

Utvrđivanje svojstva prionjivosti između čelika i polimerne pjene provedbom testa savijanja kompozitnog panela

Bakran, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:561117>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Antonio Bakran

**Utvrđivanje svojstva prionjivosti između čelika i polimerne
pjene provedbom testa savijanja kompozitnog panela**

Diplomski rad

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Konstrukcije
Lagane konstrukcije**

**Antonio Bakran
JMBAG: 0036475525**

**Utvrđivanje svojstva prionjivosti između čelika i polimerne
pjene provedbom testa savijanja kompozitnog panela**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2021.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Nosive konstrukcije

Tema diplomskog rada

**UTVRĐIVANJE SVOJSTVA PRIONJIVOSTI IZMEĐU ČELIKA I POLIMERNE PJENE PROVEDBOM
TESTA SAVIJANJA KOMPOZITNOG PANELA
DETERMINATION OF ADHESIVE PROPERTIES BETWEEN STEEL AND POLYMER FOAM BY
CONDUCTING THE BENDING TEST OF A COMPOSITE PANEL**

Kandidat: **ANTONIO BAKRAN**

Kolegij: **LAGANE KONSTRUKCIJE**

Diplomski rad broj: **K-2021-20**

Zadatak:

Opisati kompozitne panele koji se primjenjuju u inženjerstvu s posebnim fokusom na primjenu u građevinarstvu. Istražiti materijale koji se koriste za izradu obložnog sloja panela, jezgre panela, te načine na koje se ostvaruje veza između obloge i jezgre. Potrebno je provesti laboratorijsko istraživanje u Laboratoriju za konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci na kompozitnom panelu koji se sastoji od obloge izvedene od pocinčanog lima i ispune od polimerne pjene. Za dva laboratorijska uzorka pripremiti i provesti testove savijanjem u četiri točke primjenom američkih normi ASTM C393/C393M-11 i ASTM D7250/7250M-20. Testom savijanja uzoraka utvrditi svojstva prionjivosti između čelika i polimerne pjene, te odrediti savojna i posmična svojstva obložnih elemenata i polimerne pjene. Za mjerenja pomaka i deformacija na uzorku koristiti LVDT- mjernu opremu te GOM sustav za 3D beskontaktna optička mjerenja.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.

Komentorica:

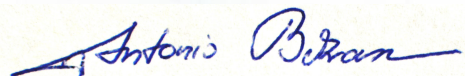
doc. dr. sc. Nina Čeh,
mag. ing. aedif.

Mentorica:

doc. dr. sc. Paulina Krolo,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

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

A handwritten signature in blue ink, reading "Antonio Bakran", written over a light yellow rectangular highlight.

Antonio Bakran

U Rijeci, 31. kolovoza 2021.

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenih projekata

Predgotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način (IRI2)

Voditelj projekta TEHNOPLAST PROFILI d.o.o.

Suradnici na projektu: PALIJAN d.o.o., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

Šifra projekta KK.01.2.1.02

Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

Investigation of behavior of composite panel components with integrated steel core (ZIP UNIRI)

Voditelj projekta Doc.dr.sc. Paulina Krolo

Šifra projekta ZIP-UNIRI-1500-2-20

Financijer projekta Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić

Šifra projekta RC.2.2.06-0001

Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 31. kolovoza 2021.

Mentorica:

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc.dr.sc. Paulini Krolo na pruženom mentorstvu, pomoći i usmjerenju oko izrade ovog rada, ali i brojnim stručnim savjetima tijekom studiranja.

Također, želim se zahvaliti i komentorici doc.dr.sc. Nini Čeh koja mi je omogućila da ljubav prema fotografiji usmjerim ka znanosti te uvidim mogućnosti koje su mi se do nedavno činile samo dio Sci Fi-a.

Konačno, želim izraziti neizmjernu zahvalnost svojim roditeljima i sestrama, koji su mi omogućili sve što sam postigao i bili potpora u svim trenucima studiranja.

Veliko hvala

SAŽETAK

Kompozitni paneli lagane su strukture koje se koriste u komercijalnoj industriji te industriji stambenih zgrada kao glavne nosive i nenosive komponente. Općenito, ti su kompoziti povezani jezgrom sa dva ili više slojeva strukturne stijenke izgrađenih od metala, šperploča ili vlakana. Zajedno ovi materijali se ponašaju kao jedinstveni integrirani sustav. Diplomski rad daje uvid u općeniti prikaz kompozitnih panela, njihov sastav i primjenu u inženjerstvu. Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u okviru projekata Predgotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način te Istraživanje ponašanja komponenata kompozitnog panela s integriranom čeličnom jezgrom provodi se istraživanje ponašanja konstruktivnog panelnog sustava kako bi se istražio potencijal njegove primjene u građevinarstvu. Radom je obuhvaćena tema utvrđivanja svojstva prionjivosti između čelika i polimerne pjene provedbom testa savijanja kompozitnog panela gdje su promatrani pomaci uzoraka uz pomoć LVDT uređaja te optičkom metodom korištenjem GOM Aramis sustava za 3D beskontaktna mjerenja.

