s_{max} - maksimalni razmak spajala.

Indeks c je oznaka za beton, a t za drvo.

KORAK 2: Proračunaju se naprezanja u poprečnim presjecima.

Za savijanje vrijedi:

$$\sigma_{b,c}(x) = \pm \frac{1}{2} \frac{\gamma_c E_c h_c M_d(x)}{(EI)_{ef}} \quad \sigma_{b,t}(x) = \pm \frac{1}{2} \frac{\gamma_t E_t h_t M_d(x)}{(EI)_{ef}} \quad (8)$$

a za uzdužna normalna naprezanja:

$$\sigma_c(x) = - \frac{\gamma_c E_c a_c M_d(x)}{(EI)_{ef}} \quad \sigma_t(x) = \frac{\gamma_t E_t a_t M_d(x)}{(EI)_{ef}} \quad (9)$$

KORAK 3: Preko naprezanja dobiju se unutarnje sile

$$M_c(x) = \sigma_{m,c}(x) Z_c \quad M_t(x) = \sigma_{m,t}(x) Z_t \quad (10)$$

$$V_t(x) = V_d(x)^{a)} \quad (11)$$

**Pretpostavlja se da drvena greda prenosi cjelokupno posmično opterećenje*

$$N_c(x) = \sigma_c(x) A_c \quad M_t(x) = \sigma_t(x) A_t \quad (12)$$

gdje su:

σ_m - naprezanje od savijanja,

σ - naprezanje od tlačne sile,

V - unutarnja posmična sila u drvu,

F_d - računsko opterećenje,

N - unutarnja sila.

KORAK 4: Poznavajući unutarnje sile potrebno je provjeriti naprezanje spojnog sredstva, pri čemu opterećenje na spajalo mora biti uzeto prema izrazu (11).

KORAK 5: Zadnji korak je proračun graničnog stanja uporabivosti, odnosno deformacija ovisno o vrsti opterećenja i statičkom sustavu.

Frangi i Fontana [4] opisali su elastoplastični model za ponašanje spregnutih greda drvo-beton s duktilnim spajalima. Ponašanje cjelokupnog sustava ovisi o tipu posmičnog spajala i njegovom ponašanju. Ako je ponašanje opterećenog spajala linearno do sloma drvenog elementa, može se pretpostaviti da je ponašanje sustava linearno elastično. Ako pak opterećenje dosegne nosivost spajala, spajalo će se plastično deformirati i sustav će imati nelinearno ponašanje. Elastoplastični model podrazumijeva da je spajalo kruto plastično i proračun je zapravo analogan proračunu detalja sa štapastim spojnim sredstvima. Modul klizanja nije potrebno proračunavati, što uvelike pojednostavljuje proračun. Za drveni element pretpostavlja se linearno elastično ponašanje zbog krto g loma kod zajedničkog djelovanja savijanja i vlaka paralelno na vlakna. Isto tako, linearno elastično ponašanje pretpostavlja se i za beton jer se najčešće otkazivanje događa u drvu, a ne u betonu. Autori razlikuju tri različita slučaja (ovisno o krutosti spoja):

1. Ne postoji kompozitno djelovanje.

2. Podatljiva veza - do otkazivanja dolazi zbog loma drvenog elementa prilikom zajedničkog djelovanja savijanja i vlaka u trenutku kada spajalo dosegne maksimalnu posmičnu čvrstoću. Sustav se počinje ponašati nelinearno do pojave loma.

3. Potpuno kruta veza. Do otkazivanja dolazi u drvu prije dostizanja maksimalne posmične čvrstoće u spajalu. Ponašanje sustava je linearno.

Kako potpuno kruta veza predstavlja gornju granicu, a veza kada nema kompozitnog djelovanja donju granicu, pojednostavljena linearna aproksimacija može se upotrijebiti za proračun podatljive veze. Elastoplastični model daje gornju i donju vrijednost za nosivost kompozita koja je u okviru 5 % nosivosti ostvarenih linearnom aproksimacijom i autori je smatraju zadovoljavajućom za proračun podatljivih kompozitnih sustava. Proračun ovakvih sustava na dugotrajno opterećenje problematičniji je i kompleksniji jer mora uzeti u obzir mehaničke promjene u drvu, betonu i čeliku zbog promjena vlage, temperature i opterećenja tijekom vremena. EC 5 [2] preporuča uporabu koeficijentata deformacije za redukciju karakteristika materijala tijekom vremena. Ceccotti [5] preporučuje uporabu efektivnog modula u kojem je puzanje materijala uzeto u obzir reduciranjem modula elastičnosti i modula klizanja sa sljedećim formulacijama:

$$E_{c,fin} = \frac{E_{cm}(t_0)}{1 + \phi(t, t_0)} \quad E_{t,fin} = \frac{E_{0,mean}}{1 + k_{def}} \quad K_{fin} = \frac{K}{1 + k_{def}} \quad (13)$$

Oznake su definirane u EC2 [6] i EC5 [2] kao koeficijenti puzanja φ(t, t₀) za beton i k_{def} koeficijent deformacije za drvo. Navedene

skraćene izraze za viskoelastično i mehaničko puzanje drva razvio je Toratti [7]. Povezivanjem sloja betona s drvenim elementom, drvo će spriječiti skupljanje betona što vodi do povećanja deformacija u spregnutoj gredi. U poprečnom presjeku skupljanje betona uzrokuje ekscentričnu silu koja za posljedicu ima nejednoliku raspodjelu naprezanja po poprečnom presjeku te se ona može izračunati prema sljedećim formulama:

$$\sigma_{cs,c} = \gamma \varepsilon_{cs} E_c \left(1 + \frac{E_c A_c a_c}{(EI)_{eff}} (\mp 0.5 h_c - \gamma a_c) - \frac{E_c A_c}{E_c A_c + E_t A_t} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_{cs,c} = \gamma \varepsilon_{cs} E_c \left(\frac{E_t A_c a_c}{(EI)_{eff}} (\mp 0.5 h_t - a_t) - \frac{E_t A_c}{E_c A_c + E_t A_t} \right) \quad (15)$$

gdje su E_c i E_t početne vrijednosti modula elastičnosti.

3. Pregled stanja područja i prijedlozi proračuna

Ponašanje spregnutih sustava drvo-beton opterećeno dugotrajnim djelovanjem ovisi o odgovoru materijala od kojih je sustav izgrađen (drvo, čelik, beton), na promjene relativne vlažnosti zraka, temperature, opterećenja i vlažnosti samih materijala. Osnovni "dugoročni" parametar za projektiranje spregnutih sustava drvo-beton jest deformacija. Dugoročno ponašanje sustava vrlo je kompleksan problem i ovisi o puzanju, bubrenju, skupljanju i termalnim promjenama unutar betona; puzanju i udjelu vlage u drvu; te puzanju spojnog sredstva. Čimbenici poput veličine poprečnog presjeka drva, površine drvenog elementa, načina opterećenja, broja ciklusa promjena okolišnih uvjeta i promjene relativne vlažnosti zraka također indirektno utječu na ponašanje kompozita. Eksperimentalna istraživanja dugoročnog ponašanja ovakvih sustava skupa su i dugotrajna, ali presudna za potvrdu približnih načina projektiranja i kalibracije postojećih analitičkih i numeričkih modela.

