

Laboratorijska ispitivanja i obrada podataka o nosivosti na trenje prošupljenih drvenih elemenata za gradnju kuća

Mrkonjić, Klara

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:627125>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-09**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Klara Mrkonjić

**LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I OBRADA
PODATAKA O NOSIVOSTI NA TRENJE
PROŠUPLJENIH DRVENIH ELEMENATA
ZA GRADNJU KUĆA**

završni rad

Zagreb, 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Klara Mrkonjić

**LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I OBRADA
PODATAKA O NOSIVOSTI NA TRENJE
PROŠUPLJENIH DRVENIH ELEMENATA
ZA GRADNJU KUĆA**

završni rad

Mentor:

prof.dr.sc. Vlatka Rajčić, dipl.ing.građ.

Komentor:

Jure Barbalić, mag.ing.aedif.

Zagreb, 2023.

Sažetak

U radu je ispitan inovativni sustav prošupljenih drvenih elemenata za izvedbu blok gradnjom drvenih kuća s ciljem određivanja nosivosti na trenje između elemenata blok sustava. Uvodni dio sadrži opće karakteristike drva i LLD elemenata. Nakon toga je opisano ispitivanje prošupljenih elemenata koje je provedeno u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Svrha ispitivanja je određivanje koeficijenta trenja između dva drvena elementa povezana ljepljivom trakom. Taj podatak nam je ključan za numeričko modeliranje kontakta između elemenata i statički proračun konstrukcije. Također, u računalnom programu *Dlubal RFEM* modelirani su uzorci na kojima se vršilo ispitivanje kako bi poboljšali nosivost za koju je ključna završna obrada kontaktnih ploha.

Ključne riječi: prošupljeni elementi, trenje, lijepljeno lamelirano drvo, drvene kuće

Summary

The paper examined an innovative system of hollow wooden elements for the construction of block wooden houses with the aim of determining the bearing capacity for friction between the elements of the block system. The introductory part contains the general characteristics of wood and LLD elements. After that, the testing of hollow elements, which was carried out in the laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Zagreb, is described. The purpose of the test is to determine the coefficient of friction between two wooden elements connected by adhesive tape. This information is crucial for numerical modeling and static calculation of structures. Also, in the software *Dlubal RFEM*, samples were modeled on which the test was carried out in order to improve the load-bearing capacity, for which the final treatment of the contact surfaces is crucial.

Key words: perforated elements, friction, glued laminated timber, timber houses

Sadržaj

1. Uvod.....	2
2. Drvo.....	3
2.1. Općenito	3
2.3. <i>Log – house</i> tip gradnje drvenih kuća	5
2.4. Sustav drvenih prošupljenih elemenata.....	7
2.5. Sastavljanje drvenih prošupljenih elemenata u konstrukcijsku cjelinu.....	9
3. Opis ispitivanja.....	12
3.1. Općenito	12
3.2. Uzorak za ispitivanje	13
3.3. Postavke ispitivanja.....	17
4. Rezultati ispitivanja.....	19
5. Primjena podataka ispitivanja u računalnom programu.....	21
6. Zaključak.....	28
7. Izvori	29

1. Uvod

Drvo se kao građevinski materijal koristi još od najstarijih vremena za razne čovjekove potrebe. Uz kamen, dugo se smatrao osnovnim materijalom za gradnju zbog svojih velikih područja primjene. Posljednjih nekoliko desetljeća drvo ponovo dobiva na značaju pri izgradnji modernih građevina i objekata sa elementima suvremene arhitekture. Ne zahtijeva složenu obradu zbog čega su troškovi prerade, obrade ali i proizvodnje izrazito niski.

Prednost upotrebe drvenih konstrukcijskih elemenata se ogleda u raznim područjima. Temeljna prednost u odnosu na druge materijale je što se nijedan ostatak građe ne baca, nego se iskorištava pri proizvodnji drugih proizvoda čime se u potpunosti uklanjaju troškovi zbrinjavanja otpada, a novi proizvodi dobivaju na vrijednosti. Također, predstavlja obnovljivi izvor i općenito je manje energetski intenzivan za obradu za razliku od betona i čelika. Drvo je jedini konstruktivni materijal koji ima sposobnost da tijekom rasta apsorbira ugljični dioksid i veže ga za svoju strukturu. Pored svojih brojnih prednosti, također ima i mane koje je potrebno dobro poznavati i sanirati u svrhu povećanja trajnosti konstrukcije. Suvremene metode zaštite omogućuju zaštitu od raznih bioloških, kemijskih i mehaničkih utjecaja.

Razvojem tehnologije lijepljenja događa se veliki napredak u proizvodnji drvenih elemenata. Spajanjem lamela pomoću ljepila dobivamo lijepljene lamelirane proizvode koji danas nalaze sve veću primjenu zbog dobrih fizikalnih svojstava, trajnosti i neograničenosti kada su u pitanju dimenzije i oblik. U usporedbi s masivnim drvom, LLD posjeduje puno veću otpornost na požar, čvrstoću i otpornost na potres, međutim, najveću razliku čini mogućnost premošćavanja velikih raspona bez pojave deformacija.

U novije vrijeme u gradnji drvom počinju se koristiti drveni prošupljeni elementi koji imaju smanjenu vlastitu težinu izvedbom šupljina, ali i brojne druge prednosti u vidu trajnosti i ostvarivanja požarne otpornosti. Svoju primjenu nalaze prilikom izgradnje montažnih kuća zbog jednostavnosti i brojnih prednosti u odnosu na druge tipove nosivih elemenata. Pri tome, njihov spoj se ostvaruje nalijeganjem izbočenog dna jednog elementa na utor vrha drugoga, a uz povezivanje klasičnim (tesarski) vezama u horizontalnoj ravnini tvore dostatno krute nosive konstrukcije. Ipak, zbog reoloških karakteristika s vremenom dolazi do formiranja trajnih deformacija, pri čemu za kompenzaciju koristimo tipske brtve na kontaktima elemenata.

Time dolazimo do glavnog cilja ovog rada, a to je određivanje nosivosti na trenje sustava prošupljenih drvenih elemenata za gradnju kuća i to u slučaju bez i sa primjenom brtvi.

2. Drvo

2.1. Općenito

Prema botanici, drvo se smatra odrvljenom biljkom koja se razmnožava sjemenkama i sastoji se od podzemnog i nadzemnog dijela. Podzemni dio je korijenje koje omogućava stabilnost i upija vodu dok se nadzemni dio dijeli na deblo i grane. U građevinarstvu je od značaja deblo koje se može iskoristiti na razne načine i mora ispunjavati određene mehaničke zahtjeve.

Prirodna otpornost drveta uvjetovana je njegovom strukturom, vlažnošću, hrapavošću površine, čvorovima i drugim nepravilnostima tijekom rasta. Nadalje, na njegovu kvalitetu znatno utječe okolina i uvjeti rasta zbog čega je potrebno uzeti u obzir utjecaj biotičkih i abiotičkih čimbenika kako bi se osigurala tražena otpornost i trajnost elemenata (Slika 1.). Gljive i nametnici predstavljaju najopasnije čimbenike koji utječu na drvo zbog njegovog organskog porijekla.

Biotički čimbenici		Abiotički čimbenici
bakterije	DRVO	vatra, toplina
gljive		utjecaj vremena
nametnici		mehanički čimbenici
čovjek		kemikalije

Slika 1. Biotički i abiotički čimbenici koji ugrožavaju drvo (Gorišek, 2008.)

Prethodno navedeni štetni utjecaji uvjetuju uporabu strukturne i kemijske zaštite. Strukturna zaštita obuhvaća indirektnu mjeru kao što su odizanje drvenih elemenata od tla, zarezivanje u svrhu kontroliranog pucanja te primjenu metalnih spojnih sredstava. Pod kemijskom zaštitom podrazumijevamo završnu obradu korištenjem raznih premaza, lakova i impregnacije.

2.2. Lamelirani drveni elementi

Općenito pojam LLD-a podrazumijeva konstrukcijski element koji je dobiven ljepljenjem dasaka (lamela) odgovarajuće širine i debljine pri kontroliranim uvjetima. Debljina lamela se kreće između 10 i 40 mm.

Drvo je osnovni materijal koji se koristi pri izradi LLD-a te zbog svoje male zapreminske težine olakšava strukturu i omogućava znatnu uštedu na izgradnji. Također, olakšava održavanje i montažu te demontažu. Pored toga posjeduje znatno bolja fizikalna svojstva u odnosu na puno

drvo. Njegove predosti se ogledaju u tome što je moguće stvoriti elemente proizvoljnih dimenzija poprečnog presjeka (Slika 2.) i duljine, uz jedinstvene oblike duž osi elementa (zakrivljeni ili trapezni nosači), a ujedno ostvarujući nosive elemente veće otpornosti na požar i bolje trajnosti.



Slika 2. Ravna lamelirana građa standardnog poprečnog presjeka (lijevo) i velikog poprečnog presjeka (desno)

Prilikom izrade najčešće se koriste četinjače (smreka, jela, bor), dok se listače (hrast ili bukva) rijetko upotrebljavaju zbog povećane mase i teže obradivosti. Najvažnije svojstvo pri odabiru vrste drveta za izradu LLD-a je čvrstoća koju možemo definirati kao najveće naprezanje koje element može podnijeti prije sloma. Posebnu pažnju je potrebno obratiti na to da drvo bude I klase kvalitete, suho, zdravo i bez grešaka.

Lamelirano drvo se proizvodi prema normi HRN EN 14080:2006 kao kombinirano i homogeno i razlikujemo ih prema karakterističnoj gustoći i vrijednosti čvrstoće.

Homogeno: GL24h, GL28h, GL32h, GL36h.

Kombinirano: GL24k, GL28k, GL32k, GL36k.

Jednostavnost proizvodnje LLD-a omogućava znatnu uštedu na vremenu tijekom trajanja projekta čime se ubrzava izgradnja. Korištenje ljepila kao spojnog sredstva je olakšalo cijelu tehnologiju proizvodnje jer nema potrebe za zabijanjem čavala i bušenjem koji zahtijevaju uporabu posebnih alata i vještina.

Mogućnost izrade različitih oblika uz istovremeno zadržavanje karakteristika visoke nosivosti predstavlja jednu od najvećih prednosti LLD-a. Velike estetske kvalitete pridonose široj primjeni jer je omogućena vidljiva struktura nosivih elemenata. U građevinarstvu se mogu koristiti kao vertikalni stupovi, horizontalne grede ili lukovi. Budući da krovne konstrukcije

zahtijevaju i horizontalnu i vertikalnu potporu, zakrivljeni LLD nosač je idealno rješenje jer prenosi sile u oba smjera i omogućava otvoren prostor bez stupova.

Također, izrazito važna kvaliteta lijepljenog drveta je otpornost na požar. Izuzetno dobro podnosi visoke temperature i nakon kontakta s vatrom ostaje u jednom komadu te nastavlja prenositi opterećenje bilo koje konstrukcije. U odnosu na druge materijale, LLD drvo ima mogućnost dužeg zadržavanja oblika tijekom izloženosti požaru, bez savijanja ili krivljenja. Iako gori, ne dolazi do velikih promjena mehaničkih svojstava jer smanjenje dimenzija zbog utjecaja požara ne može dovesti do otkazivanja nosivosti i kolapsa konstrukcije.