Ključne riječi: prionjivost, čelik, polimerna pjena, kompozitni panel, test savijanjem, optička mjerenja

ABSTRACT

Lightweight composite panels are lightweight structures used in the commercial industry and the residential building industry as the load-bearing and non-load-bearing components. In general, these composites are bounded by a core with two or more layers of structural skins made of metal, plywood or fiber. Together, these materials act as a single integrated system. The thesis gives an insight into the general presentation of composite panels, their structure and application in engineering. At the Faculty of Civil Engineering of the University of Rijeka, within the projects Prefabricated buildings of almost zero energy produced in an industrial way and Investigation of behavior of composite panel components with integrated steel core, a study on the behavior of a composite panel system is conducted to study the potential of its application in construction. This paper covers the topic of determining the adhesion properties between steel and polymer foam by performing a bending test of a composite panel where displacements of samples were observed with LVDT devices and an optical non-contact method using the Aramis system.

Key words: adhesion, steel, polymer foam, composite panels, bending test, optical measurements

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

1.	UVOD	1
2.	KOMPOZITNI PANELI.....	3
2.1.	Prednosti i nedostaci kompozitnih panela	4
2.2.	Primjena kompozitnih panela.....	6
2.3.	Sastav kompozitnog panela.....	9
2.3.1.	Površinske obloge.....	9
2.3.2.	Jezgre panela.....	11
3.	ISPITIVANJE KOMPOZITNOG PANELA	16
3.1.	Norme za ispitivanje.....	16
3.2.	Uzorci.....	17
3.2.1.	Izrada uzoraka	18
3.2.2.	Dimenzije uzoraka.....	19
3.2.3.	Način opterećivanja uzoraka.....	21
3.3.	Postava ispitivanja	22
3.3.1.	Postavljanje oslonaca	22
3.3.2.	Postavljanje mjerne opreme	25
3.3.3.	Postavljanje kamera za optička mjerenja	26
3.3.4.	Osiguranje mjerne opreme i ispitnog alata.....	28
3.4.	Provođenje ispitivanja.....	29
3.5.	Rezultati ispitivanja i obrada podataka.....	30
3.5.1.	Ispitivanje PROBA 1 / SP2 – 45.....	31
3.5.2.	Ispitivanje PROBA 2 / SP2 – 45.....	35
3.6.	Oblici sloma uzoraka i uočene nepravilnosti prilikom ispitivanja.....	39
3.6.	Utvrđivanje čvrstoće između čeličnog lima i jezgre polimerne pjene	42
4.	ZAKLJUČAK.....	43
5.	LITERATURA.....	45

PRILOZI

POPIS SLIKA

Slika 1 Shematski prikaz kompozitnog panela (izradio autor).....	3
Slika 2 Prikaz usporedbe kompozitnog panela i I-grede (izradio autor).....	4
Slika 3 Presjek kroz krilo aviona s prikazom izvijanja obloge u slučaju korištenja I-profila te kompozitnog panela [4]	5
Slika 4 Centar za kuglanje Martigny [5].....	6
Slika 5 Mobilne kuće [6] Slika 6 Kontejnerske kuće [7]	7
Slika 7 Kompozitni paneli u sastavu hladnjače [8]	7
Slika 8 Kompozitni paneli u konstrukciji vjetroelektrane [9]	8
Slika 9 Detalj konstrukcije krila aviona s prikazom korištenja kompozitnih panela [10].....	8
Slika 10 Prikaz zaštite radara – Radome [11].....	8
Slika 11 Fasadni panel sa oblogom od čeličnog pocinčanog lima [13]	10
Slika 12 Kompozitni panel s oblogom od ugljičnih vlakana [14]	10
Slika 13 Osnovne grupe tipova jezgri [1]	11
Slika 14 Kompozitni panel s jezgom od balse [16].....	12
Slika 15 Prikaz vrsta geometrije sačastih jezgri: (a) trokutna, (b) valovita , (c) kvadratna, (d) pravokutna (e) i (f) šesterokutna [18]	12
Slika 16 Prikaz proizvodnje valovanjem [20]	13
Slika 17 Prikaz proizvodnje proširenjem [20].....	14
Slika 18 Prikaz uobičajenog materijala (convetnional) i materijala s negativnim Poissonovim omjerom (auxetic) [21]	14
Slika 19 Dimenzije uzorka za ispitivanje prionjivosti savijanjem za uzorke polimerne pjene i čelika [23].....	16
Slika 20 Prikaz ispitnog bloka s oznakama ploča u sastavu površinske obloge (izradio autor)	18
Slika 21 Prikaz izmjere uzorka a) uzdužni pogled; b) poprečni pogled (izradio autor)	19
Slika 22 Prikaz slučajeva opterećenja uzorka, a) 3PB - opterećenje na sredini raspona, b) 4PB - opterećenja na trećinama raspona, c) 4PB - opterećenja na četvrtini raspona (izradio autor)	21
Slika 23 Prikaz izvedbe oslonca (fotografirao autor)	23
Slika 24 Prikaz sistema za dvostruko opterećenje (izradio autor)	23
Slika 25 Postava za izvođenje ispitivanja savijanjem u 4 točke (izradio autor)	24
Slika 26 Prikaz pozicija LVDT uređaja (izradio autor)	25
Slika 27 Prikaz pozicija LVDT uređaja a) LVDT-2 b) LVDT-3 (fotografirao autor)	26
Slika 28 Prikaz markiranja uzorka (fotografirao autor).....	27