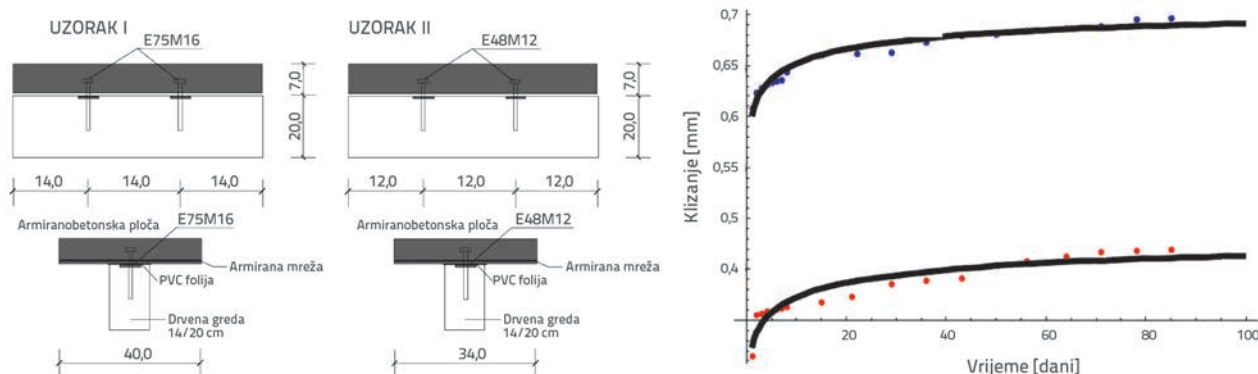
Do danas je izvršeno nekoliko dugotrajnih i opsežnih ispitivanja ovakvih sustava (Fragiacomo [8, 9] Ceccotti [3, 5, 10, 11], Balogh [12], Hailu [13]) te su izrađeni numerički (Fragiacomo [14, 15], Rajčić [16]) i analitički (Bou Said [17], Jorge [18]) modeli za predviđanje ponašanja spoja. Lozančić i ostali [19] proveli su eksperimentalno i analitičko istraživanje svojstava spregnutih

drveno-betonskih konstrukcija, spregnutih jednostranim moždanicima naročito vrste tipa C. Istraživanje se provodilo na uzorcima dvaju moždanika E75M16 i E48M12. Pratilo se vremensko ponašanje takvih sustava sastavljenih od dvaju različitih materijala spregnutih spajalima (slika 4.). Za takve je spregnute sustave ključni faktor vrsta spajala i način spreznja. Uspoređeni su koeficijenti puzanja za drvo i spajalo, jer se često u literaturi pri numeričkom modeliranju spregnutih konstrukcija poistovjećuje reološki koeficijent drva i spajala. Prilikom dugotrajnih konstantnih opterećenja dolazi do porasta deformiranja i preraspodjele naprezanja po visini drvenog presjeka, a također i složenog presjeka od više materijala. Puzanje je veće kod betona, ali s vremenom opada i razlika puzanja drva i betona postaje manja. Za eksperimentalno se dobivene krivulje puzanja pokušalo naći analitički izraz-funkciju koja bi se prilagodila rezultatima ispitivanja. Rezultati puzanja spoja najbolje su opisani eksponencijalnom funkcijom približavanja koja je uključila rezultate ispitivanja oba uzoraka:

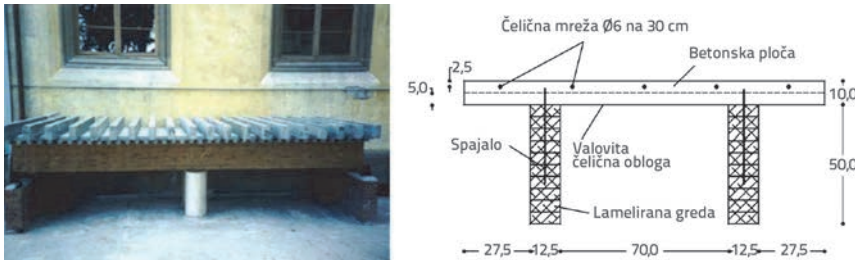
$$F(t) = \frac{a}{1 - be^{-ct}} \quad (16)$$

pri čemu su se parametri a, b i c određivali rješavajući nelinearni problem najmanjih kvadrata pa se dobilo: a = 1,7797; b = -0,76097; c = 0,0031784, a t označuje vrijeme u danima.

Svojstva konstrukcije realnih dimenzija proučavana su na velikom modelu gdje su dobiveni veliki prirasti vremenskih deformacija (progiba i klizanja krajnjih spajala) pod dugotrajnim opterećenjem. Opterećenje kojim se djelovalo na uzorke veličine je nosivosti dvaju moždanika i iznosi 19,2 kN za moždanike E75 i 10,6 kN za moždanike E48. Dobiven je omjer krajnjeg i početnog klizanja od 2.01 i omjera progiba od 1.84. Mjerenjem rasterećenog nosača nakon 411 dana uočile su se značajne zaostale deformacije, tj. nepovratni dio deformacije od 20 % dostignutog dugotrajnog progiba. Utvrđeni su koeficijenti deformacije koji su znatno veći od onih propisanih u EC5 [2]. Razlika u krutosti nosača prije i nakon 411 dana smanjena je za 20 % u odnosu na početnu, dok se početni modul klizanja dvostruko smanjio.



Slika 4. Spreznje drva i betona moždanicima te aproksimacija krivulje izmjerenih veličina klizanja spoja s polinomnom krivuljom [19]



Slika 5. Spregnuta greda za vrijeme ispitivanja s dimenzijama poprečnih presjeka u cm [11]

Ceccotti i ostali [11] eksperimentalno su promatrali ponašanje grede raspona 6 metara pod dugotrajnim opterećenjem (slika 5.). Kompozitna akcija izvedena je preko ulijepljenih čeličnih šipki te je sustav izložen konstantnom opterećenju i stalnim vremenskim promjenama u periodu od 5 godina.

Učestalim mjerenjem vlage, drveni element je svrstan u klasu dva prema EC5 [2] jer je udio vlage uvijek bio manji od 18 %. Nasuprot tome, relativna vlažnost zraka bila je oko 85 %, prema čemu bi se drveni element trebao svrstati u klasu tri. Deformacije samog sustava uvelike su ovisile o vremenskim promjenama, tako da je pri većim relativnim vlažnostima zraka i sama deformacija sustava bila veća. Mjereni pomaci u prve dvije godine eksperimenta bili su vrlo veliki, ali je konačna vrijednost progiba nakon 5 godina bila značajno manja od vrijednosti propisanih u EC5 [2]. Klizanje na samom spoju ni nakon 5 godina nije bilo značajno. Obje karakteristike značajno su fluktuirale na godišnjoj, ali i dnevnoj razini zbog različitih vremenskih uvjeta. Nakon pet godina gređa je ispitana do loma. Karakteristike samog spoja izvedene su eksperimentalnim putem, a ne analitičkim iz EC5 [2] jer je on okarakteriziran kao vrlo konzervativan i uvelike podcjenjuje krutost i nosivost samog spoja drva i betona. Usporedbom eksperimentalnih i analitičkih rješenja zaključeno je da sustav mora biti svrstan u klasu tri iako je udio vlage u drvu uvijek imao manje od 20 %.