Ljepilo koje koristimo kao spojno sredstvo pri proizvodnji, posjeduje svojstva poput vodootpornosti, vatrootpornosti i otpornosti na kemijske utjecaje, stoga se eliminiraju dodatni troškovi površinske zaštite i produžuje vijek trajanja konstrukcije. Zbog navedene povećane otpornosti na agresivne klime i kemijske supstance predstavlja dobar izbor konstruktivnog materijala pri izgradnji bazena i lječilišta ali i objekata predviđenih za skladištenje materijala poput gnojiva, soli i kiselina.

2.3. Log – house tip gradnje drvenih kuća

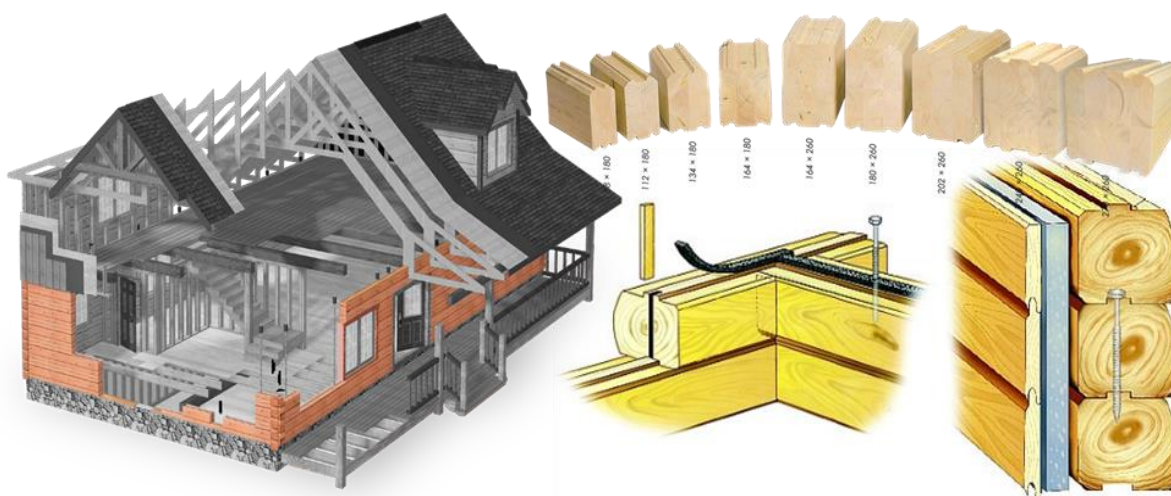
Pojam *log – house* podrazumijeva montažnu kuću čiji su zidovi izrađeni od trupaca naslaganih jedan na drugi, međusobno povezanih u horizontalnim ravninama klasičnim, tesarskim vezama. Zbog lake dostupnosti ravnih i visokih crnogoričnih stabala, u skandinavskim zemljama, baltičkim državama i Rusiji, najčešća tehnika gradnje je drvenim materijalima. Upravo iz tih razloga javlja se i gradnja montažnih kuća (Slika 3.) koje se izrađuju u tvornici, rastavljaju za transport te ponovno sklapaju na mjestu gradnje.



Slika 3. *Primjer log – house tipa gradnje drvenih kuća – tradicionalno (lijevo) i suvremeno (desno)*

Zbog svoje jednostavnosti, konstrukcija može biti spremna za upotrebu u roku šest do osam tjedana. Vrlo je praktično što tvrtke koje se bave njihovom proizvodnjom, nude bogatu kolekciju drvenih kuća sa stotinama kombinacija koje naručitelju omogućavaju izbor po želji ili izradu prema vlastitom dizajnu.

Drveni zidovi i krovna konstrukcija s dobrom izolacijom čine jedinstvenu ovojnicu sprječavajući dodatne gubitke energije i povećavajući udobnost. Tijekom dana izloženo drvo upija toplinsku energiju i zrači je noću. Time je omogućena ujednačena temperatura tijekom cijeloga dana. Kako bi se osigurao što duži vijek trajanja, potrebno je provoditi redovito održavanje cjelokupnosti dijelova.



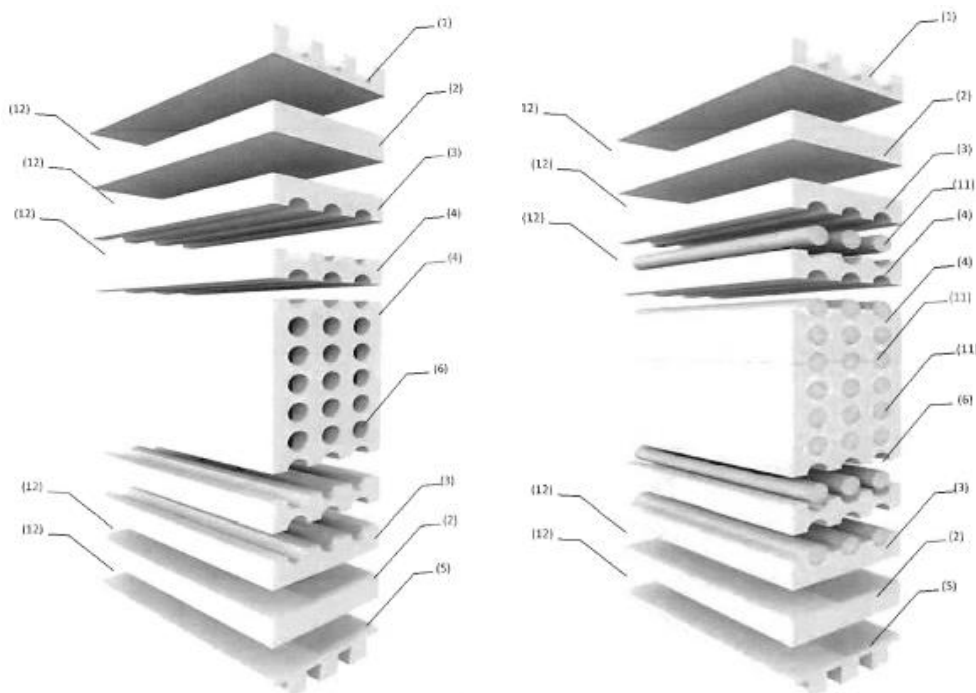
LOG PROFILES	8x12	6x12	8x12 D	6x8 D & 8x8 D	8" 10" 12"	Swedish Cope 8" - 10" 12"
CORNER SYSTEMS	✓	✓	✓	✓	✗	✗
DOVETAIL	✓	✓	✓	✓	✗	✗
SADDLE NOTCH	✗	✗	✓	✓	✓	✓
MORTISE & TENON	✓	✓	✓	✓	✗	✗
CORNER POST	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Slika 4. Prikaz log – house sustava gradnje kuća (gore) s vrstama konstrukcijskih elemenata i veza (dolje)

U najnovije vrijeme kao konstrukcijski elementi zidova koriste se različiti profilirani elementi od punog ili lameliranog drva, dok se međukatne konstrukcije i konstrukcija krova najčešće izvode na klasičan način (Slika 4.). Konstrukcijske elemente razlikujemo po obliku jer mogu biti potpuno zaobljeni, četvrtasti ili u obliku slova *D*. Također, postoji poseban oblik zvan *Swedish Cope* kojeg karakterizira zaobljenost iznutra i izvana ali s utorom u obliku polumjeseca na dnu. Svaki element ima izbočeni vrh i urezano dno kako bi se potpomoglo pri slaganju i smanjila potreba za lomljenjem ali i stvorila čvrsta spojna veza koja se dodatno ojačava ljepilom. Drvo nije u potpunosti zatvoreno što povećava njegovu energetska učinkovitost.

2.4. Sustav drvenih prošupljenih elemenata

Drveni prošupljeni elementi predstavljaju novitet u montažnoj gradnji drvenih kuća. Izrađeni su s ciljem poboljšanja toplinskih, zvučnih i protupožarnih svojstava te smanjenjem negativnih svojstava poput deformacija uslijed skupljanja i bubrenja. Slaganjem oblikovanih lamela tvore se šupljine poprečnog presjeka elipse koje smanjuju masu sklopa do cca 40% u odnosu na puno drvo i omogućavaju umetanje drugog materijala koji smanjuje gorivost.



Slika 5. Drveni prošupljeni element – osnovni oblik (lijevo) i oblik s izolacijskom ispunom (desno)

Poprečni presjek (Slika 5.) je pravokutnog oblika sa duljinama stranica 120/240 mm kojeg karakteriziraju elipsasta prošupljenja pravilno raspoređena na udaljenostima od 25 mm od ruba elementa i međusobnom razmaku od 35 mm po horizontali i 20 mm po vertikali. Svaka lamela

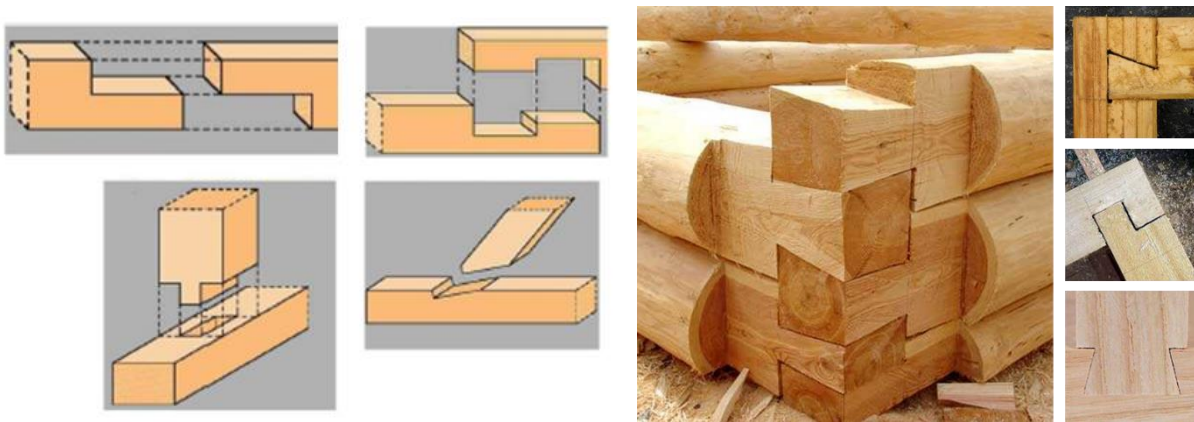
debljine 20 mm profilira se zasebno prije lameliranja i kasnije se pod pritiskom lijepi u cjelinu. Spoj lamela odgovara horizontalnoj osi elipsi, dok su krajnje lamele elementa izrađene s utorima po principu *ključ – brava* kako bi se omogućilo jednostavno slaganje i gradnja bez dodatnih konstruktivnih elemenata (Slika 6.). Pri tome, element može biti nosiv u obje osi.