Slika 29 Prikaz markiranih oslonaca i točkaca na stjenkama (fotografirao autor).....	27
Slika 30 Prikaz drvenih gredica radi sprječavanja oštećenja LVDT uređaja (fotografirao autor)	28
Slika 31 Prikaz pridržanja HEB-100 profila radi sprječavanja oštećenja optičkih kamera (fotografirao autor).....	28
Slika 32 Prikaz aktuatora kapaciteta 500 kN (lijevo) i 250 kN (desno) [26].....	29
Slika 33 Ispitivanje uzroka SP2-45 (fotografirao autor)	30
Slika 34 Određivanje progiba iz izmjerenih pomaka (izradio autor).....	33
Slika 35 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 1/ SP2-45 – pogled sprijeda (fotografirao autor)	39
Slika 36 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 1/ SP2-45 – detalj (fotografirala Doc. dr. sc. Paulina Krolo)	39
Slika 37 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 2/ SP2-45 – pogled sprijeda (fotografirao autor).....	40
Slika 38 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 2/ SP2-45 – pogled straga (fotografirao autor)	40
Slika 39 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 2/ SP2-45 – pogled bočno (fotografirala Doc. dr. sc. Paulina Krolo)	40
Slika 40 Prikaz ispitivanja tavalona, te shematski prikaz pomaka točkaca T1 i T2 a) bez korištenja konveksne ploče; b) sa korištenjem konveksne ploče (izradio autor).....	41
Slika 41 Prikaz konveksne ploče na poziciji između klipa aktuatora i HEB-100 profila (izradio i fotografirao autor).....	41

POPIS TABLICA

Tablica 1 izmjerene dimenzije jezgre pojedinih uzoraka.....	20
Tablica 2 Izmjerene dimenzije obloge pojedinih uzoraka	20
Tablica 3 Proračunane gustoće jezgri uzoraka na temelju izmjerenih i proračunatih veličina	20
Tablica 4 Usporedba maksimalnih pomaka zabilježenih različitim mjernim metodama	32

1. UVOD

Kombiniranjem elemenata različitih materijala moguće je postići da nedostatke jednog materijala zamijenimo prednostima drugog. Time se dobiva kompozitni element, odnosno panel za slučaj kada jedan element obložimo drugim i međusobno ih povežemo u cjelinu.

Kompozitne panele susrećemo gotovo svakodnevno a da toga nismo niti svjesni. Dokaz o njihovoj rasprostranjenosti govori činjenica da se koriste u avio, vojnoj i automobilskoj industriji te brodogradnji i građevini. Koriste se čak i pri svemirskim istraživanjima. Mala težina, velika čvrstoća i krutost te dimenzijska postojanost, upravo su razlozi zašto je njihova primjena toliko raširena. Industrijska proizvodnja kompozitnih panela, omogućuje njihovu brzu, kvalitetnu i ekonomičnu proizvodnju čime se postiže proizvod koji se može odmah ugraditi i iskoristiti. Korištenjem kompozitnih panela, udaljavamo se od tradicionalnih materijala kao što su to drvo, čelik i beton, a time se nameću nove potrebe za spoznajama i ispitivanjima. Upravo želja za odstupanjem od tradicionalnog, navela me na istraživanje i proširivanje vidokruga o materijalima koji su toliko rasprostranjeni, a opet tajanstveni.

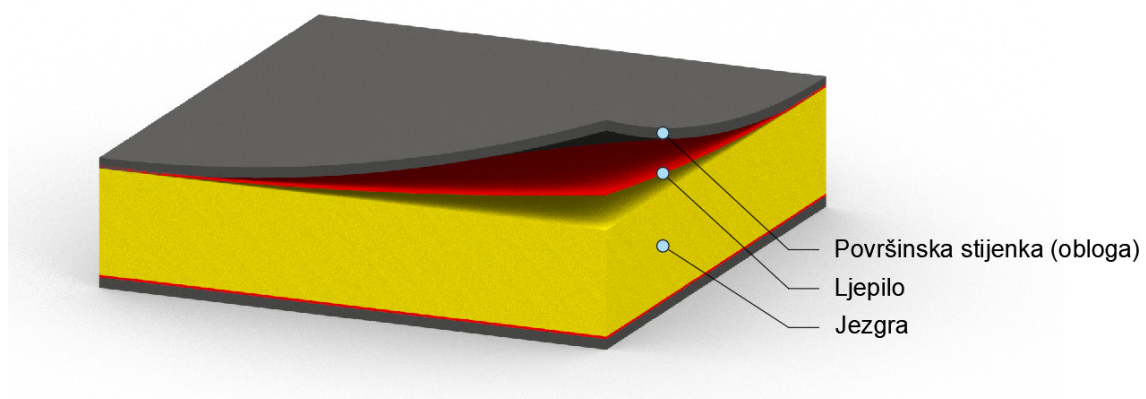
U ovom je radu definiran kompozitni panel, a radi boljeg razumijevanja njegovog ponašanja, uspoređen je sa I profilom. Dan je uvid u njegov sastav, odnosno u materijale koji se koriste za izvedbu panela te način krojenja panela. Kroz rad je prikazana rasprostranjenost korištenja kompozitnih panela sa opisanim prednostima i nedostacima koja se javljaju.