Iste godine Fragiacomoi Ceccotti [9] predložili su pojednostavljeni proračun za dugotrajno ponašanje spregnutih sustava drvo-beton koji je bio temeljen na istraživanjima i preporukama iz 1995. (Ceccotti [3]). Dimenzioniranje sustava mora zadovoljiti i granično stanje nosivosti (koje se dokazuje proračunom maksimalnih naprezanja komponenata kompozita (beton, čelik, drvo- prema elastičnoj analizi) i granično stanje uporabivosti (dokazuju se maksimalne deformacije i za kratkotrajno i za dugotrajno djelovanje). Pojednostavljeni modeli proračuna prezentirani su i prije 2006. godine ali se daljnjim istraživanjima došlo do zaključaka da su neke pojave (kao npr. skupljanje betona) olako shvaćene. Kuhlmann [20] i Shanzlin [21] predložili su da se u proračun uzme efektivna vrijednost puzanja i skupljanja svih upotrijebljenih materijala. Fragiacomoi [15, 22] je predstavio pojednostavljeni Ceccottiev pristup kako bi u obzir uzeo utjecaje puzanja betona i neelastične deformacije/naprezanja zbog klimatskih varijacija temperature i vlažnosti zraka. Svi ti modeli upravo zbog pretpostavljenih pojednostavljenih modela ponašanja mogu dovesti do pogrešaka u dimenzioniranju ovakvih sustava. U prijašnjim modelima direktna veza između puzanja

i promjena u relativnoj vlažnosti zraka nije postojala te su Ceccotti i Fragiacomoi [9, 10] pokušali uspostaviti vezu preko objedinjenog koeficijenta puzanja ovisnog o klasi uporabivosti. Predložen je novi model proračuna i uspoređen sa EC5 modelom i numeričkim simulacijama. Osnovni zaključci ispitivanja su: a) Torattiev reološki model [7] snažno je ovisan o godišnjim promjenama relativne vlažnosti zraka; b) koeficijent deformacije samog spoja, pretpostavljen u EC5 [2] kao dvostruko veći od koeficijenta deformacije u drvu, precijenjen je i previsok; c) upotreba metode efektivnog modula elastičnosti daje točne rezultate; d) efekt skupljanja betona može se vrlo točno proračunati upotrebom formula (za elastično područje) za sustave s duktilnim konektorima; e) ista pretpostavka vrijedi i za skupljanje/bubrenje zbog klimatskih varijacija (temperатурne promjene u betonu i drvu ekvivalentne su promjenama temperature u zraku; promjene vlage u drvu pretpostavljaju se kao konstantne u svakoj točki i jednake prosječnoj vrijednosti u poprečnom presjeku); f) numeričko-analitičke provjere pokazuju da se ovakvim proračunom dobivaju točne vrijednosti deformacija i naprezanja; g) tip okoline (unutrašnji prostor, vanjski prostor, grijani prostor) nema značajan utjecaj na ponašanje spregnutih sustava.

Fragiacomoi [14, 15] je objavio vrlo opsežno istraživanje ponašanja spregnutih sustava pod dugotrajnim opterećenjem. Na osnovi numeričkih istraživanja evaluirao je pojednostavljenu metodu proračuna. Model uzima u obzir sve reološke činitelje i tako rezultira rigoroznim formulama. Uključeni reološki činitelji u proračun su: puzanje drvenog elementa i spoja, puzanje betona, skupljanje betona, promjene relativne vlažnosti zraka i temperature. Puzanje je uzeto u obzir preko modificiranog modula elastičnosti. Raspodjela vlage u drvu po poprečnom presjeku evaluirana je rješavanjem problema difuzije. Pouzdanost predložene metode provjerena je numeričkim analizama. Klasični pristup prema EC5 [2] baziran je na formulama za duktilne spojeve (Mohler [23]). Efekt puzanja je uzet u obzir na osnovi metode efektivnog modula (Chiorino [24]). Model je kombinacija superponiranja učinaka opterećenja i skupljanja betona s učincima uzrokovanih promjenama vlage i temperature na godišnjoj i dnevnoj razini. U zaključcima eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja definirana su tri osnovna načina dugotrajnog opterećenja na spregnuti sustav: stalno i korisno opterećenje, skupljanje betona i neelastične deformacije zbog vremenskih promjena u okolišu. Svako opterećenje promatrano je zasebno pa superponirano s ostalima. Efekt skupljanja betona koji rezultira povećanjem deformacija vrlo je bitan; puzanje značajno povećava deformacije i klizanje zbog opterećenja. Klizanje i unutarnje sile isto tako značajno variraju i mogu postići vrlo visoke vrijednosti osobito ako su izložene vanjskom okolišu. Preciznost predložene metode proračuna, posebno u proračunu deformacija i progiba, koji su osnovni faktor za ponašanje pri dugotrajnom opterećenju,

potvrđena je usporedbom s numeričkim simulacijama. Upotreba koeficijenta deformacije prema EC5 [2] za vanjske uvjete u svim simulacijama daje konzervativnije vrijednosti od onih predloženih numeričkim simulacijama. Usporedbom s klasičnim metodama proračuna, koji uzimaju u obzir samo stalna i korisna opterećenja, dolazi se do činjenice da su učinci ostalih činitelja podcijenjeni. Model proračuna prikazan je sljedećim formulama:

$$V_{\max} = V_{\max, \text{full}} \cdot \gamma_v \quad (17)$$

$$V_{\max, \text{full}} = \frac{\Delta \varepsilon_n}{H} \cdot \frac{(EI)_{\text{full}} - (EI)_{\text{abs}}}{(EI)_{\text{full}}} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (18)$$

$$\gamma_v = 1 - \frac{8}{(\alpha L)^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\cosh(0,5\alpha L)} \right] \quad (19)$$

$$s_f(x) = s_{f, \max, \text{abs}} \cdot \gamma_s(x) \quad (20)$$

$$s_{f, \max, \text{abs}} = -\Delta \varepsilon_n \cdot \frac{L}{2} \quad (21)$$

$$\gamma_s(x) = \frac{1}{0,5\alpha L} \cdot \left[\tanh(0,5\alpha L) \cdot \cosh(\alpha x) - \sinh(\alpha x) \right] \quad (22)$$

$$E_i(x) = k_f s_f(x) \quad (23)$$

$$N_w(x) = -N_c(x) = N_{w, \max, \text{full}} \cdot \gamma_g(x) \quad (24)$$

$$M_i(x) = M_{i, \max, \text{full}} \cdot \gamma_g(x) \quad i = c, w \quad (25)$$

$$N_{w, \max, \text{full}} = \frac{\Delta \varepsilon_n}{H} \cdot \frac{(EI)_{\text{full}} - (EI)_{\text{abs}}}{(EI)_{\text{full}}} \cdot \frac{(EI)_{\text{abs}}}{H} \quad (26)$$

$$M_{i, \max, \text{full}} = \frac{\Delta \varepsilon_n}{H} \cdot \frac{(EI)_{\text{full}} - (EI)_{\text{abs}}}{(EI)_{\text{full}}} \cdot E_i \quad (27)$$

$$\gamma_g(x) = 1 + \tanh(0,5\alpha L) \cdot \sinh(0,5\alpha x) - \cosh(0,5\alpha x) \quad (28)$$

$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \varepsilon_{wn} - \Delta \varepsilon_{cn} \quad (29)$$

$$(EI)_{\text{abs}} = E_c I_c + E_w I_w \quad (30)$$

$$(EI)_{\text{full}} = (EI)_{\text{abs}} + (EA)^* \cdot H^2 \quad (31)$$

$$(EA)^* = \frac{E_c A_c E_w A_w}{(EI)_{\text{abs}}} \quad (32)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{k_f}{i_{f, \text{ef}} (EA)^*} \cdot \frac{(EI)_{\text{full}}}{(EI)_{\text{abs}}}} \quad (33)$$

$$s_{f, \text{ef}} = 0,75 \cdot s_{f, \text{min}} + 0,25 \cdot s_{f, \text{max}} \quad (34)$$

Oznake u tim formulama imaju ova značenja:

- v - progib,
- L - raspon proste grede,
- $\Delta \varepsilon_n$ - razlika u neelastičnim naprezanjima u drvu $\Delta \varepsilon_{wn}$ i betonu $\Delta \varepsilon_{cn}$,
- (EI) - krutost,
- E, A, I - Youngov modul, površina i moment tromosti svakog pojedinog presjeka (drvo i beton),
- k_f - krutost spoja,
- $s_{f, \max}$, $s_{f, \text{min}}$, $s_{f, \text{ef}}$ - maksimalni, minimalni i efektivni razmak spajala,

- H - udaljenost težišta drvenog i betonskog dijela,
- F_r , s_f - posmična sila u spajalu, relativni pomak,
- N, M - uzdužna sila, moment,
- v, x - progib uzduž x osi.