Slika 6. Prikaz proizvodnje (gore) i montaže (sredina i dolje) drvenih prošupljenih elemenata

2.5. Sastavljanje drvenih prošupljenih elemenata u konstrukcijsku cjelinu

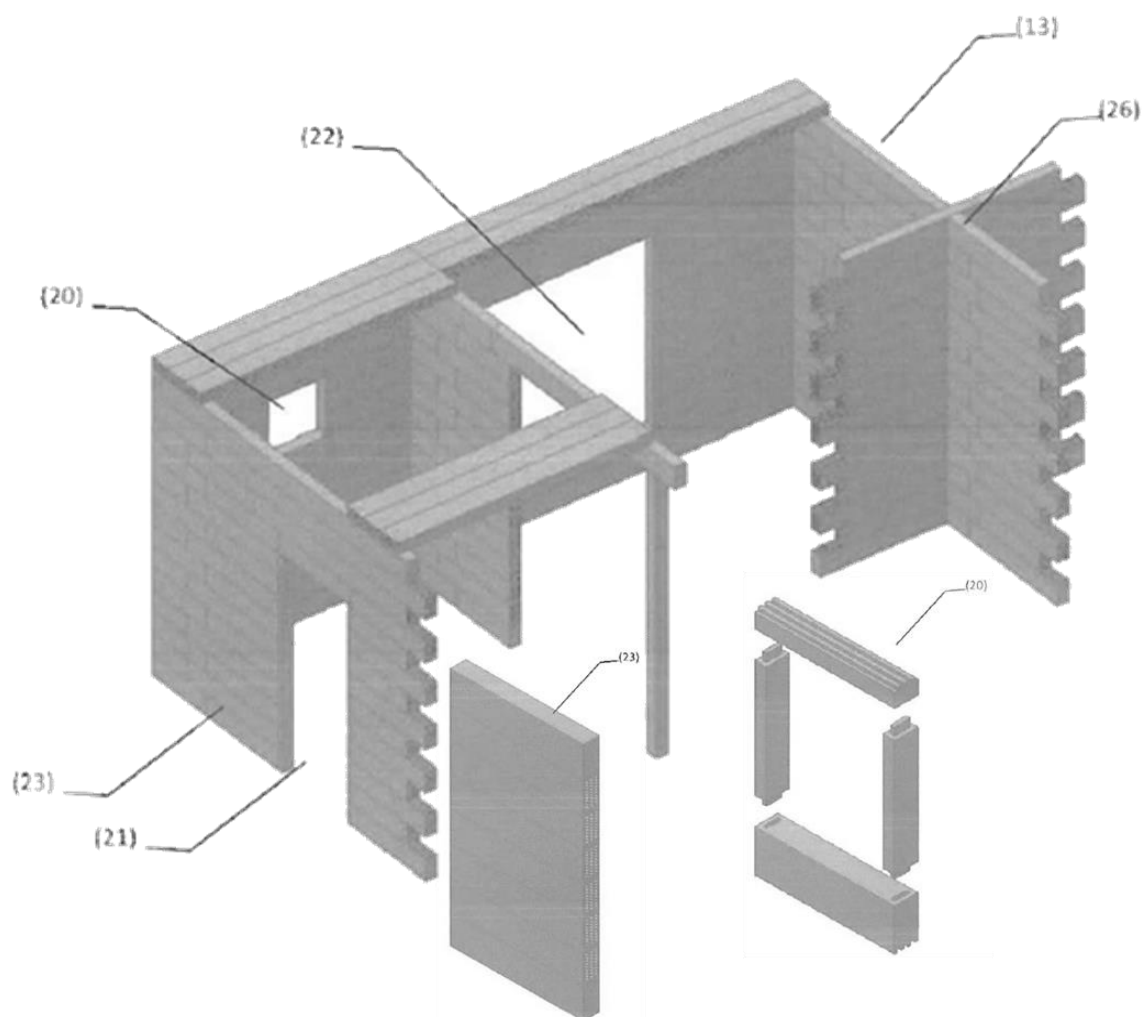
Prilikom izvedbe ovakvog tipa drvenih kuća, neophodna je primjena tesarskih spojeva između samih elemenata, uz dodatno posredstvo vijčane robe i spojne tehnike. Za sidrenje baznih elemenata (prvi elementi u sklopu), koriste se tipski kutnici za preuzimanje posmične sile te sidreni vijci (ankeri) za povezivanje kutnika s AB temeljima, odnosno, vijci za drvo za povezivanje s drvenim elementom. U svrhu postizanja maksimalne krutosti i stabilnosti konstrukcije, vrši se obrada mjesta spoja elementa te se u horizontalnoj ravnini izvode osnovni vezovi sudara, preklopa, učepljenja i nalijeganja (Slika 7.). Kako bi se postigla što bolja upetost veze, najčešće korišteni tesarski spoj je tzv. *lastin rep*, iako su u upotrebi i drugi tipovi spojeva.



Slika 7. Primjeri osnovnih tesarskih spojeva (lijevo) i spojeva po principu tzv. lastin rep (desno)

Kako bi se osigurao prijenos posmične sile, drveni elementi u zidnom sklopu međusobno se duž osi povezuju spojnim sredstvima. Drvena spojna sredstva u formi u obliku trnova, klinova i moždanika u praksi su se tijekom godina koristila sve manje jer nisu imala sposobnost preuzimanja većih opterećenja, a zamjenjivali su ih vijci za drvo. Razvojem tehnologije koja omogućava precizniju i složeniju ugradnju (npr. drveni vijci i slično), kao i razvojem drvne industrije koja osigurava materijale na bazi tvrdog drva s boljim mehaničkim svojstvima, drvena spojna sredstva ponovno se vraćaju u češću upotrebu. Kako bi se spriječilo odizanje zidnih sklopova, ali i osigurao prijenos posmične sile u slučaju kada elementi međusobno duž osi nisu povezani spojnim sredstvima, u uglovima zidnih sklopova, odnosno, na sudarima zidova i uz otvore, postavlja se vertikalna čelična navojna šipka u formi natege. Šipka se sidri u temelj, prolazi kroz sve elemente uz potencijalno nastavljanje pomoću matice te se na vrhu zida uz postavljanje velike podloške za drvo i matice doteže. Elementi međukatne konstrukcije za zidni sklop povezuju se vijcima za drvo.

Kao što je spomenuto, drveni prošupljeni elementi mogu se sastaviti u različite nosive sklopove, uključujući zidove i međukatne i/ili krovne konstrukcije, ali mogu služiti kao zasebni nosivi elementi u formi grede ili stupa (Slika 8.).





Slika 8. Prikaz tipova konstrukcijskih sklopova i načina spajanja drvenih prošupljenih elemenata

Iako se pojedini elementi mogu povezivati u konstrukcijske cjeline direktnim nalijeganjem tvoreći kontaktni sustav drvo – drvo, često se koriste brtve koje se postavljaju između elemenata, posebice na vanjskim, fasadnim zidovima. Zbog reoloških karakteristika drva dolazi do trajnih deformacija kontaktne plohe između elemenata, posebno na mjestima uz otvore u zidovima, zbog čega nastaju praznine koje mijenjaju statičku sliku konstrukcije, a ujedno dopuštaju prolaz zraka. Kako bi se kompenzirale neravnine nastale spomenutim slijeganjem drva te nepravilnosti nastale uslijed proizvodnje i ugradnje elemenata, a ujedno osigurala i zrakotijesnosti zgrade, potrebno je provesti ugradnju prikladnih brtvi, koje mogu biti načinjene od različitih materijala i imati različitu formu (Slika 9.).

CONSTRUCTION SEALING

EPDM BRTVA ZA SPOJEVE




- Hermetično brtvljenje ispitano na blower door test
- Polaganje na suho udarnim približajem
- Ne stvara debljinu jer se potpuno stlači

OPIS PROIZVODA
Naročito prikladna za hermetičke spojeve između drva i drva. Brzo postavljanje udarnim približajem također i pri pojavi vlage.

CONSTRUCTION SEALING			
Širina	Debljina	Boja	Boja
3	300	46	1

DODATNI PROIZVOD

SPUNKA TPI 11			
Širina	Debljina	Boja	Boja
5	500		
8	500		
10	500		

KENAF BAND

IZOLACIJSKI FILC

- 100% prirodna Kenaf vlakna
- Biološki izolator, idealan za bio-graditeljstvo
- Tretiran protiv moljaca

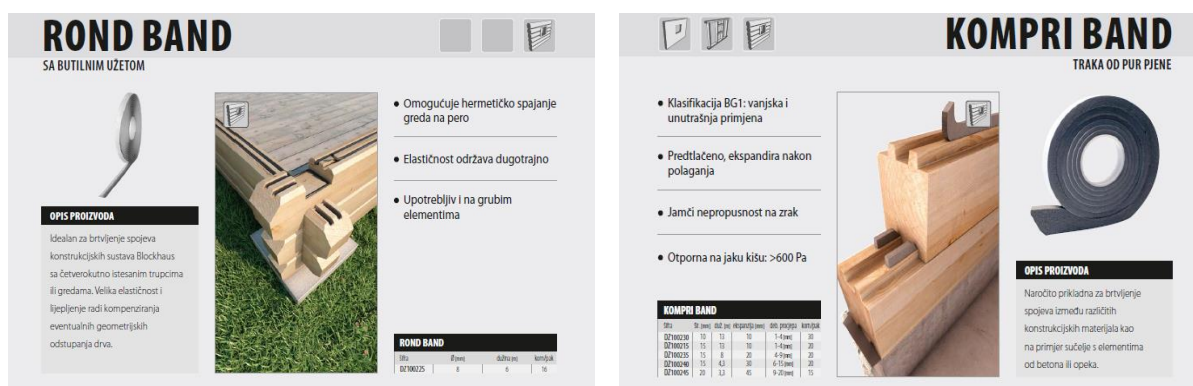



OPIS PROIZVODA
Upotrijebljen kao izolacijske vrpce između grada na pero u strukturama poput Blockhaus-a ili između unutarnjih zidova za primjenu u bio-graditeljstvu. Ne spada u zabranu nametnutu zakonskom uredbom 309/90.

KENAF BAND			
Širina	Debljina	Boja	Boja
100	25	9	2

DODATNI PROIZVOD

PROFESIONALNI SKALPER			
Širina	Debljina	Boja	Boja
120	12	12	12
120	12	12	12
120	12	12	12



Slika 9. Prikaz različitih načina brtvljenja kontakta između elementa zidnog sklopa

Parametri i izrazi za projektiranje ovakvog tipa kuća u literaturi nisu u potpunosti definirani ili su čak neistraženi, a gradnje se najčešće temelji na iskustvenim prijedlozima. Stoga, u cilju što kvalitetnijeg pristupa projektiranju nužno je poznavati prirodu veze između elemenata zidnog sklopa, posebice kada elementi međusobno duž osi nisu povezani spojnim sredstvima. Imajući u vidu da se na kontaktu drvo – drvo javlja sila trenja, a u slučaju primjene brtvi i sila kohezije, za zaključiti je da će se dio posmične sile usred horizontalnih djelovanja (vjetar i potres) zasigurno "potrošiti" na savladavanje kontaktne sile između elemenata. Stoga, cilj ovog rada je definirati veličinu i prirodu kontaktne sile za različiti tip kontakta između elemenata te dati prijedlog implementacije istog u računalnom programu koji se koristi pri projektiranju.

3. Opis ispitivanja

3.1. Općenito

Ispitivanje trenja između drvenih elemenata zidova ključno je za razumijevanje ponašanja cjelokupne konstrukcije tzv. "log-house" sustava gradnje kuća. Kod takvog sustava drveni linijski elementi oslonjeni jedan na drugi po visini prenose vertikalno opterećenje direktnim oslanjanjem, dok se horizontalno opterećenje prenosi dijelom trenjem, a dijelom direktnim kontaktom sidrenog vertikalnog elementa i elemenata "ispune" zida. Pri tome, bitno je odrediti koeficijent trenja za uobičajeni princip slaganja elemenata, kada dva elementa direktno naliježu jedan na drugi, odnosno, koeficijent trenja kada između dva elementa postoji obostrano lijepljiva traka za brtvljenje. Takav podatak nužan je za numeričko modeliranje kontakta između elemenata u računalnom modelu koji služi za statički proračun i dimenzioniranje konstrukcije.