U sklopu rada provedeno je ispitivanje kompozitnog panela, tj. utvrđivanje svojstva prionjivosti između čelika i polimerne pjene provedbom testa savijanja kompozitnog panela. Osim utvrđivanja svojstava, prikazano je cjelokupno provođenje ispitivanja gdje su opisani uzorci te njihova proizvodnja i oblikovanje, odnosno načini njihova opterećivanja te odabir najpovoljnije varijante. Opisana je i korištena mjerna oprema, a posebna pažnja posvećena je njezinoj sigurnosti od oštećivanja. Također, dan je uvid u normative koji se koriste prilikom ispitivanja te uvjete koje propisuju.

Cilj ovog rada je proširivanje saznanja o kompozitnim panelima te njihovoj primjeni, a kroz ispitivanje panela dobivanje informacija o ponašanju panela i njegovoj čvrstoći. Također, potrebno je napomenuti da je ispitivanje provedeno u sklopu projekata Predgotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način i Istraživanje ponašanja komponenata kompozitnog panela s integriranom jezgrom, te da su ispitivanja služila kao preliminarni testovi i dobivanje uvida u rezultate koje je moguće očekivati.

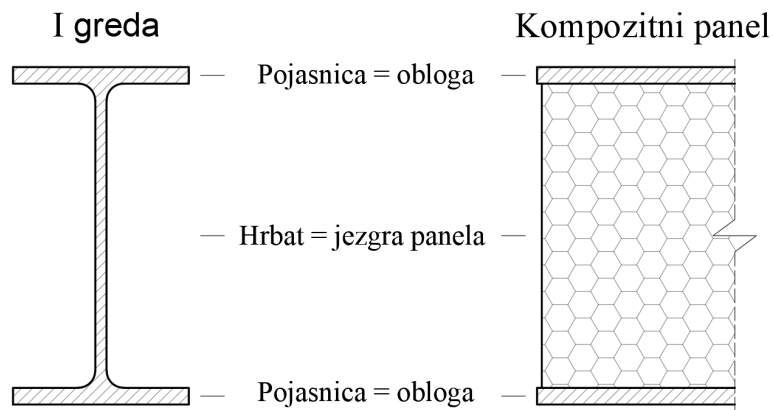
2. KOMPOZITNI PANELI

Kompozitni paneli, često nazivani sendvič panelima, strukture su koje se sastoje od tri glavna dijela kao što je prikazano na slici 1. Dvije tanke, krute i čvrste površinske stijenke (obloge) odvojene su debelom jezgrom manje čvrstoće i težine. Kako bi se omogućio prijenos opterećenja među komponentama, obloge se pričvršćuju ljepljivima za jezgru. Postoje i kompozitni paneli kod kojih se jezgra injektira u već odvojene obloge te se na taj način izostavlja uporaba ljepljiva.



Slika 1 Shematski prikaz kompozitnog panela (izradio autor)

Kompozitni paneli ponašaju se nalik I-gredi (Slika 2) čiji racionalni geometrijski oblik distribuira većinu materijala u pojasnice koje se najudaljenije od težišta i/ili neutralne osi. Ostatak materijala postavljen je u hrptu kako bi omogućilo pojasnicama da se odupru posmiku i izvijanju. U kompozitnim panelima, vanjske obloge nalikuju pojasnicama dok je jezgra panela nalik hrptu. Paneli se ipak naspram I-greda razlikuju u tome što je jezgra kompozitnog panela izvedena od različitog materijala u odnosu na obloge. Jezgra panela pruža kontinuirani oslonac stijenkama duž cijele širine panela dok je kod I-greda taj oslonac (hrbat) koncentriran. Vanjske obloge zajednički djeluju i suprotstavljaju se vanjskom momentu savijanja, dok se jezgra odupire poprečnim silama i stabilizira obloge u smislu izvijanja. Veza između obloga i jezgre mora biti dovoljno jaka kako bi se oduprla posmičnim i vlačnim naprezanjima između njih te su stoga ljepljiva koji povezuju lica i jezgru od ključne važnosti [1].



Slika 2 Prikaz usporedbe kompozitnog panela i I-grede (izradio autor)

2.1. Prednosti i nedostaci kompozitnih panela

Paneli su karakterizirani kao elementi velike čvrstoće, otpornosti na savijanje i krutosti, dok im je težina relativno mala, naročito u graditeljstvu kada je uspoređujemo s težinom opeke i betona [1]. Prednost male težine posebno se ističe prilikom montaže panela gdje je olakšano manevriranje panelima te nije potrebno montirati skele i/ili dizalice velike nosivosti. U pogledu analize opterećenja na konstrukciju, osim u smjeru gravitacije, smanjena težina posebno je značajna pri djelovanju potresa gdje se reducira horizontalna komponenta djelovanja na konstrukciju [2].

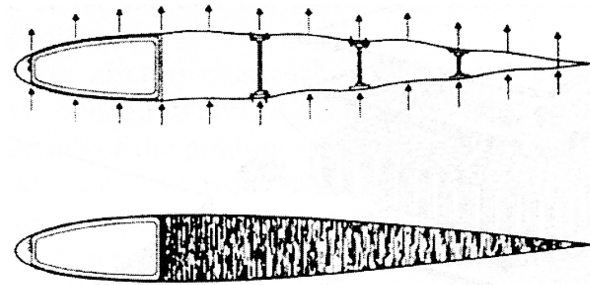
Gledajući na panele iz aspekta fizike zgrade, materijal jezgre pruža dobra akustična, termoizolacijska i paronepropusna svojstva te se time umanjuje potreba za izvedbom izolacijskih ovojnica.