Navedeni indeksi znače:

- abs i ful - potpuno podatljiv i krut spoj,
- max - maksimalna vrijednost uzduž osi grede,
- c, w, f - beton, drvo, spajalo.

Koeficijenti $\gamma_s(0)$ i $\gamma_u(l/2)$, koji uzimaju u obzir maksimalne vrijednosti učinaka uzduž glavne osi grede, pretpostavljaju se na osnovi sljedećih vrijednosti:

$$\gamma_s(0) = \frac{\tanh(0,5\alpha L)}{0,5\alpha L} \quad (35)$$

$$\gamma_u(l/2) = 1 - \frac{1}{\cosh(0,5\alpha L)} \quad (36)$$

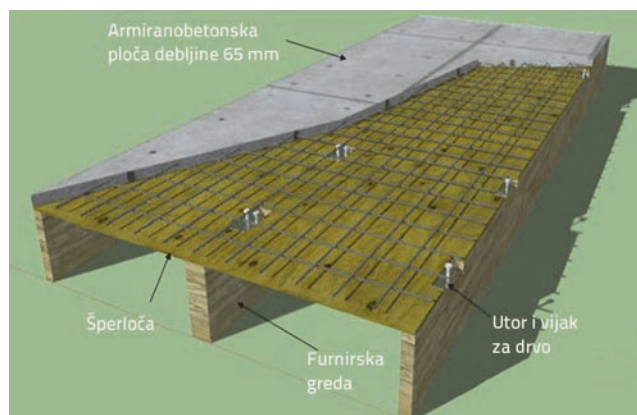
Kavaliauskas i ostali [25] promatrali su ponašanje spregnutih sustava pod dugotrajnim opterećenjem te pokušali evaluirati dugotrajno ponašanje i usporediti ga s određenim modelima puzanja drva. Proračunom su pokazali da se naprezanja i progibi značajno promijene tijekom prvih 180 dana, a nakon toga promjene su vrlo male. Za proračun deformacija od puzanja u drvu korišten je sljedeći model:

$$\varepsilon(t - t_0) = \frac{\sigma}{E} \left[1 + 0,65 \left(1 + 0,65 \left(1 - e^{-(t-t_0)} \right) \right) \right] \quad (37)$$

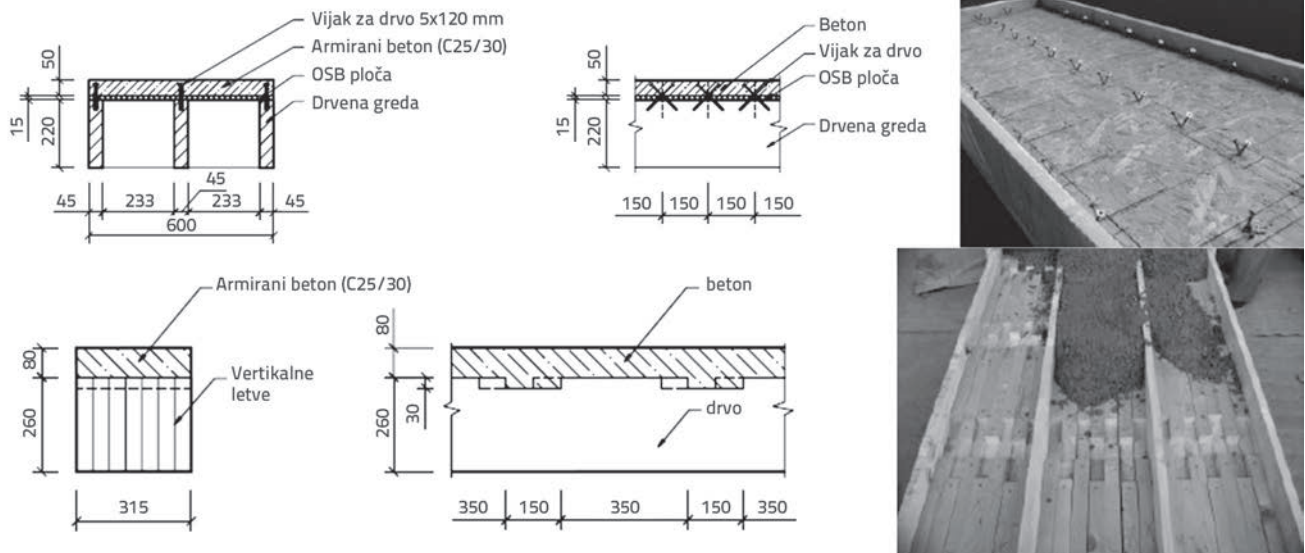
$$\varepsilon(t - t_0) = \frac{\sigma}{E} \left[1 + 0,3 \left(1 + 0,3 \left(1 - e^{-(t-t_0)} \right) \right) \right] \quad (38)$$

Uporabom navedenih formula za puzanje drvenog elementa dobiven je inicijalni progib za dva puta veći, a konačni za jedan i pol puta veći od onih koji su dobiveni metodom predloženom u EC5 [2].

Ponašanje spregnutih greda beton - LVL pod dugotrajnim opterećenjem promatrali su i Yeoh i ostali [26]. Tri grede raspona osam metara postavljene su kao strop garaže te opterećene dodatnim stalnim opterećenjem. Izvedena su tri različita načina spajanja drvenih greda i betona, kako je prikazano na slici 6.



Slika 6. Ispitivanje sustava prema Yeohu i ostalima [26]



Slika 7. Geometrija i izrada kompozitnih greda ispitivanih u radu Kanocz i Bajzecerove [27]

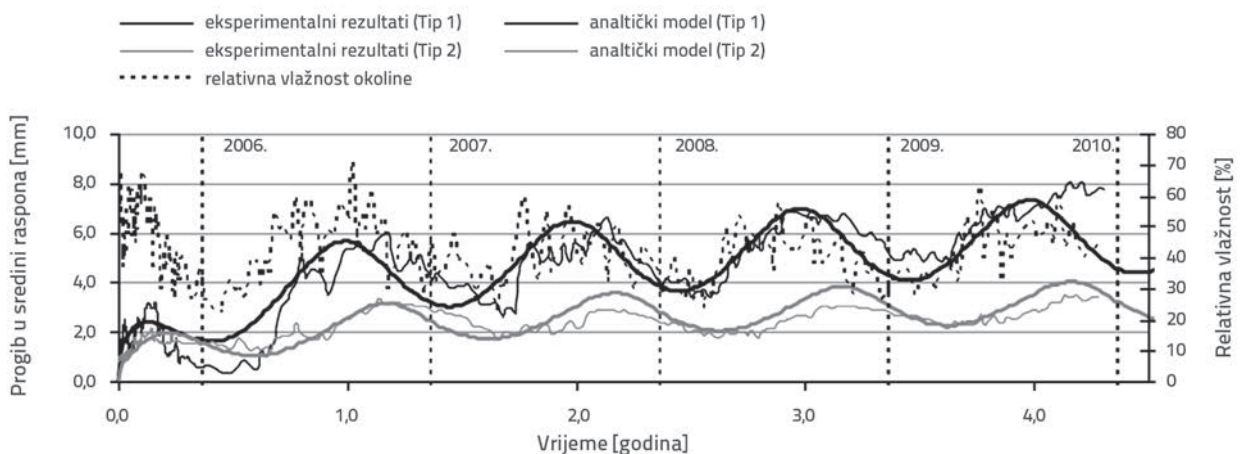
Svi značajni parametri mjereni su kontinuirano četiri godine. Vremenske prilike prisutne od početka do kraja mjerenja okarakterizirane su kao periodi s niskom temperaturom i visokom relativnom vlažnosti zraka ili periodi s visokom temperaturom i niskom relativnom vlažnosti zraka, pa je sustav svrstan u klasu tri prema EC5 [2]. Osnovni zaključci ispitivanja:

- vrlo visoke vrijednosti progiba javljaju se za vrijeme hladnih i vlažnih vremenskih perioda;
- grede izrađene sa betonom otpornijim na skupljanje imale su 15 % manje progibe;
- vrlo velike deformacije pojavile su se već nakon 3 mjeseca;
- konačni progib nakon 4 godine pet puta je veći od kratkotrajnog progiba;
- progibi u sredini ekstrapolirani su na 50 godina te se dobila vrijednost koja je veća od uobičajeno prihvatljive ($L/200$).

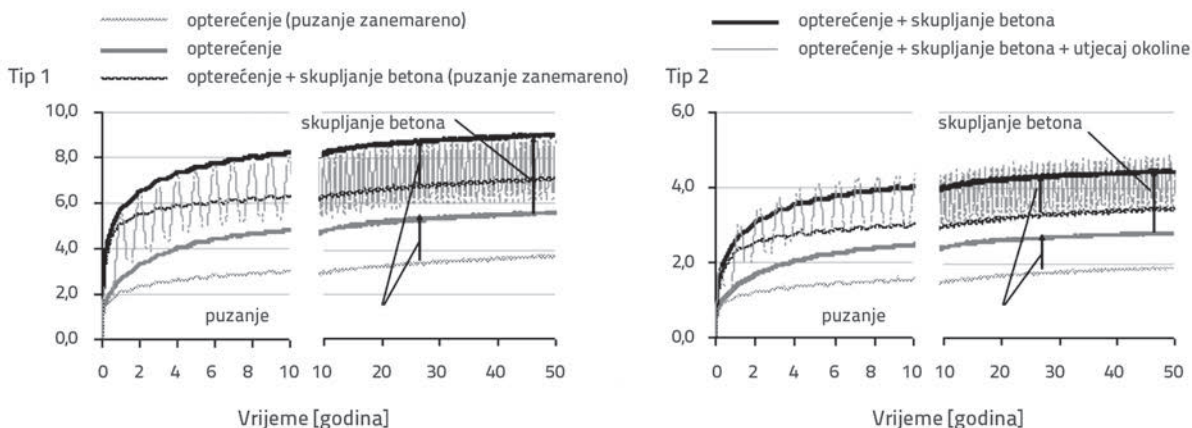
Teoretska i eksperimentalna ispitivanja spregnutih greda drvo-beton pod dugotrajnim opterećenjem, te utjecaj reologije na nosivost takvih greda predstavili su Kanocz i Bajzecerova [27]. Predstavljen je analitički model proračuna baziran na Aneksu B iz EC5 [2]. Viskoelastično puzanje betona iz EC2 [6] ubačeno je u proračun efektivne krutosti.

Eksperimentalna ispitivanja rađena su na dva tipa spregnutih greda raspona 5 m, što je prikazano na slici 7.

Grede su opterećene na savijanje u razdoblju od 5 godina u zatvorenom prostoru gdje su promjene relativne vlažnosti zraka i temperature kontinuirano mjerene. Eksperimentalni rezultati uspoređeni su s analitičkim modelom (slika 8.). Doprinos različitih reoloških fenomena na ukupni progib prikazan je na slici 9.



Slika 8. Usporedba eksperimentalnih i teoretskih progiba u sredini grede tijekom vremena [27]



Slika 9. Doprinos različitih reoloških fenomena na ukupni progib gređa tipa 1 i 2 [27]

Povećanja i smanjenja deformacija pratila su promjene vlažnosti zraka; u zimskim mjesecima pala je relativna vlažnost pa se samim time smanjio i progib u sredini gređe. Vrlo velik doprinos konačnom progibu (20 %) ima skupljanje betona dok skupljanje drva povećava progib za 37 % u odnosu na vanjsko opterećenje. Zaključak je ispitivanja je taj da reološki faktori itekako utječu na konačne deformacije i samim time ne smiju biti zanemareni u proračunu. Izmjerene godišnje varijacije progiba kao posljedica promjena u relativnoj vlažnosti i temperaturi zraka dovode do promjene čak 44 % od očekivanog konačnog progiba. Utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka ima veći utjecaj nego promjene temperature.

Ponašanje kompozitnih podova od drva i laganog betona u vremenu od 600 dana proučavali su Jorge i ostali [18]. Ispitane su ukupno tri serije po četiri uzorka s ciljem uspostavljanja koeficijenta puzanja tijekom vremena (slika 10.). Izmjereni koeficijent puzanja izračunan je prema jednadžbi

$$\varphi(t = t_i) = \frac{w_{(t=t_i)} - w_{(t=t_0)}}{w_{(t=t_0)}} \quad (39)$$

gdje su $w_{(t=t_0)}$ i $w_{(t=t_i)}$ inicijalno i konačno klizanje. Inicijalno klizanje pretpostavljeno je ono nakon opterećenja od 10 minuta. Rezultati pokazuju da se više od 50 % od očekivanog puzanja dogodilo u posmičnom spajalu već nakon 600 dana. Uspoređujući rezultate ispitivanja sa srednjim vrijednostima izračunanih metodom iz EC5 [2] uočavaju se značajne razlike koje se ne smiju zanemariti. Progib dobiven prema EC5 [2] za razdoblje

od 10 godina dosegnut je već nakon 150 dana; očekivani progib nakon 50 godina prema EC5 [2] dosegnut je već za 230 dana. Razlike se pojavljuju zbog nedostataka i zanemarivanja određenih pojava, a to su:

- skupljanja oba materijala;
- utjecaj kompozitnog djelovanja na efektivne koeficijente puzanja koji bi trebali uzeti u obzir redistribuciju naprezanja unutar kompozitnog sustava;
- različit vremenski razvitak puzanja i skupljanja.

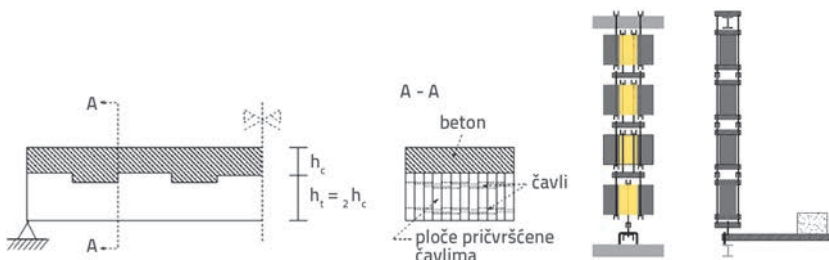
Autori zaključuju da se, uzevši u obzir činjenicu pri kojoj je kod numeričkog modeliranja potreban velik broj podataka i utroši se mnogo vremena, postupak predložen u EC5 [2] može primjenjivati ali uz određene korekcije.