3.2. Uzorak za ispitivanje

Uzorak za ispitivanje (Slika 10.) sastavljen je od jednog središnjeg elementa zida ugrađenog između dva dodatna bočna elementa, pri čemu se razlikuju dvije varijante uzoraka, bez brtvene trake i s dvije brtvene trake u utorima sa svake strane središnjeg elementa. Pozicioniranje elemenata postignuto je profiliranjem pojedinog elementa zida, čime je sprječeno bočno pomicanje. Svi elementi izvedeni su iz mekog prošupljenog lameliranog drva (jela/smreka), pri čemu je potrebno istaknuti da utjecaj presjeka (prošupljeni ili puni) nije od važnosti za ispitivanje (samo vanjska površina elementata). Također, ispitani su i uzorci od tvrdog prošupljenog lameliranog drva (grab), ali su pokazali slično ponašanje kao i oni od mekog. U svrhu ispitivanja korištena je obostrano ljepljiva butilna brtvena traka tipa *Rothoblaas Butyl Band* 15 mm. U svrhu ispitivanja, iz razloga što je kontrolirani unos opterećenja moguć jedino po vertikali, uzorak je zarotiran za 90° u odnosu na stvarni položaj ugradnje.

U cilju određivanja koeficijenta trenja, dva bočna elementa oslonjena su na krutu podlogu, dok je središnji element izdignut od podloge kako bi se omogućilo klizanje istog po kontaktnoj plohi. Kako bi se dobila konstantna kontaktna površina uslijed klizanja, središnji element je pri vrhu stanjen tako da kontakt uslijed klizanja konstantno odgovarao površini u duljini od jednog metra elementa. Ovakav pristup oblikovanja uzorka odabran je u cilju dobivanja podataka točno kako se zadaju u računalnim modelima.



Slika 10. Uzorak za ispitivanje konstrukcijskog sklopa

BUTYL BAND
OBOSTRANO LJEPLJIVA BUTILNA VRPČA

- Hermetično brtvljenje između elemenata
- Visoka moć lijepljenja
- Ojačana mrežom od poliestera

OPIS PROIZVODA

Naročito prikladna za brtvljenje spojeva između drva i drva. Vrpču treba aplicirati trgajući razdvajni film.

Šifra	Širina (mm)	Debljina (mm)	Debljina (mm)	Debljina (mm)	Količina
B2700230	15	15	15	15	20
B2700213	9	10	2	22	22
B2700214	15	10	2	13	13

DODATNI PROIZVOD

PROFESIONALNI SKALPER

Šifra	Debljina (mm)	Debljina (mm)	Debljina (mm)	Količina
A3312	116 (90)	18	3	12
A3316	250 (90)	25	5	12

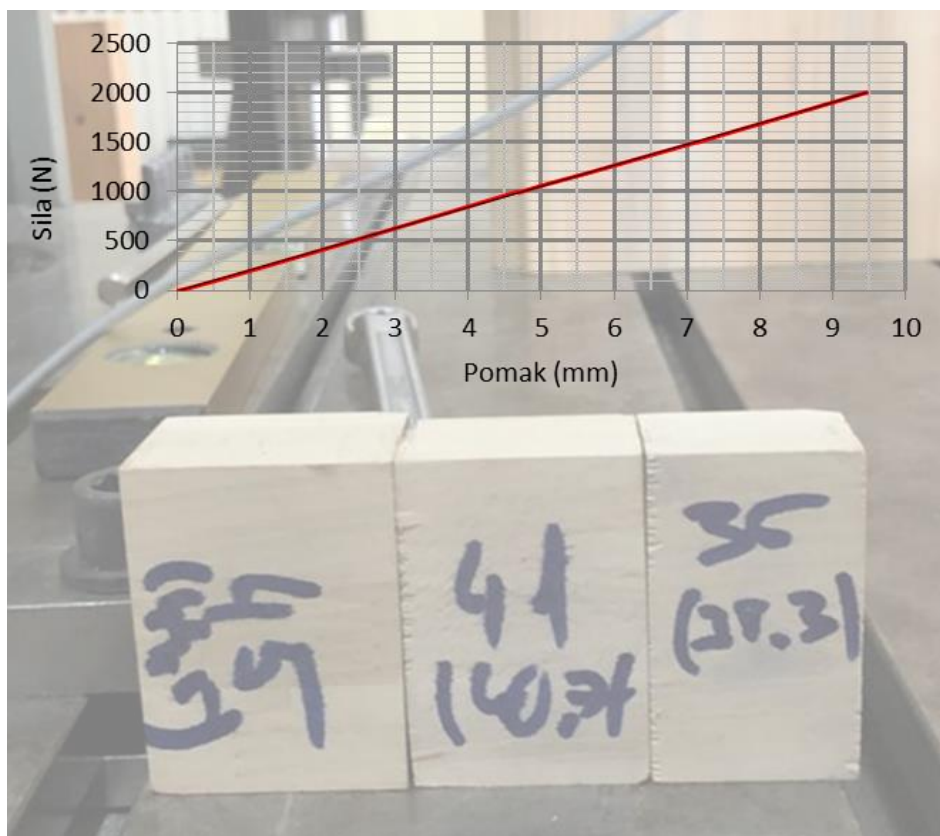


Slika 11. Karakteristike (lijevo) i pozicije (desno) trake za brtvljenje

Prije početka ispitivanja, odnosno, pomicanja središnjeg dijela uzorka unosom kontroliranog vertikalnog opterećenja (pomaka) koji simulira horizontalno opterećenje na zid, osiguran je bočni pritisak između elemenata koji simulira vertikalno opterećenje na zid (Slika 12.). Na taj način izravno se zadaje poznata sila koja djeluje između elemenata, kako bi se na osnovu vertikalnog pomaka, odnosno, odgovarajuće izmjerene sile trenja i kontaktne površine, mogao odrediti koeficijent trenja. Sustav za uvođenje bočne sile sastoji se iz dva osnova dijela postavljena u rubnim četvrtinama ukupne duljine uzorka. Pojedini dio sastoji se od dvije čelične ležajne ploče koje su priljubljene uz vanjske strane uzorka te treće ploče s oprugama. Navedene ploče povezane su dvjema čeličnim navojnim šipkama, pri čemu se uz dodatnu ploču u osi šipki nalaze dvije baždarene opruge. Zatezanjem šipki definira se duljina opruge, odnosno, skraćivanjem opruge ostvaruje se unos sile. Kako bi se odredila i kontrolirala sila koja se unosi, provedeno je preliminarno ispitivanje za određivanje krutosti opruge, odnosno za dobivanje dijagrama sila-pomak. Dijagram na Slici 13. predstavlja omjer sile i pomaka za sve četiri opruge. Krutost jedne opruge određena je na način da je očitano 25 % količine sile na dijagramu. Prednost ovog sustava je njegova jednostavnost i točnost. Razmak između dvije metalne ploče, odnosno duljina opruge, određuje bočnu silu, pri čemu se uvođenje bočnog pritiska ostvaruje su u razini od 1 kN, 2 kN i 3 kN, a radi lakšeg unosa sile izrađeni graničnici (Slika 13.).



Slika 12. Sustav za unos bočnog pritiska između elemenata koji simulira vertikalno opterećenje u zidu te preša za unos kontroliranog vertikalnog opterećenja (pomaka) koji simulira horizontalno opterećenje na zid

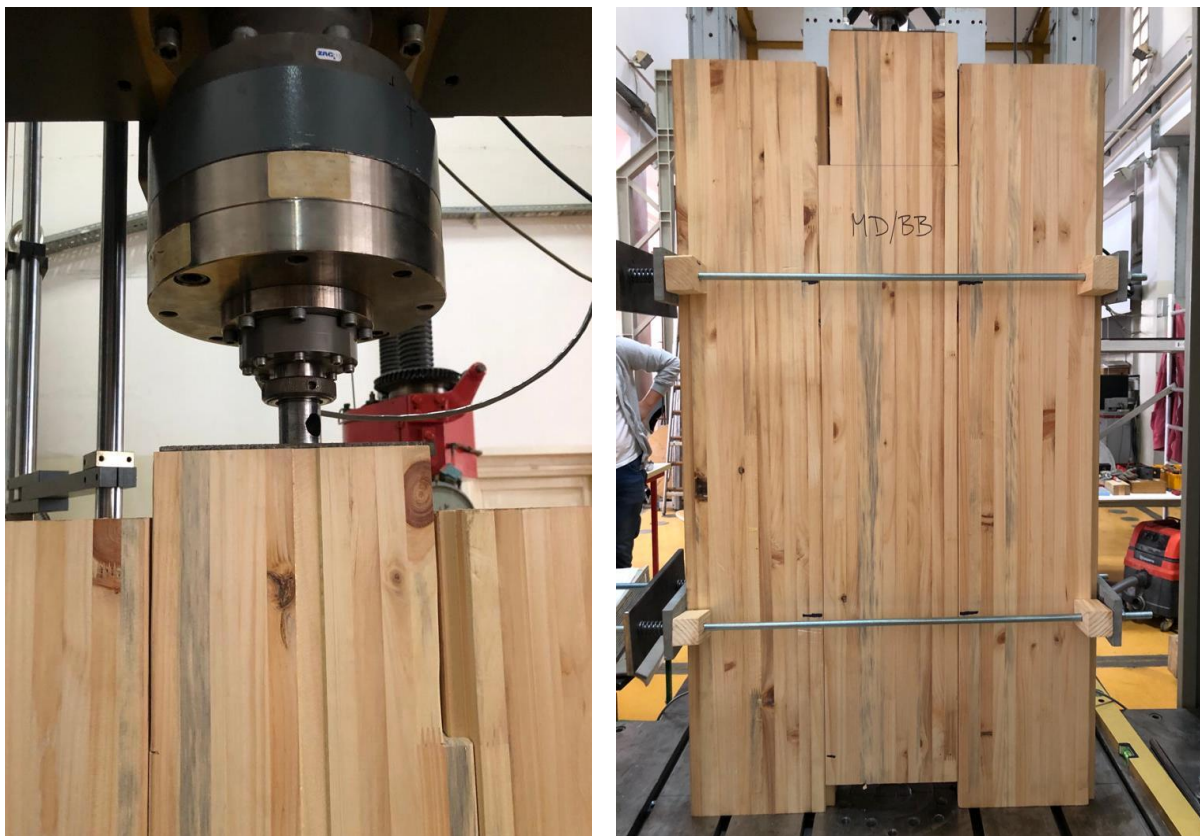


Slika 13. Graničnici za određivanje razmaka između čeličnih ploča (gore), odnosno, za određivanje duljine opruge (dolje), čime se postiže unos sile od 1 kN (45 mm), 2 kN (41 mm) i 3 kN (35 mm)

3.3. Postavke ispitivanja

Nakon pozicioniranja uzorka i postizanja željene bočne sile F_n , zadano je vertikalno opterećenje. Kako bi se omogućilo ravnomjerno opterećenje cijelog presjeka elementa, na kontaktu između preše i središnjeg elementa postavljena je čelična podloška (Slika 14.). Opterećenje je nanošeno pomoću univerzalnog elektromehaničkog ispitnog stroja *Zwick/Roell* opremljenog senzorom sile klase 0.5 u rasponu od 1 kN do 50 kN prema *EN ISO 7500-1:2018* i senzorom pomaka klase 1 prema prema *EN ISO 9513:2012*. Opterećenje je primijenjeno kontrolom pomaka pri brzini od 1 mm/min. Svaki od uzoraka ispitan je bočnim tlačnim opterećenjem od 1 kN, 2 kN i 3 kN, pri čemu je za svaku razinu bočnog opterećenja nanoseno vertikalno opterećenje u ukupnom pomaku do 10 mm. Prije svakog vertikalnog opterećenja, izvršilo bi se predopterećenje s ukupnim pomakom od 1 mm, kako bi se poništili lokalni učinci i osigurala točnost rezultata.