Provedena su istraživanja gdje je analizirana otpornost panela na izvanredna opterećenja kao što su eksplozije, te se ustanovljeno da paneli imaju dobra apsorpcijska svojstva mehaničke energije. Uneseno opterećenje troše svojom plastičnom deformacijom te time čuvaju konstrukciju od otkazivanja nosivosti [3].

Paneli se ovisno o namjeni proizvode u raznim dimenzijama, no u pogledu graditeljstva, oni su najčešće velikih dimenzija što umanjuje potrebu za korištenjem spojnih sredstava. Time se pojednostavljuje montaža i smanjuje cijena građevine.

Specifična geometrija kompozitnih panela gdje je jezgra panela obložena oblogama, omogućuje dimenzioniranje pojedinog elementa panela. Time se postiže racionalnost i velika iskoristivost cjelokupnog panela što u konačnici rezultira ekonomičnosti proizvoda.

Kao što je već prethodno spomenuto, veza između obloga i jezgre predstavlja kontinuirani oslonac duž cijele širine panela. Takav oblik veze omogućuje da stijenka ostaje ravna pri površinskim tlačnim naprezanjima bez pojave izvijanja, što je posebno značajno u avio industriji gdje one moraju ostati nedeformirane radi aerodinamike. Na slici 3 prikazana je usporedba izvijanja stijenke krila aviona pri koncentriranom i kontinuiranom oslanjanju.



Slika 3 Presjek kroz krilo aviona s prikazom izvijanja obloge u slučaju korištenja I-profila te kompozitnog panela [4]

Imajući mnoge prednosti, kompozitni paneli imaju i određene nedostatke. Kao što je prethodno spomenuto, radi se o kompozitnim konstrukcijama koje se sastoje od različitih materijala. Takve konstrukcije su još uvijek u fazi istraživanja i usavršavanja te manjak informacija i znanja predstavljaju veliku prepreku u njihovom korištenju. Time se povlače i brojni problemi koji se javljaju s njihovom uporabom, kao npr. kontrola kvalitete proizvoda i nedovoljno informacija o pojedinim materijalima te potreba za ispitivanjem istih.

Prilikom proizvodnje, mogu se javiti problemi sa neravnom raspodjelom mase jezgre, pojavom rupa, tj. šupljina u samoj jezgri te delaminacijom između jezgre i obloge. Time se znatno smanjuje kvaliteta proizvoda, a otkrivanje defekata je složeno pa je stoga potrebno posvetiti posebnu pažnju prilikom proizvodnje panela.

Također, zbog nedovoljnog iskustva i kratkog uporabnog vijeka korištenja, upitna je trajnost i zamor materijala pri dužem vremenu cikličnog opterećenja [1].

Kako se radi o predgotovljenim proizvodima, mjesto za naknadne obrade proizvoda na gradilištu su svedene na minimum pa je zato potrebno više pažnje posvetiti prilikom projektiranja.

Prilikom pojave požara, materijali koji se koriste za jezgru panela, najčešće su lako zapaljivi te prilikom izgaranja mogu ispuštat otrovne tvari. Neovisno u tome dođe li do požara ili ne, materijali koji se koriste za jezgru sintetičke su naravi, te u nedovoljno ventiliranom prostoru mogu ugroziti zdravlje ljudi.

2.2. Primjena kompozitnih panela

Kompozitni paneli zastupljeni su u gotovo svim industrijskim sektorima, od zgrada i hala pa sve do primjene u zrakoplovstvu.

Brza montaža, ekonomičnost i zadovoljavajuća toplinska svojstva panela, često su razlog zašto se koriste kao fasadni i krovni elementi raznih građevinskih objekata. Proizvode se u različitim oblicima i sa specifikacijama koje zadovoljavaju određene zahtjeve. Na slici 4 prikazan je Centar za kuglanje Martigny u Švicarskoj, građevina čiji je fasadni i krovni sustav izveden od kompozitnih panela [5].



Slika 4 Centar za kuglanje Martigny [5]

Na slici 5 prikazana je mobilna kuća, čiji su zidovi napravljeni od panela. Popularne su i često se koriste u autokampovima radi brze montaže i očuvanja okoliša. Također, nezaobilazne privremene građevine svakog gradilišta postaju kontejnerske kuće čiji se zidovi i krovovi izvode od kompozitnih panela. Njihovo jednostavno i brzo postavljanje, te kasnije premještanje i ponovno korištenje, razlog su njihove popularizacije.

Kontejnerske kuće, čija je namjena kancelarija, spavaonica ili sanitarnih čvorova, prikazane su na slici 6.