Van de Kuilen i Dias [28] promatrali su dugotrajno ponašanje spregnutih sustava drvo-beton ostvareno štapastim spojnim sredstvima. Ispitano je ukupno 7 serija različitih uzoraka (sveukupno 40 uzoraka). Uzorci su bili različiti ili po samom materijalu ili po spojnom sredstvu koje je povezivalo beton i drvo. Glavni cilj istraživanja dugotrajnog ponašanja bio je uspostava svojstava puzanja spojnog sredstva (u kontroliranim i nekontroliranim uvjetima). Uzorci su prikazani na slici 11.

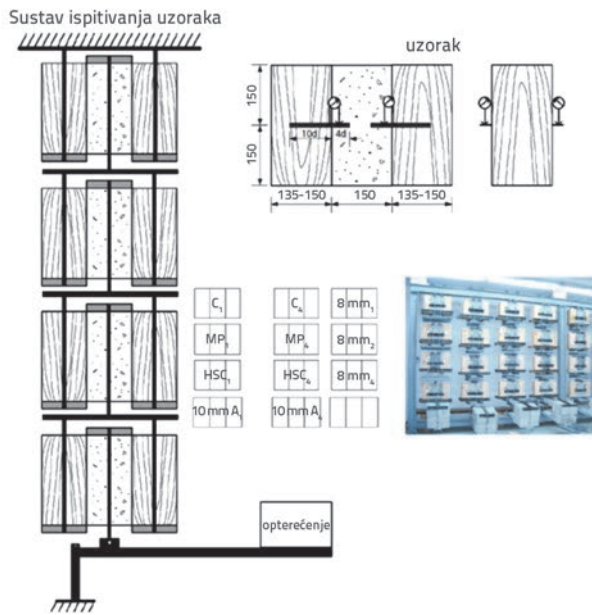
Trajanje ispitivanja razlikovalo se za određene uzorke te je variralo od 655 do 1160 dana. Kako ne postoje analitički modeli za predviđanje dugotrajnog ponašanja spregnutih sustava drvo-beton, modeli primjenjeni za ponašanje spojeva drvo-drvo često služe kao analogija (van de Kuilen [29]).

Autori pretpostavljaju da se dugotrajno ponašanje spoja može vrlo dobro opisati pomoću nelinearnih Maxwellovih elemenata s naprezanjem od $d\epsilon_{el,i}/dt$ koji označava elastično ponašanje materijala, te sa $d\epsilon_{v,i}/dt$ koje označava viskoelastično naprezanje. Zbroj ovih faktora predstavlja klizanje:

$$\frac{d\epsilon_i}{dt} = \frac{d\epsilon_{el,i}}{dt} + \frac{d\epsilon_{v,i}}{dt} \quad (40)$$



Slika 10. Pod i poprečni presjek koji su bili predmet ispitivanja u istraživanju Jorgea i ostalih; uzorci spremni za dugotrajno ispitivanje [18]



Slika 11. Princip ispitivanja uzoraka prema van de Kuilenu i Diasu [28]

Na osnovi sljedećih pretpostavki moguće je dobiti razumno rješenje za model klizanja:

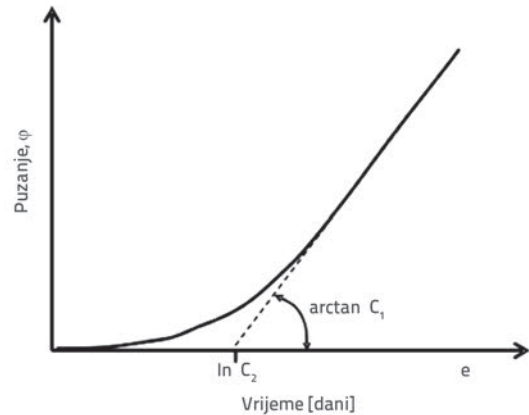
- ponašanje drva može se opisati jednim nelinearnim Maxwellovim elementom;
- elementi su podvrgnuti konstantnom opterećenju;
- vrijeme puzanja je dovoljno dugo da koeficijenti C_1 i C_2 iz sljedeće jednadžbe nisu pod utjecajem sve dok ne dođe do pojave strmog dijela krivulje puzanja (slika 12).

Modul puzanja tada se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$\varphi = \frac{\delta_{\infty} - \delta_{inst}}{\delta_{inst}} = C_1 \ln(1 + C_2 T) \quad (41)$$

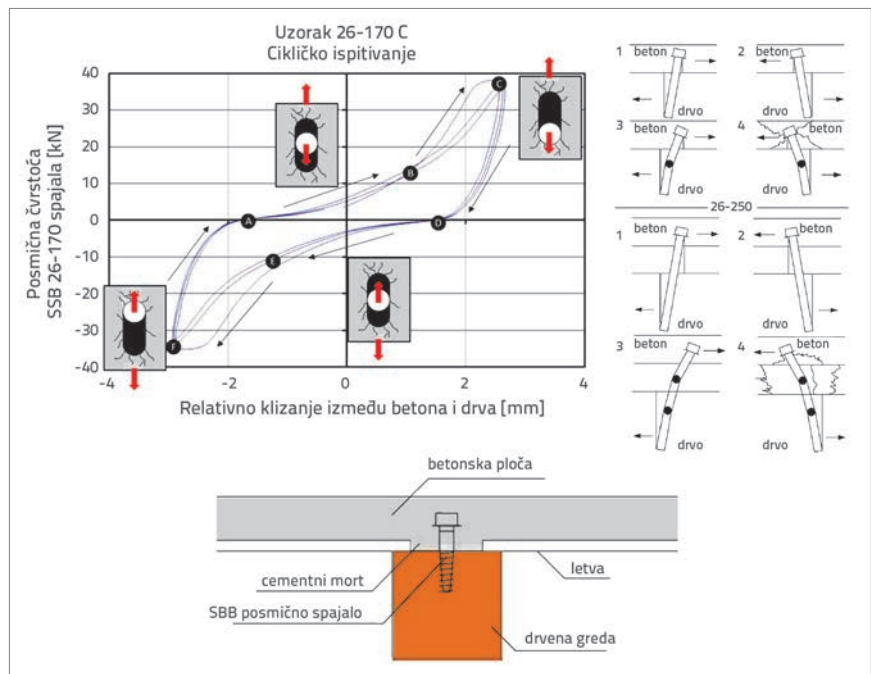
gdje su δ_{inst} inicijalno i δ_{∞} dugotrajno klizanje spoja, T vrijeme, a C_1 i C_2 se zbog složenosti mogu uzeti i izračunati na osnovi rezultata ispitivanja.

Osnovni su zaključci autora da se puzanje sustava uvelike razlikuje ovisno o tome kakvo spojno sredstvo koristimo pri spajanju betona i drva. Isto tako, budući da su ispitani uzorci u kontroliranim i nekontroliranim uvjetima, došlo se do zaključka da je puzanje za klasu uporabivosti 2 gotovo dvostruko veće nego ono za klasu uporabivosti 1. Autori zaključuju da metoda dana u EC5 [2] može biti prihvatljiva za uporabu spojeva drvo-beton za prvu klasu uporabivosti, dok vrijednosti dobivene za drugu klasu vode do nekonzervativnih i neprihvatljivih rješenja pri dugotrajnom opterećenju.