Tijekom eksperimenta mjereno je relativni pomak središnjeg elementa u odnosu na bočne. Pomak je mjereno pomoću dva LVDT uređaja (Slika 15.) s proširenom mjernom nesigurnošću od 5 μm . Za određenu normalnu silu F_n , uz srednju vrijednost dvaju izmjerenih relativnih pomaka, određena je i odgovarajuća sila F potrebna za pomicanje središnjeg elementa.



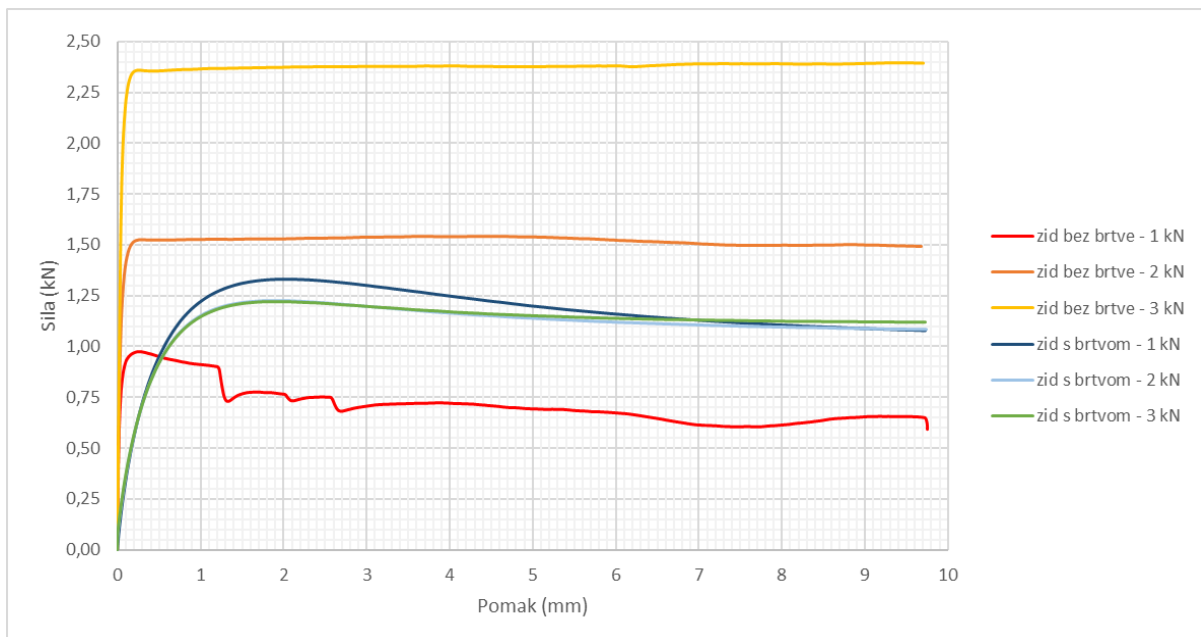
Slika 14. Prikaz unosa vertikalne sile (lijevo) i bočne sile (desno)



Slika 15. Prikaz mjernih mjesta

4. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja grafički se mogu prikazati kao omjer između sile F potrebne za pomicanje središnjeg elementa i pomaka pri određenoj normalnoj sili F_n , kao što je prikazano na Slici 16. Dijagrami sila-pomak za svaki od uzoraka dani su u nastavku. Sila trenja F_t između dva elementa zida, jednaka je polovici sile F potrebne za pomicanje središnjeg elementa. Koeficijent trenja μ pak, dobiven je kao omjer normalne (bočne) sile F_n i sile trenja F_t (Tablica 1.). Pri određivanju koeficijenta trenja, u obzir je uzeta i sila kohezije.

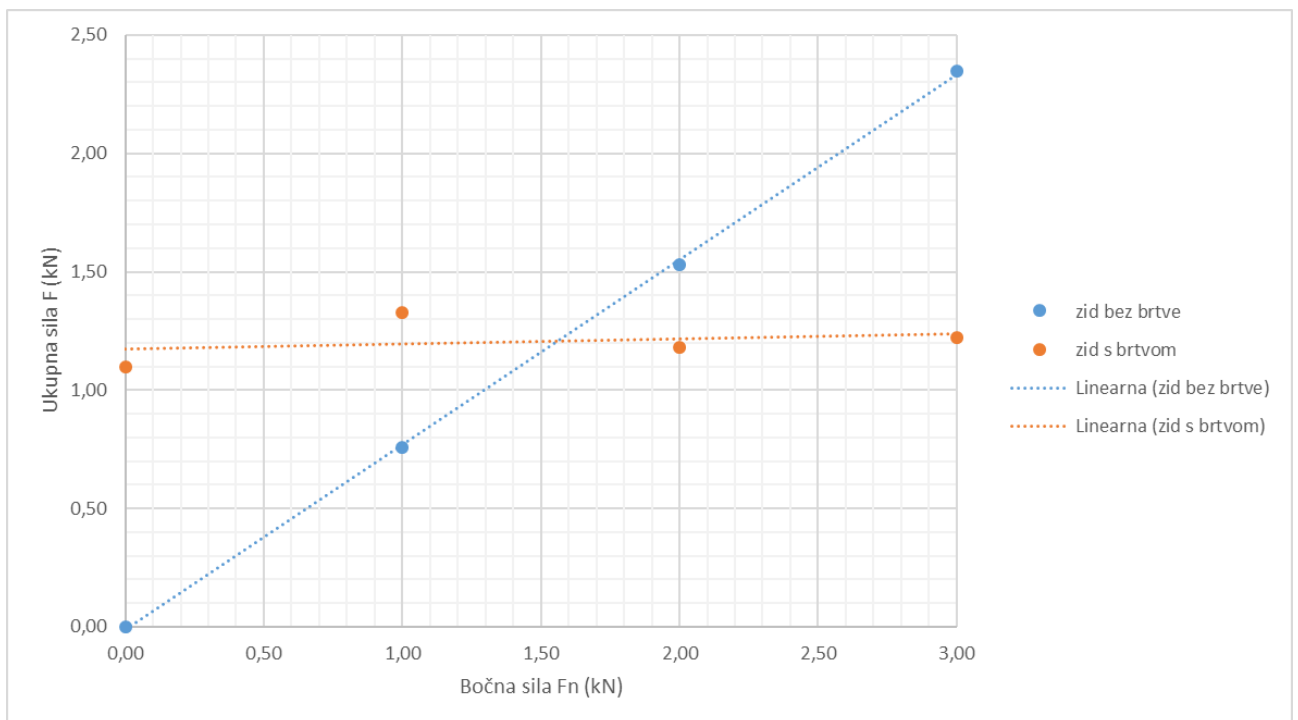


Slika 16. Dijagram sila-pomak za ispitane uzorke

Tablica 1. Rezultati određivanja koeficijenta trenja

uzorak	bočna sila [kN]	ukupna sila [kN]	sila kohezije [kN]	sila trenja [kN]	koeficijent trenja	μ
zid bez brtve	1.00	0.76	0.00	0.76	0.38	0.38
	2.00	1.53	0.00	1.53	0.38	
	3.00	2.35	0.00	2.35	0.39	
zid s brtvom	1.00	1.33	1.28	0.05	0.03	0.02
	2.00	1.18	1.10	0.08	0.02	
	3.00	1.22	1.10	0.12	0.02	

Na temelju prikazanih podataka očekivano se može zaključiti da sila trenja kod uzoraka bez brtve raste linearno s porastom bočne sile (Slika 16.). Koeficijent trenja je podjednak za sve razine bočne sile i iznosi 0.38. Uzevši u obzir da statistička srednja vrijednost koeficijenta trenja za kontakt drvo-drvo varira u intervalu od 0.25 do 0.50, rezultat dobiven ispitivanjem smatra se točnim. U slučaju uzoraka s brtvom, vidljiva je jaka kohezija koja je rezultat lijepljenja brtve i drvenih elemenata. Pri inicijalnoj razini bočnog opterećenja, sila kohezije je veća za cca 15 % u odnosu na ostale razine, iz razloga što je na početku potrebno savladati inicijalni otpor ljepljenja, dok se za ostale razine bočnog opterećenja utjecaj ljepljenja u sili kohezije opada, odnosno, sila kohezije postaje konstantna (Slika 17.). Nadalje, koeficijent trenja za kontakt drvo-brtva, s obzirom na značajan utjecaj kohezije, postiže relativno malu vrijednost u iznosu od 0.02. Stoga je za zaključiti da krutost u sustavu s brtvom prvenstveno ovisi o koheziji na kontaktu ljepljenja s brtve i površine drvenog elementa.

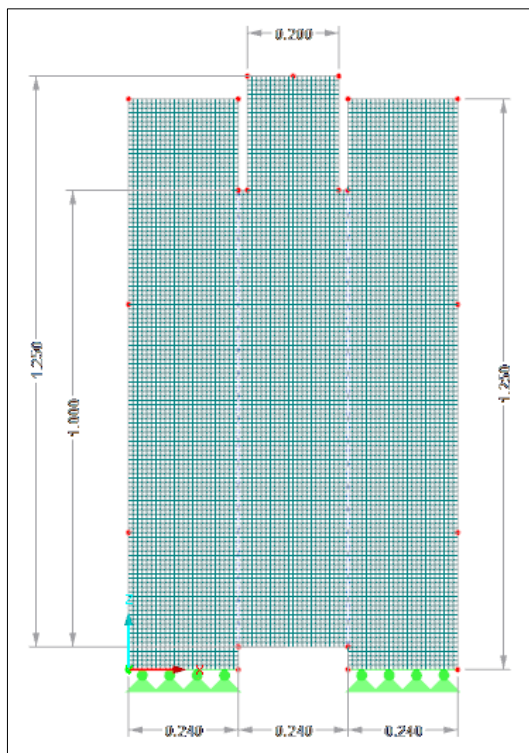


Slika 17. Dijagram odnosa ukupne i bočne sile (koeficijent trenja) s iskazom sile kohezije