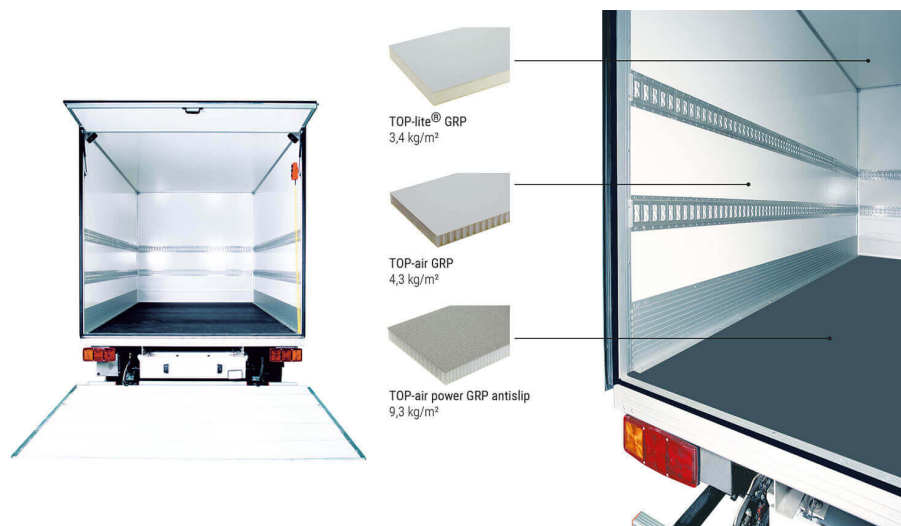


Slika 5 Mobilne kuće [6]



Slika 6 Kontejnerske kuće [7]

Kompozitni paneli često se koriste i u sektoru autoprijevoza kao sanduci hladnjača, interventnih vozila, kampera i kamiona. Zbog svoje male mase i velike krutosti, povoljni su iz razloga što smanjuju težinu vozila te omogućuju prijevoz većeg tereta. Također, posjeduju dobra termoizolacijska svojstva pa je upravo to razlog zašto ih razni proizvođači koriste. Često se unutar jednog vozila koriste paneli različitih karakteristika kako bi se postigla ekonomičnost, kao što je prikazano na slici 7.



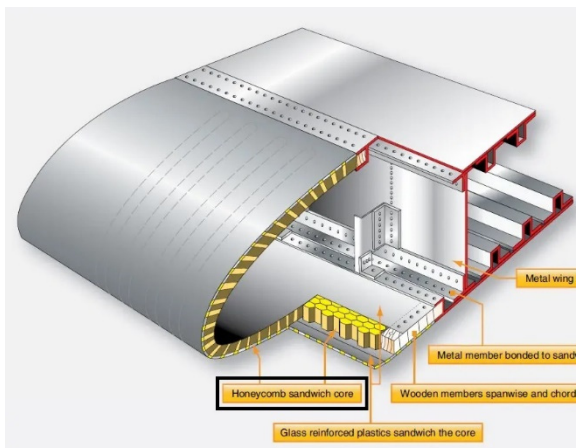
Slika 7 Kompozitni paneli u sastavu hladnjače [8]

Primjere uporabe kompozitnih panela susrećemo i u konstrukcijama vjetroelektrana, kao što je prikazano na slici 8.

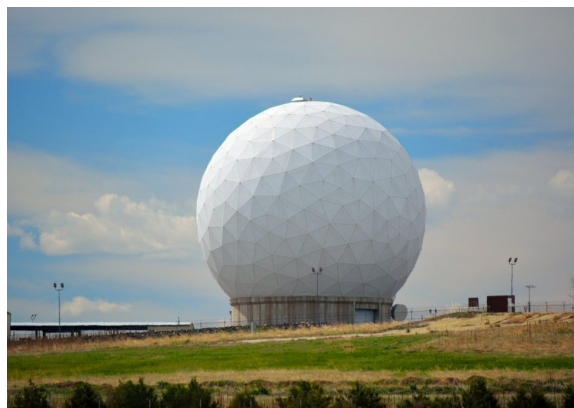


Slika 8 Kompozitni paneli u konstrukciji vjetroelektrane [9]

U avio industriji kompozitni paneli već se dugo koriste za potrebe izrade krila (Slika 9), i trupa aviona, kako u vojnoj, pa tako i civilnoj uporabi. Osim za izradu aviona, paneli se koriste i u konstrukcijama antena i radara (Slika 10).



Slika 9 Detalj konstrukcije krila aviona s prikazom korištenja kompozitnih panela [10]



Slika 10 Prikaz zaštite radara – Radome [11]

2.3. Sastav kompozitnog panela

Prethodno je spomenuto da su kompozitni paneli sastavljeni od 3 ili više elemenata: obloge, jezgre i adhezivne veze između obloge i jezgre. Obloga, koja je najčešće izvedena od različitog materijala naspram jezgre, može biti zalijepljena za svaku stranu jezgre istim ili različitim adhezivima, ovisno o zahtjevima panela i tehnologiji proizvodnje.

Broj materijala koji se danas koristi za izradu panela, odnosno njegovih komponenti, sve više raste, posebice nakon početka korištenja raznih kompozitnih materijala ojačanih vlaknima te pjena zatvorenih ćelija.

Jedan od većih zahtjeva prilikom dimenzioniranja kompozitnih panela je njegova debljina. Različiti materijali imaju različita svojstva, no ovisno o traženim zahtjevima koje paneli moraju ispuniti, potrebno je izvesti određene prilagodbe. Primjer za navedeno je manja krutost panela čija je jezgra izvedena od polimernih pjena, nego ona od metala. Povećanjem debljine jezgre panela od polimerne pjene, ona može udovoljiti traženom zahtjevu.