Slika 12. Izračun parametara C_1 i C_2 pomoću dijagrama puzanje - vrijeme [28]

Manthey i ostali [30] promatrali su ponašanje SBB kompozitnog spoja (spoj razvijen u francuskoj tvrtki AIA Ingenieure, slika 13.) na monotona i ciklična opterećenja. Monotonim opterećenjima dobiveno je odlično duktilno ponašanje spoja što daje prednost ovakvom sustavu pri ugradnji u sustave koji se grade na potresno ugroženim područjima. Kod cikličkih ispitivanja ponovno je ponašanje bilo vrlo duktilno bez redukcije u posmičnoj otpornosti pri većim deformacijama. Prema EC8 [31], ovakav spoj može se smatrati energetske disipativnim te se može upotrebljavati bez rizika od pojave krtog loma na samim spojevima greda i ploča. Komparativno ispitivanje analitičkog modeliranja spregnutih konstrukcija drvo-beton predstavili su Khorsandnia i ostali [32]. Dugotrajno ponašanje ovakvih spojeva predstavljeno je u mnogim normama i propisima, i temelji se na puzanju tri



Slika 13. Ponašanje ciklički opterećenog spoja sa SBB spajalom (3 ciklusa) prema ispitivanju Mantheya [30]

materijala. Najopširniji propisi dani su upravo u EC5 [2], gdje je dugotrajna deformacija spregnutih sustava izračunana s dvostruko uvećanim koeficijentom deformacije k_{def} samog spoja. Iako drvo pri kratkotrajnim ispitivanjima pokazuje linearno ponašanje, pri dugotrajnom opterećenju to ponašanje je poprilično nelinearno zbog utjecaja vremenskih prilika kojima je drvo podložno. Kada su naprezanja u drvu manja od 35 % kratkotrajne čvrstoće, drvo se može okarakterizirati kao linearnoviskoelastični materijal u okruženju gdje nema prevelikih odstupanja u relativnoj vlažnosti zraka i temperaturi. Ako su pak činitelji poput temperature i relativne vlažnosti zraka varijabilni, možemo reći da ponašanje drva prelazi u nelinearno. Ponašanje drva u dugotrajnom periodu može se definirati kao kompleksna funkcija ambijentalnih uvjeta i reoloških karakteristika samog materijala. Paralela se može povući i kada govorimo o spregnutim sustavima drvo-beton, pri čemu je stanje još složenije zbog toga što sva tri materijala pokazuju promjene u karakteristikama i redistribuciju naprezanja i deformacija pri promjenama vremena.

5. Zaključak

Spregnuti sustavi drvo-beton iskorištavaju dobre mehaničke karakteristike drva u vlaknu i betona u tlaku, ali je za učinkovito ponašanje sustava potreban djelotvoran spoj odnosno spajalo između ta dva materijala: on mora prenijeti opterećenja s jednog materijala na drugi te osigurati minimalno klizanje među njima. Spregnuti sustavi drvo - beton moraju biti dimenzionirani da zadovolje granična stanja nosivosti i uporabivosti ne samo pri kratkotrajnim, nego i pri dugotrajnim opterećenjima. Pažnju treba obratiti na dva specifična problema:

- 1) duktilnost spoja kojim je određeno kompozitno djelovanje,
- 2) dugoročno ponašanje materijala od kojih je sustav izgrađen na promjene relativne vlažnosti zraka, temperature, opterećenja i vlažnosti samih materijala.

Za rješavanje prvog problema trenutačno postoje dva modela proračuna: linearnoelastična metoda (Ceccotti [3]) i elastoplastična metoda (Frangi [4]).

Linearno elastična metoda je bazirana na pretpostavci da svi materijali ostaju u linearnoelastičnom području sve dok jedna od komponenti ne otkáže (najčešće drveni element ili spajalo). Ta metoda vrlo je prikladna za vrlo krute spojeve drva i betona kao primjerice s utorima u drvu s čeličnim vijcima. Osnovne pretpostavke uzete u proračun su one da se konektori ponašaju savršeno plastično i da drvo dostiže graničnu vrijednost čvrstoće na savijanje. Vlačna čvrstoća betona je zanemarena. Metoda se većinom primjenjuje za kratkotrajne provjere i bazirana je na γ metodi preporučenoj u EC5 [2]. Prema tom modelu proračuna, efektivna krutost koristi se za proračun popustljivosti samog posmičnog spoja. Za izračun efektivne krutosti koristi se koeficijent popustljivosti γ koji ima raspon od 0 (nema kompozitnog djelovanja) do 1 (potpuno, odnosno kruto sprezanje). Za različita granična stanja koriste se različiti

moduli klizanja (K_u i K_{ser}) koji se dobivaju eksperimentalno, kako je propisano u EN 26891 [33].

Elastoplastična metoda predložena je za specifične slučajeve kada do otkazivanja sustava dolazi nakon snažne plastifikacije spojnog sredstva. Takvi slučajevi česti su kod uporabe čeličnih spojnih sredstava male čvrstoće i velike duktilnosti. Granica otkazivanja je dobivena pod pretpostavkom savršeno plastičnog ponašanja spojnog sredstva.

Za proračun pod dugotrajnim opterećenjem najupotrebljivija metoda koja uzima u obzir puzanje sva tri materijala jest *metoda efektivnog modula*, a predložio ju je Ceccotti [3].

Na osnovi Ceccottieva [3] modela objavio je Fragiaco [15] opsežno istraživanje ponašanja spregnutih sustava pod dugotrajnim opterećenjem, gdje na osnovi numeričkih istrživanja evaluirao pojednostavljenu Ceccottijevu metodu. Uključeni reološki činitelji u proračun su: puzanje drvenog elementa i mehaničkog spajala, puzanje betona, skupljanje betona, promjene relativne vlažnosti zraka i temperature. Učinci opterećenja, skupljanja betona i neelastičnih naprezanja zbog okolišnih promjena evaluirani su svaki zasebno približnim formulama te zatim superponirani. Puzanje je uzeto u obzir prema modificiranom modulu elastičnosti. Iako model uzima u obzir znatno više varijabli, u usporedbi s koeficijentom deformacije za vanjske uvjete danim u Eurokodu 5 [2], ostvaruju se manje vrijednosti deformacija, što nam govori da je koeficijent deformacije u EC5 [2] uvijek konzervativan.

Tijekom godina brojni su znanstvenici istraživali ponašanje spregnutih sustava drvo-beton. Kako je svaki sustav drugačiji, teško je odrediti sveobuhvatni proračun spregnutih sustava [35, 36]. Osnovni je zaključak da se metoda preporučena u EC 5 [2] može sa sigurnošću primjenjivati isključivo za proračun sustava koji će se ponašati samo linearnoelastično. Proračun vrlo dobro opisuje granično stanje uporabivosti, ali je ponekad potrebno eksperimentalno dobiti module klizanja.

U spregnutom sustavu različito skupljanje zbog promjena vlage u drvu i betonu vodi do pojave dodatnih unutarnjih sila i deformacija. Skupljanje betona vodi do smanjenja rezultirajućih naprezanja i posljedično do redukcije učinkovitosti samog betona. Iz tog razloga drveni dio presjeka preuzima dodatna naprezanja. Puzanje je sljedeći fenomen koji mijenja naprezanja po poprečnom presjeku spregnutog sustava. Dio s manjim koeficijentom puzanja preuzima veća naprezanja zato što se u drugom dijelu presjeka smanjuje naprezanje (učinak relaksacije naprezanja). U spregnutim sustavima, jednostavan koeficijent puzanja ne može se uzeti u obzir jer on pretpostavlja konstantna elastična naprezanja. Brojni znanstvenici došli su do zaključka da se puzanje i deformacije u spregnutim sustavima ne mogu promatrati samo u početnoj ($t = 0$) i krajnjoj točki ($t = \infty$), već i neke točke u vremenu između krajnjih mogu biti kritične. To se posebno odnosi na razdoblje od prve tri godine do sedam godina jer se u tom periodu beton skuplja znatno brže od drva. Samim time, naprezanja u betonu padaju dok se ona u drvenom dijelu presjeka povećavaju. Empirijske jednadžbe za proračun takvog ponašanja vrlo su složene i zahtjevne, a samim time u

velikoj mjeri neupotrebljive u inženjerskoj praksi. Kao pomoć pri proračunu često se koriste preporučene vrijednosti koeficijentata puzanja koje u svojoj disertaciji predlaže Schanzlin [34]. Kako je područje spajanja betona i drva vrlo široko, a donekle

je i samo dimenzioniranje takvih sustava prema sadašnjim propisima u određenim uvjetima nedorečeno, postoji velik prostor za usavršavanje i istraživanje novih sustava spajanja, a samim time i poboljšanja postojećih normi i propisa.