5. Primjena podataka ispitivanja u računalnom programu

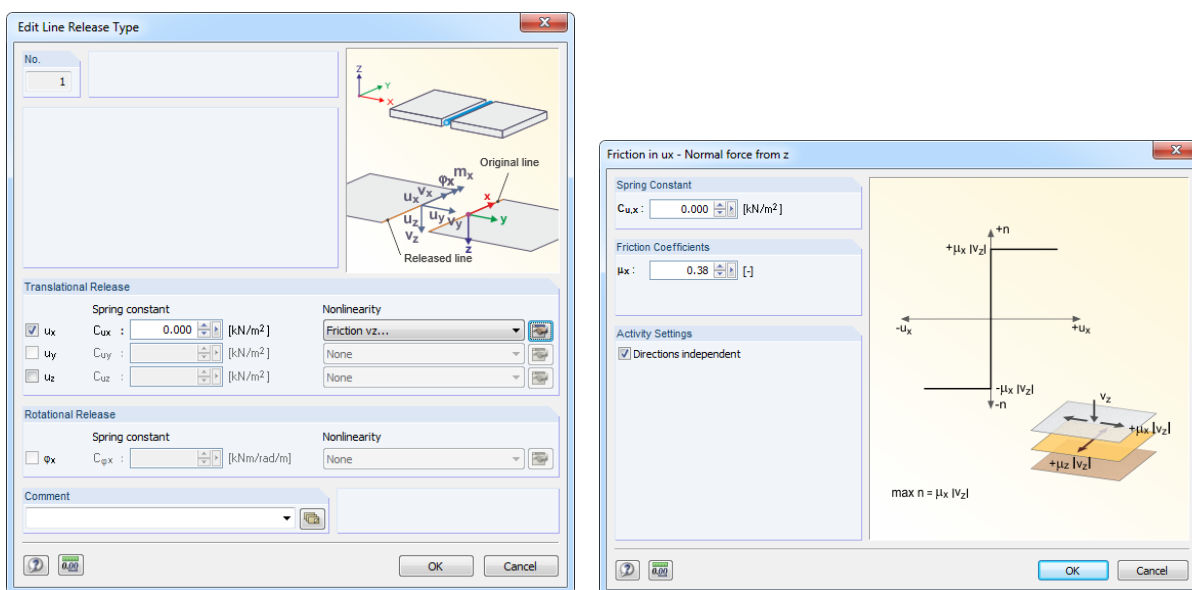
Kako bi se rezultati provednog ispitivanja implementirali u postupak numeričkog modeliranja potencijalne konstrukcije drvenih kuća i/ili konstrukcijskih sklopova, potrebno je verificirati pretpostavke i ulazne parametre za samo modeliranje. U tu svrhu u računalnom programu *Dlubar RFEM* simuliran je ispitani uzorak.

Numerički model uzorka (Slika 18.) koncipiran je na način da su drveni elementi modelirani kao plošni, visine poprečnog presjeka 120 mm. Svi elementi modelirani su u dimenzijama 240/1250 mm, ali je centralni element modeliran s dodatnim suženjem na dimenziju širine od 200 mm posljednjih 250 mm prema vrhu. Centralni element pozicioniran je tako da je izmaknut u odnosu na rubne elemente od dna za 50 mm čim se definira kontaktna linija između rubnih i centralnog elementa u duljini od 1000 mm. Rubni elementi zglobno su oslonjeni o podlogu. Numerički model razmatran je samo u nosivoj ravnini (X-Z) iz razloga što predmetna problematika nema učinak van ravnine. Sami elementi prilikom ispitivanja nisu bili pridržani van ravnine iz razloga što je predviđeno, a i pokazalo se ispravnim, da za predmeta djelovanja mogu ostvariti prostornu stabilnost bez dodatnih pridržanja. Mreža konačnih elementa definirana je s kvadratnim elementima veličine 10/10 mm. Na opisani način, numerički model vjerno prezentira stvarni uzorak.

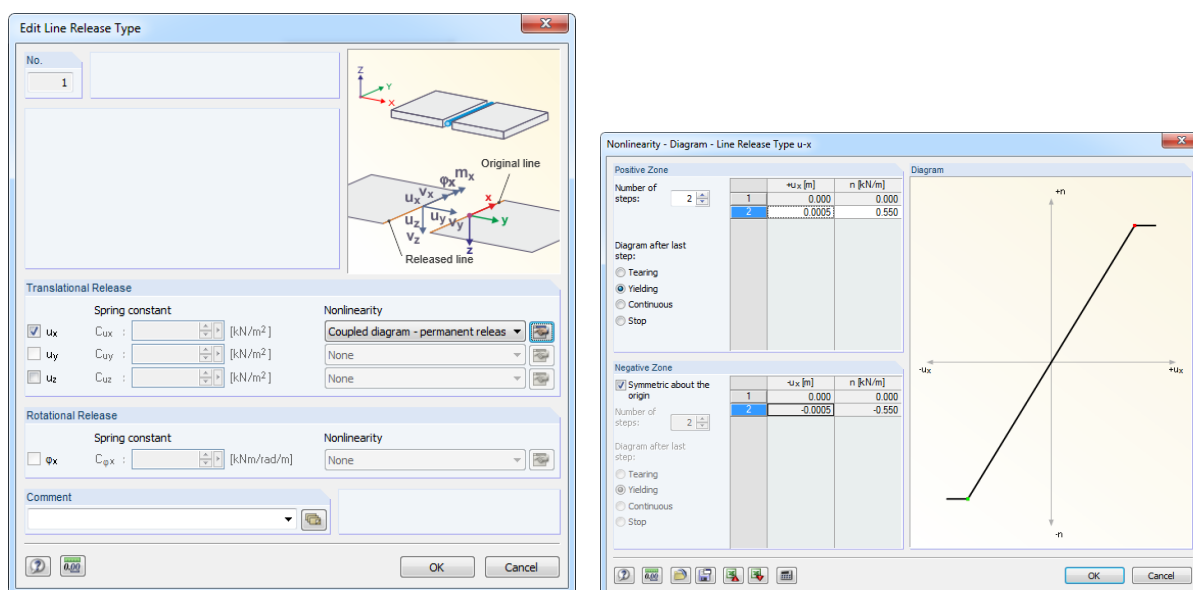


Slika 18. Prikaz računalnog modela uzorka za ispitivanje

Kontaktna linija između rubnih i centralnog elementa definirana je uz pomoć funkcijskog elementa *Line Release*. Kod numeričkog modela za uzorka bez brtve (Slika 19.), definirano je da kontakt između dva elementa može preuzeti samo silu trenja, ovisno o koeficijentu trenja za kontakt drvo–drvo u vrijednosti od 0.38 (kako je određeno ispitivanjem). Kod numeričkog modela za uzorak s brtvom (Slika 20.), definirano je da kontakt između dva elementa može preuzeti samo silu kohezije do $0.55\text{kN/m}'$ (kako je određeno ispitivanjem), dok je dodatni učinak trenja zanemaren zbog malog koeficijenta trenja u iznosu od 0.02 (kako je određeno ispitivanjem). Pri tome, zadano je da do dostizanja sile kohezije kontakt između dva elementa ima linearnu (elastičnu) krutost u iznosu od $1100\text{ kN/m}'$.



Slika 19. Definicija kontakta između dvaju elemenata zida za uzorak bez brtve u numeričkom modelu



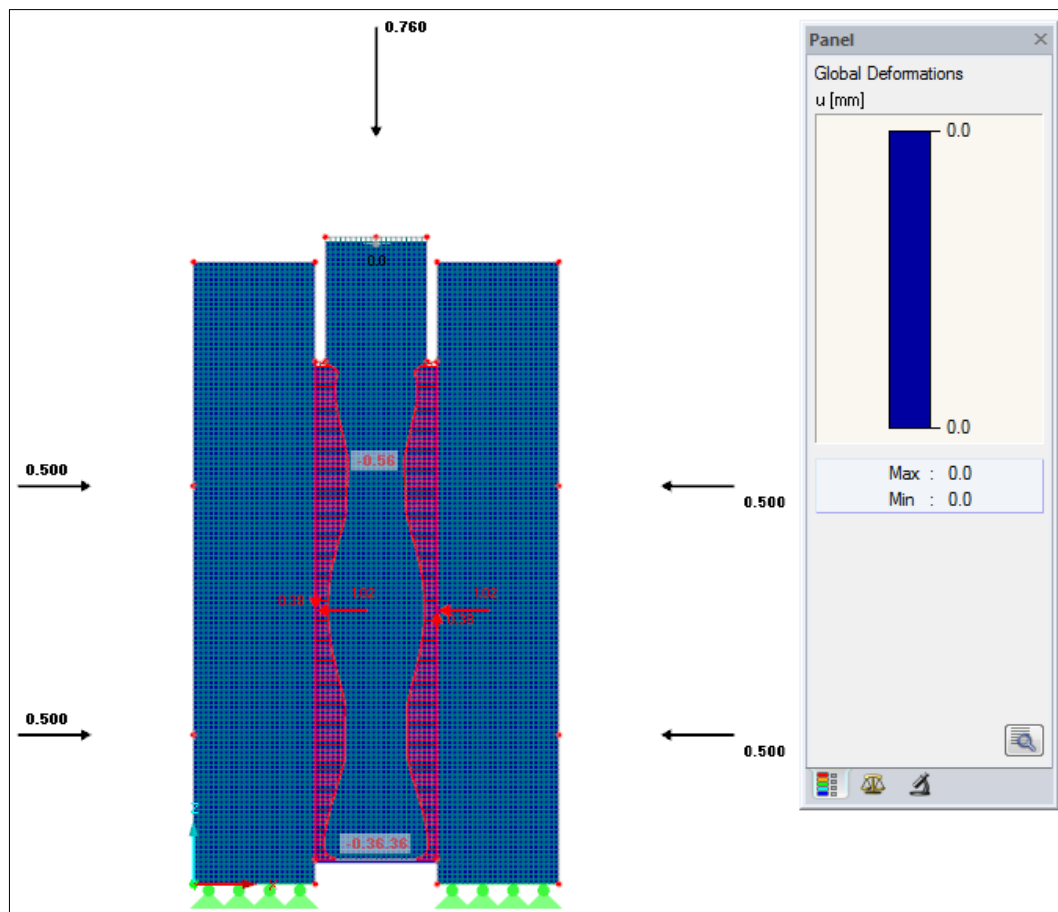
Slika 20. Definicija kontakta između dvaju elemenata zida za uzorak s brtvom u numeričkom modelu

Svojstva kontaktne linije definirana su tako da nakon dostizanja sile trenja u kontaktnoj liniji kod prvog modela, odnosno, sile kohezije u kontaktnoj liniji kod drugog modela, dolazi do slobodne relokacije centralnog elementa. Dakle, do dostizanja sile trenja u kontaktnoj liniji kod modela uzorka bez brtve, centralni element neće se pomaknuti, a nakon dostizanja sile trenja imati će mogućnost slobodnog gibanja po vertikali. Nadalje, do dostizanja sile kohezije u kontaktnoj liniji kod modela uzorka s brtvom, centralni element moći će se pomaknuti najviše 0.50 mm (kako je određeno ispitivanjem), ovisno o intezitetu opterećenja i krutosti kontakta, a nakon dostizanja sile kohezije imati će mogućnost slobodnog gibanja po vertikali. Ovakvim pristupom modeliranju definira se bilinearno ponašanje kontaktne linije, pri čemu prva grana definira odnos sila-pomak do razine dostizanja sile trenja, odnosno, sile kohezije, a druga grana je konstantna i definira rast pomaka za konstantnu silu koja infinitezimalno premašuje vrijednost sile trenja, odnosno, sile kohezije.