Najčešće se materijali za panele ne odabiru samo prema mehaničkim karakteristikama, već i prema trajnosti, otpornosti na habanje, završnom sloju obloge, tehnologiji izrade i cijeni.

2.3.1. Površinske obloge

Gotovo svi građevni materijali, koji se mogu proizvesti u tankim pločama, mogu se koristiti kao obloge sendvič panela [12].

Karakteristike materijala za izradu stijenki koje se promatraju, a pritom su poželjne jesu: velika krutost i otpornost na savijanje, velika vlačna i tlačna čvrstoća, otpornost na udarce, završna obrada, trajnost i otpornost na habanje [1].

Obloge je moguće podijeliti u dvije glavne kategorije: Obloge izvedene od metala i one koji to nisu.

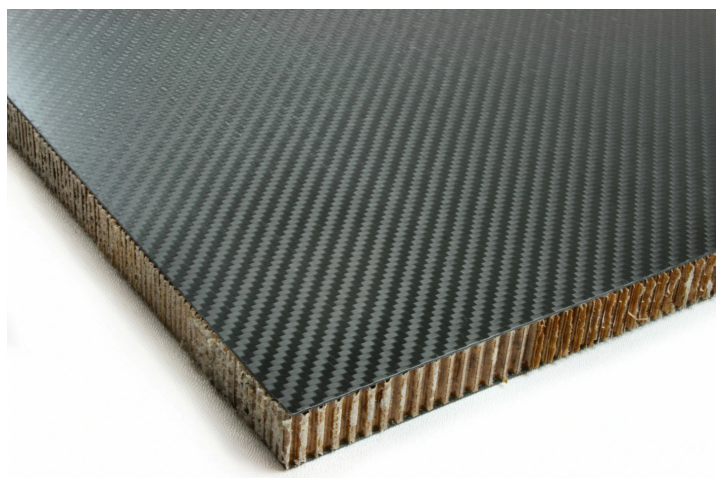
Metalne obloge izvode se od običnog i nehrđajućeg čelika te raznih vrsta legura aluminija i titanija. Odabir materijala ovisi o namjeni panela. Paneli koji sadrže metalne obloge u velikom broju susrećemo kao fasadne i krovne panele u graditeljstvu (Slika 11).

Prednosti metalnih obloga su velika krutost i čvrstoća, niska cijena, dobra završna obrada i otpornost na udarce. Velika gustoća i poteškoće prilikom proizvodnje, posebice prilikom izvedbe zakrivljenih dijelova, nedostaci su takvih obloga.



Slika 11 Fasadni panel sa oblogom od čeličnog pocinčanog lima [13]

Obloge koje nisu metalne, izvode se od šperploča, cementa, furnira, plastike i kompozita ojačanih vlaknima. Najzastupljenije su obloge od kompozita ojačane vlaknima, koje posjeduju čvrstoće sličnim, pa čak i veće, od metalnih. Prednost njihova korištenja je u proizvodnji i načinu ugradnje. Za njihovo ojačanje koriste se razna vlakna, no najznačajnija su staklena vlakna, koja su najčešće zastupljena, aramidna vlakna te ugljična (karbonska) vlakna (Slika 12) [1].



Slika 12 Kompozitni panel s oblogom od ugljičnih vlakana [14]

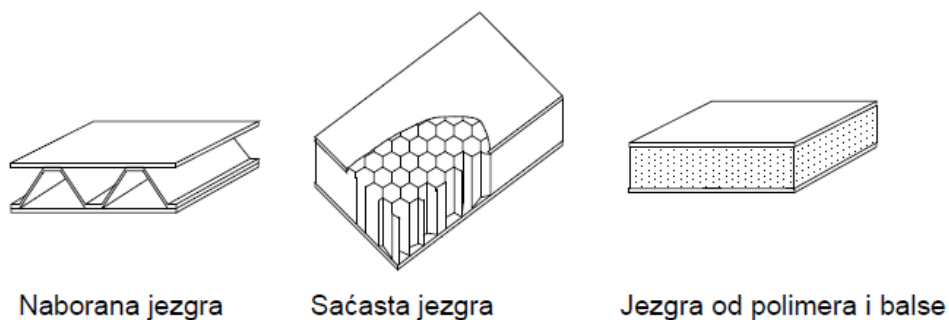
2.3.2. Jezgre panela

Jezgra je središnji, nosivi dio panela koji se nalazi između obloga. Svojom zastupljenošću u volumenu panela obuhvaćaju najveći udio, pa je iz tog razloga veoma važno obratiti pažnju na njezina svojstva i karakteristike.

Masa panela predstavlja bitan faktor, stoga je potrebno da je jezgra panela manje gustoće kako bi paneli bili racionalni. Također, potrebno je osigurati dovoljnu debljinu jezgre kako bi se ostvarila predviđena krutost panela. Jezgra je većinom opterećena poprečnim silama, te je radi toga modul posmika važan faktor u postizanju krutosti. Osim krutosti i mase, materijali u sastavu jezgre utječu na toplinska i akustična svojstva kompozitnog panela, svojstva koja su nezaobilazna u svakom projektu.

Svojstva koja se ispituju kod jezgre su sljedeća: gustoća, modul posmika, čvrstoća na posmična djelovanja, krutost jezgre okomito na obloge, toplinska i akustična svojstva.