LITERATURA

- [1] EN 1994-1-1:2004, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [2] EN 1995-1-1, Design of timber structures, Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [3] Ceccotti, A.: Timber-concrete composite structures, *Timber engineering STEP2*, Centrum Hout, NL, 1995.
- [4] Frangi, A., Fontana, M.: Elasto-plastic model for timber-concrete composite beams with ductile connection, *Structural Engineering International*, (2003), 13(1), pp. 47-57., doi: <http://dx.doi.org/10.2749/101686603777964856>
- [5] Ceccotti, A.: Composite concrete-timber structures. *Structural Engineering Material*, 4 (2002), 264-275, doi: <http://dx.doi.org/10.1002/pse.126>
- [6] EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [7] Toratti, T.: Creep of timber beams in a variable environment: Report 31 (Lab. of Struct. Eng. and Build. Physics, Helsinki Univ. of Technology, Finland), 1992.
- [8] Fragiaco, M., Yeoh, D.: The Design of a Semi-Prefabricated LVL-Concrete Composite Floor, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Civil Engineering, 2012.
- [9] Fragiaco, M., Ceccotti A.: Simplified approach for the long-term behaviour of timber-concrete composite beams according to the Eurocode 5 provisions. *Meeting thirty-nine of the Working Commission W18-Timber Structures*, CIB, Florence (Italy), 12, pp. 2006.
- [10] Ceccotti, A., Fragiaco, M., Gutkowski, R.: Design of timber-concrete composite structures according to EC5-2002 version, *Proceedings of the Meeting thirty-five of the Working Commission W18-Timber Structures*, CIB, Kyoto, Japan, September, 10 pp. 2002.
- [11] Ceccotti, A., Fellow, R., Fragiaco, M., Giordano, S.: Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection, *RILEM Materials and Structures*, 40, pp. 15-25, 2006., doi: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-006-9094-z>
- [12] Balogh, J., Fragiaco, M., Gutkowski, R.M., Fast, R.S.: Influence of repeated and sustained loading on the performance of layered wood-concrete composite beams, *Journal of Structural Engineering*, 134(3), 2008, pp. 430-439., doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:3\(430\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:3(430))
- [13] Hailu, M., Gerber, C., Shrestha, R., Crews, K.: Interim report on longterm test on timber-concrete composite beams, *World Conference on Timber Engineering*, Auckland, New Zealand, 2012.
- [14] Fragiaco, M., Ceccotti, A.: Long-term behavior of timber-concrete composite beams. I: Finite element modeling and validation, *J. Struct. Eng.*, (2006), 132(1), pp. 13-22, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:1\(13\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:1(13))
- [15] Fragiaco, M.: Long-term behavior of timber-concrete composite beams. II: Numerical analysis and simplified evaluation, *J. Struct. Eng.*, (2006), 132(1), pp. 23-33., doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:1\(23\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:1(23))
- [16] Rajčić, V., Žagar, Z.: FEM Models of composite timber-lightweight concrete floor structures, *Proceedings of WCTE*, Vol2, pp. 45-53, Whistler Resort, Canada, 2000
- [17] Bou Said, E., Jullien, J-F., Ceccotti, A.: Long term modelling of timber-concrete composite structures in variable climates, in '8th WCTE', *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, Lahti, Finland, 2, pp. 143-148, 2004
- [18] Jorge, L.F., Schänzlin, J., Lopes, S.M.R., Cruz, H., Kuhlmann, U.: Time-dependent behaviour of timber lightweight concrete composite floors. *Engineering Structures* 32 (2010), pp. 3966-3973., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.007>
- [19] Lozančić, S., Takač, S., Bošnjak Klečina M.: Research of the rheological slipping module on the composite Wood-concrete structure samples, *Technical Gazette* 17(3) (2010), pp. 279-283.
- [20] Kuhlmann, U., Aldi, P.: Fatigue of timber-concrete-composite beams: characterisation of the connection behaviour through push-out tests. In: *Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan, 2008.
- [21] Kuhlmann, U., Schänzlin, J.: Grooves as shear connectors for timber-concrete composite decks. *Proc. of the RILEM Conference 'Joints in Timber Structures'*, Stuttgart, Germany, Sept.12-14, pp. 283-290, 2001.
- [22] Fragiaco, M.: A finite element model for long-term analysis of timber-concrete composite beams. *Struct. Eng. & Mechanics*, (2005) 20(2), pp. 173-189., doi: <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2005.20.2.173>
- [23] Möhler, K.: Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengestezten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln, *Habilitation*, Technische Universität Karlsruhe, Germany, 1956.
- [24] Chiorino, M.A., Napoli, P., Mola, F., Koprna, M.: Structural effects of time-dependent behaviour of concrete, *CEB Bull. No. 142/142 Bis*, Georgi Publishing Company, Saint-Saphorin, Switzerland, 1984.
- [25] Kavaliauskas, S., Kvedaras, A.K., Audronis, K., Gurksnys, K.: Evaluation of long term behaviour of composite timber concrete structures according to EC. *Tehnological and economic development of economy*, 11 (4), pp. 292-296, 2005.
- [26] Yeoh, D.: Behaviour and design of timber-concrete composite system, *Doctoral Thesis*, University of Canterbury, 2010.

- [27] Kanócz, J., Bajzecerová, V.: Influence of rheological behaviour on load-carrying capacity of timber-concrete composite beams under long term loading, *Steel Structures and Bridges 2012*, 40, pp. 20-25., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.049>
- [28] Van de Kuilen, J-W.: Dias, A., Long-term load-deformation behaviour of timber-concrete joints, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 164 (SB2), pp. 143-154, 2011., doi: <http://dx.doi.org/10.1680/stbu.10.00021>
- [29] Van der Kuilen, J-W.: Duration of load effects in timber joints, *Doctoral Thesis*, Delft University of Technology, 1999.
- [30] Manthey, M., Nguyen, Q.H., Somja, H., Duchene, J., Hijaj, M.: Experimental Study of the Composite Timber - Concrete SBB Connection under Monotonic and Reversed-Cyclic Loadings, *Materials and Joints in Timber Structures*, Vol. 9, pp. 433-442, 2014., doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_39
- [31] EN 1998-1:2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
- [32] Khorsandnia, N., Valipour, R., Gerber, C., Shrestha, R., Crews, K.: Comparative study on analytical modelling of short- and long-term behaviour in timber-concrete composite systems, *World Conference on Timber Engineering*, Auckland, New Zealand, 2012.
- [33] EN 26891:1991, Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, Belgium
- [34] Schänzlin, J.: Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken (About the long term behaviour of composite floors of board stacks and concrete), *Doctoral thesis*, Institute of Structural Design, University of Stuttgart, 2003.
- [35] Van der Linden, M. L. R.: Timber Concrete Composite Floor Systems - a Calculation Model, *TU Delft rapport 1/HC-11*, 1995.
- [36] Rajčić, V.: Eksperimentalna ispitivanja spregnutih nosača drvo-lagani beton, *Građevinar* 53 (2001), 1, pp. 1-8