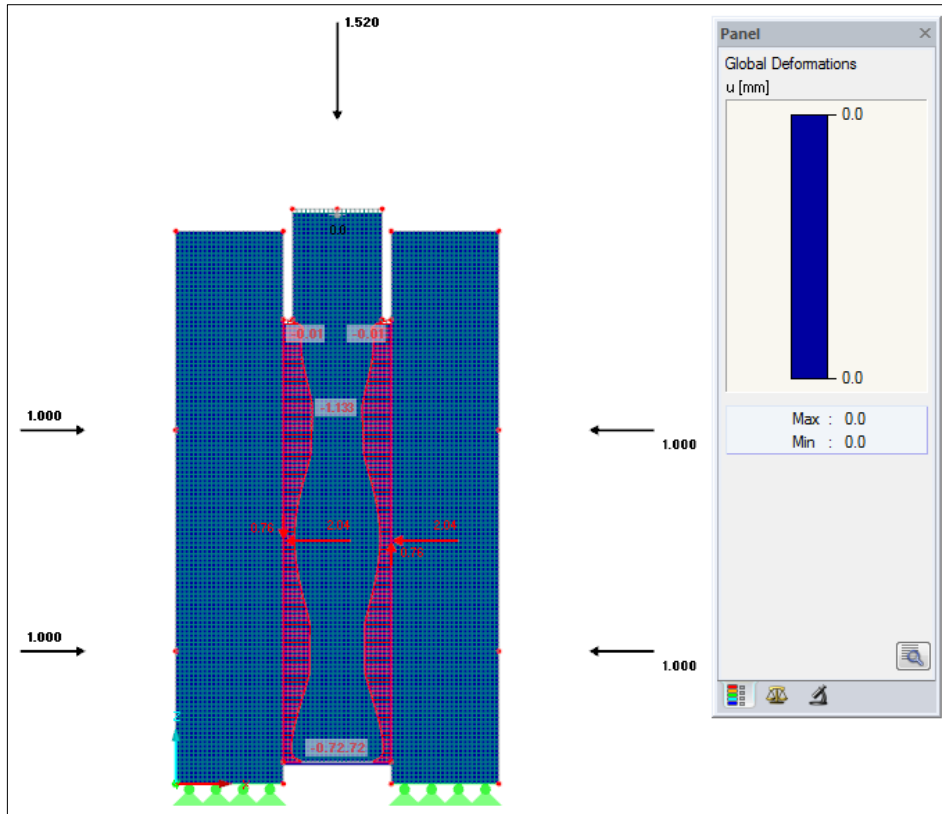
Rezultati dobiveni računalnim programom ukazuju na ponašanje numeričkih modela približno jednako ponašanju uzorka ispitivanih pri različitim razinama opterećenja.

Kod modela uzorka brz brtve, za tri razine opterećenja bočnom silom, u iznosu od 1 kN, 2 kN i 3 kN, centralni element vertikalno je opterećen silama u iznosu od 0.76 kN te dva put i tri put većim silama u iznosu od 1.52 kN i 2.28 kN, odnosno, silama jednakima silama trenja koje su dobivene ispitivanjem. Bez obzira na rezultate ispitivanja pri bočnoj sili od 2 kN i 3 kN (sile trenja jednake su 1.53 kN i 2.35 kN), radi principa modeliranja definiran je linearni rast vertikalnog opterećenja ekvivalentan razinama bočnog opterećenja. Navedenim načinom nanošenja opterećenja u numeričkom modelu, htio se provjeriti iznos i raspodjela sile duž kontaktnih linija. Uslijed porasta bočne sile, u modelu je došlo do promjene resultantne sile na kontaktu između dva elementa. Resultantna sila na svakoj od dvije kontaktne plohe dostigla je vrijednost polovine vertikalnog opterećenja, pri čemu raspodjela sile duž kontakta varira (Slika 21. – Slika 23.). Varijacija sile duž kontakta u modelu srazmjerna je stvarnoj raspodjeli sile trenja, pri čemu sila na mjestima unosta bočnih sila (četvrtine duljine) poprima najveću vrijednost, zatim opada s udaljavanjem od navedenih točki i ponovno se blaže povećava prema rubovima (krajevima) kontaktne linije. Ovakva raspodjela je logična s obzirom na točkasti unos bočne sile te odnos $F_{tr} = \mu N$ (F_{tr} je sila trenja, μ koeficijent trenja, a N bočna sila) i za pretpostaviti je da bi raspodjela bila ujednačenija ukoliko bi se bočna sila unijela kontinuirano. Na spomenutim slikama može se uočiti kako najvećeg vertikalnog pomaka nema jer vertikalno opterećenje nije prešlo vrijednost sile trenja. Pri povećanju razine vertikalnog opterećenja za sve tri razine opterećenja bočnom silom, numerički model pretvara se u mehanizam. Iz navedenog

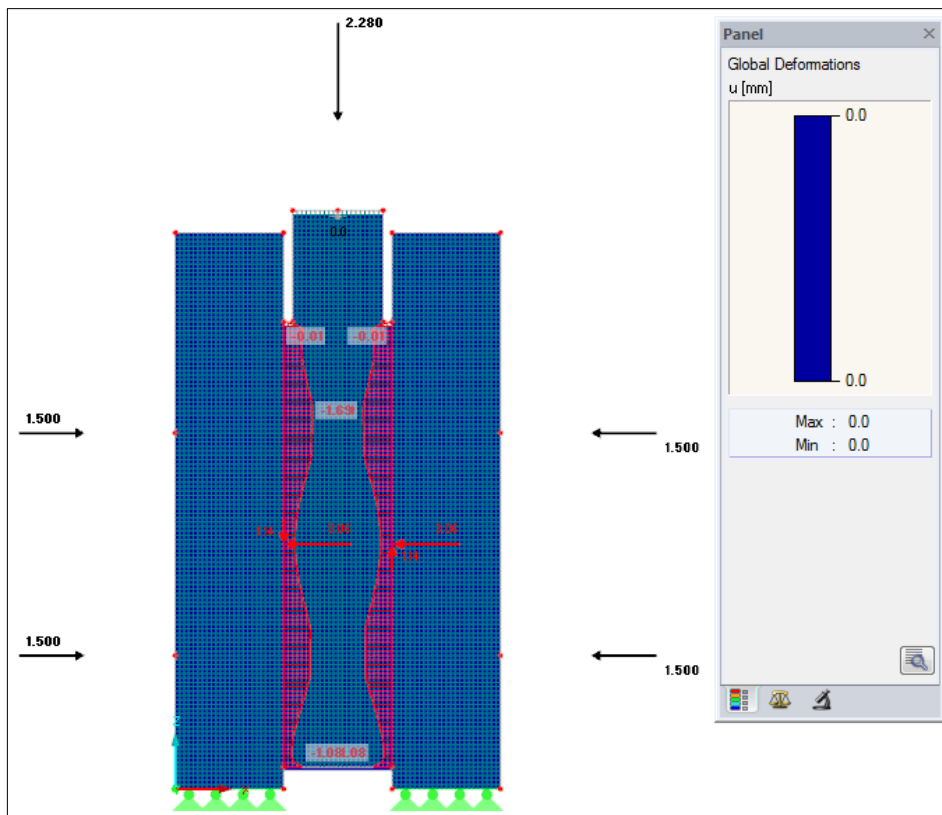
se može zaključiti da se ovakvim pristupom numeričkog modeliranja kontaktne linije može vijerno simulirati ponašanje kontakta drvo–drvo.



Slika 21. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak bez brtve te bočnu silu od 1 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 0.76 kN

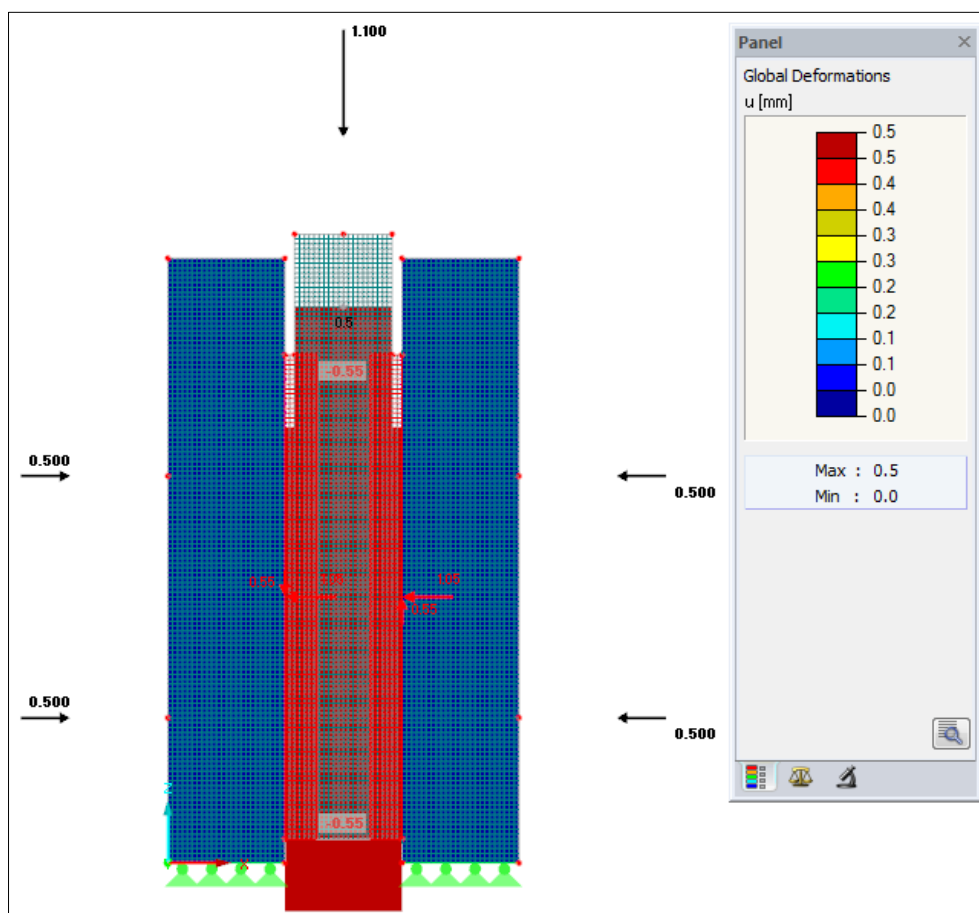


Slika 22. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak bez brtve te bočnu silu od 2 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.52 kN

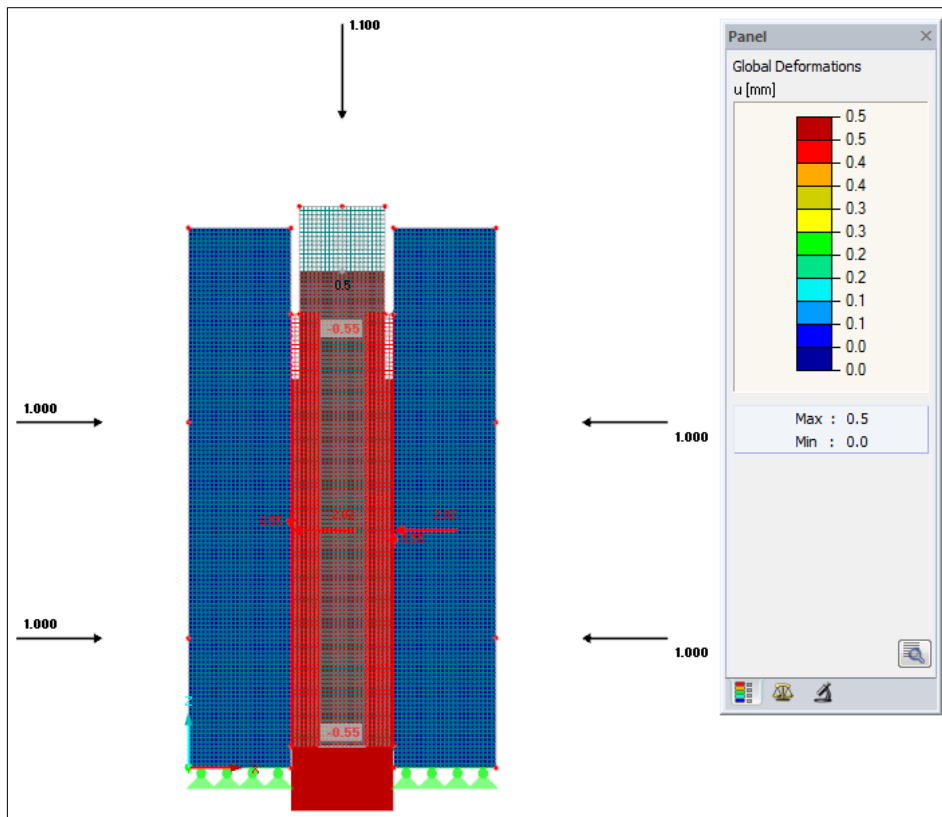


Slika 23. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak bez brtve te bočnu silu od 3 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 2.28 kN

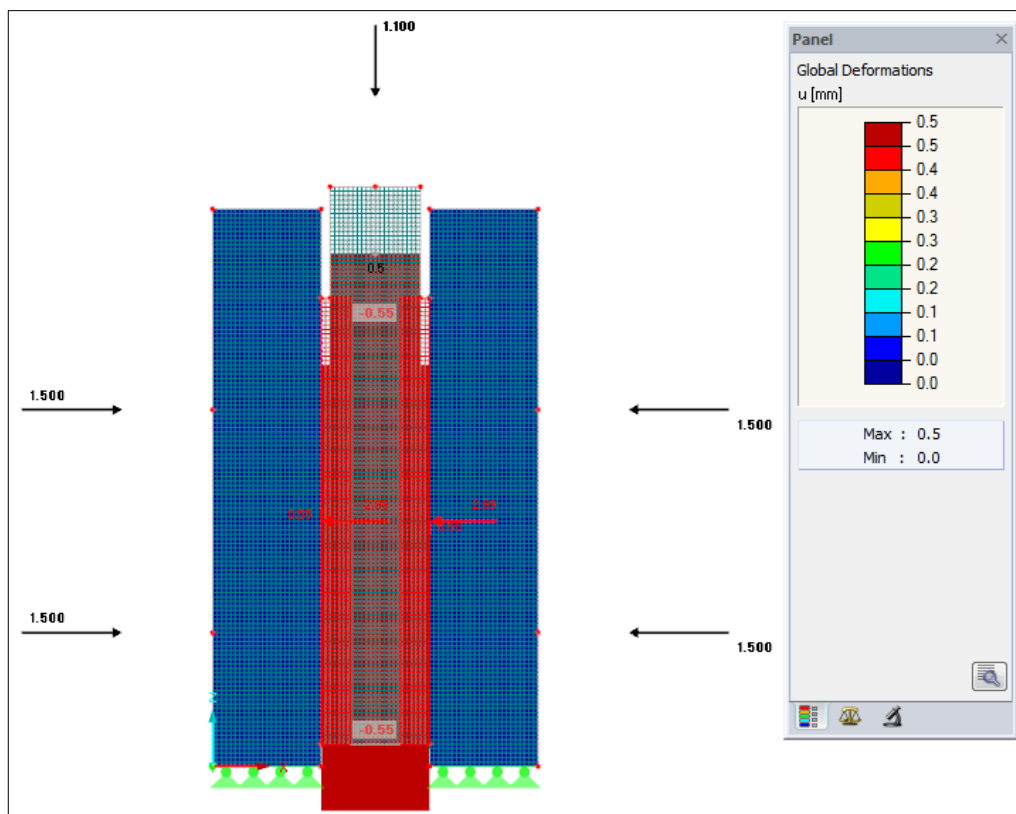
Kod modela uzorka s brtvom, za sve tri razine opterećenja bočnom silom, u iznosu od 1 kN, 2 kN i 3 kN, centralni element vertikalno je opterećen silom u iznosu od 1.10 kN, odnosno, silom jednakoj sili kohezije koja je dobivena ispitivanjem. Bez obzira na rezultate ispitivanja pri bočnoj sili od 1 kN (sila kohezije jednaka je 1.28 kN), radi principa modeliranja definirana je ista vrijednost vertikalnog opterećenja za sve tri razine bočnog opterećenja. Navedenim načinom nanošenja opterećenja u numeričkom modelu, htio se provjeriti iznos i raspodjela sile duž kontaktnih linija. Unatoč porastu bočne sile, u modelu nije došlo do promjene rezultantne sile na kontaktu između dva elementa. Rezultantna sila na svakoj od dvije kontaktne plohe dostigla je vrijednost polovine vertikalnog opterećenja, pri čemu je raspodjela sile duž kontakta konstantna (Slika 24. – Slika 26.). Na spomenutim slikama može se uočiti kako najveći vertikalni pomak odgovara linearnom odnosu sila-pomak za vertikalno opterećenje jednako sili kohezije. Pri povećanju razine vertikalnog opterećenja za sve tri razine opterećenja bočnom silom, numerički model pretvara se u mehanizam. Iz navedenog se može zaključiti da se ovakvim pristupom numeričkog modeliranja kontaktne linije može vjerno simulirati ponašanje kontakta drvo–drvo uz korištenje brtvi.



Slika 24. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak s brtvom te bočnu silu od 1 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.10 kN



Slika 25. Slika 25. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak s brtvom te bočnu silu od 2 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.10 kN



Slika 26. Slika 26. Prikaz kontaktnih sila i pomaka uzorak s brtvom te bočnu silu od 3 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.10 kN

6. Zaključak

U slučaju tzv. "log-house" sustava gradnje kuća, za očekivati je da intenzitet vertikalnog opterećenja povećava lateralnu čvrstoću zbog aktivacije trenja između elemenata zidova. Pri tome, učinak trenja ima bitnu ulogu i u disipaciji energije prilikom djelovanja ciklusa lateralnih opterećenja.

Opće je poznato kako trenje ponajprije ovisi o načinu površinske obrade elemenata, što je i pokazano ispitivanjem kojim se odredio koeficijent trenja u iznosu od 0.38 za kontakt između dva drvena elementa. Nadalje, ispitivanjem je pokazano kako primjenom brtvenih traka takav učinak iščezava, kao i učinak intenziteta vertikalnog opterećenja. Razlog tomu leži u značajnoj koheziji između ljepila na brtvi i površine drvenog elementa, a koju je potrebno savladati prije savladavanja samog trenja. Prilikom prijenosa opterećenja u ovakvom sustavu, kontaktna površina između dva drvena elementa se s ciklusima lateralnih djelovanja mijenja i "nestaje". No, za očekivati je da je promjena koeficijenta trenja tijekom vremena neznčajna. U konačnici, istraživanje je pružilo potrebne podatke za razvoj računalnih modela i smjernica za proračun ovakvog tipa konstrukcija.

7. Izvori

- 1.) Dr. Milan Gojković (1982.). *Drvene konstrukcije*
- 2.) Rajčić, V. (2020.). *Drvene konstrukcije*
- 3.) Graditeljstvo.hr (web portal). Lijepljeno lamelirano drvo <https://www.graditeljstvo.hr/>
- 4.) Timber Blogger (web portal). Glue-laminated Timber Advantages And Disadvantages <https://www.timberblogger.com/>
- 5.) Log house – Wikipedia. (2022.) https://en.wikipedia.org/wiki/Log_house
- 6.) Perković, N., Rajčić, V., Pranjić, M.: Behavioral Assessment and Evaluation of Innovative Hollow Glue-Laminated Timber Elements, *Materials* 2021, 14(22), 6911
- 7.) Ivan Ciglar, Snježana Delladio, doc.dr.sc. Bojan Milovanović (2016.). *Priručnik za trenere – Građevinsko zanimanje tesar*

Popis slika

Slika 1. Biotički i abiotički čimbenici koji ugrožavaju drvo (<i>Gorišek, 2008.</i>).....	3
Slika 2. Ravna lamelirana građa standardnog poprečnog presjeka (lijevo) i velikog poprečnog presjeka (desno) .	4
Slika 3. Primjer <i>log – house</i> tipa gradnje drvenih kuća – tradicionalno (lijevo) i suvremeno (desno).....	5
Slika 4. Prikaz <i>log – house</i> sustava gradnje kuća (gore) s vrstama konstrukcijskih elemenata i veza (dolje).....	6
Slika 5. Drveni prošupljeni element – osnovni oblik (lijevo) i oblik s izolacijskom ispunom (desno).....	7
Slika 6. Prikaz proizvodnje (gore) i montaže (sredina i dolje) drvenih prošupljenih elemenata.....	8
Slika 7. Primjeri osnovnih tesarskih spojeva (lijevo) i spojeva po principu tzv. lastin rep (desno).....	9
Slika 8. Prikaz tipova konstrukcijskih sklopova i načina spajanja drvenih prošupljenih elemenata.....	11
Slika 9. Prikaz različitih načina brtvljenja kontakta između elementa zidnog sklopa.....	12
Slika 10. Uzorak za ispitivanje konstrukcijskog sklopa.....	14
Slika 11. Karakteristike (lijevo) i pozicije (desno) trake za brtvljenje.....	14
Slika 12. Sustav za unos bočnog pritiska između elemenata koji simulira vertikalno opterećenje u zidu te preša za unos kontroliranog vertikalnog opterećenja (pomaka) koji simulira horizontalno opterećenje na zid.....	15
Slika 13. Graničnici za određivanje razmaka između čeličnih ploča (gore), odnosno, za određivanje duljine opruge (dolje), čime se postiže unos sile od 1 kN (45 mm), 2 kN (41 mm) i 3 kN (35 mm).....	16
Slika 14. Prikaz unosa vertikalne sile (lijevo) i bočne sile (desno).....	17
Slika 15. Prikaz mjernih mjesta.....	18
Slika 16. Dijagram sila-pomak za ispitane uzorke.....	19
Slika 17. Dijagram odnosa ukupne i bočne sile (koeficijent trenja) s iskazom sile kohezije.....	20
Slika 18. Prikaz računalnog modela uzorka za ispitivanje.....	21
Slika 19. Definicija kontakta između dvaju elemenata zida za uzorak bez brtve u numeričkom modelu.....	22
Slika 20. Definicija kontakta između dvaju elemenata zida za uzorak s brtvom u numeričkom modelu.....	22
Slika 21. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak bez brtve te bočnu silu od 1 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 0.76 kN.....	24
Slika 22. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak bez brtve te bočnu silu od 2 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.52 kN.....	25
Slika 23. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak bez brtve te bočnu silu od 3 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 2.28 kN.....	25
Slika 24. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak s brtvom te bočnu silu od 1 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.10 kN.....	26
Slika 25. Prikaz kontaktnih sila i pomaka za uzorak s brtvom te bočnu silu od 2 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.10 kN.....	27
Slika 26. Prikaz kontaktnih sila i pomaka uzorak s brtvom te bočnu silu od 3 kN i ekvivalentno vertikalno opterećenje od 1.10 kN.....	27

Popis tablica

Tablica 1. Rezultati određivanja koeficijenta trenja.....	19
---	----