Na slici 13 prikazana su 4 osnovna tipa jezgri: naborane i saćaste jezgre, jezgre od balse te jezgre izrađene od polimernih pjena.

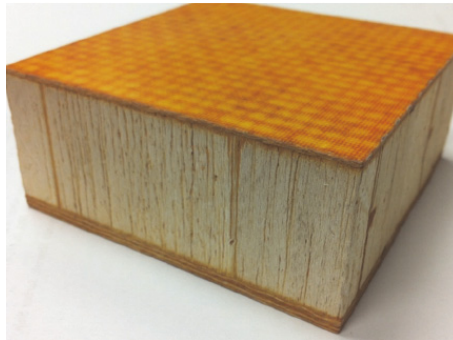


Slika 13 Osnovne grupe tipova jezgri [1]

Jezgre izvedene od balse (Slika 14) bile su prve koje su se koristile u nosivim kompozitni panelima. Balsa je vrlo meko drvo, slabo elastično, čija je gustoća limitirana i nalazi se u rasponu od 100 do 300 kg/m³ [1] [15].

Kako se radi o prirodnom materijalu, balsa je izotropan materijal s velikom nosivosti u smjeru rasta drveta, dok je ona u poprečnom smjeru znatno manja. S porastom vlažnosti dolazi do opadanja čvrstoća, pa je stoga potrebno osigurati da jezgra ne dođe u doticaj s vlagom.

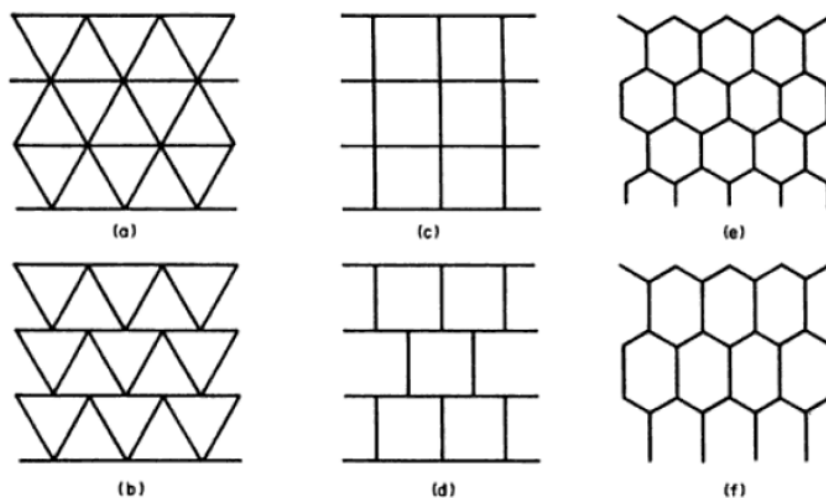
Nedostatak takvog materijala je da je nemoguće postići jednaku gustoću unutar cijelog presjeka jezgre, pa se zato ona ograničava na minimalnu. Unatoč tome što pruža minimalnu gustoću, jezgra od balse pruža dobre mehaničke karakteristike, pa čak i bolje od određenih polimernih pjena [1].



Slika 14 Kompozitni panel s jezgom od balse [16]

Saćaste jezgre imaju širok spektar primjene pa ih tako pronalazimo u rasponu od papirnatih i kartonskih saća, niske čvrstoće i krutosti koje se primjenjuju pri malom opterećenju, poput ispuna vrata, pa sve do saća velike čvrstoće i krutosti, iznimno lakih materijala za konstrukcije zrakoplova. Jezgre mogu biti proizvedene ravne i zakrivljene, bez uporabe pretjerane mehaničke energije i zagrijavanja [17].

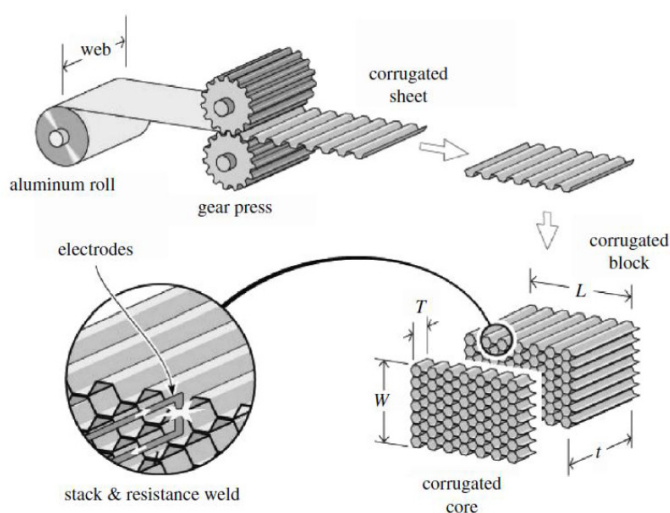
Geometrije saća proizvode se u raznim oblicima, kao što su to kvadratne, pravokutne, trokutne, valovite i šesterokutne. Prikazi navedenih oblika geometrija prikazani su na slici 15.



Slika 15 Prikaz vrsta geometrije saćastih jezgri: (a) trokutna, (b) valovita, (c) kvadratna, (d) pravokutna (e) i (f) šesterokutna [18]

Sačaste jezgre većinom se proizvode od aluminija te aramidnih i staklenih vlakana, a zbog načina proizvodnje imaju anizotropna svojstva. Postoji više načina proizvodnje sačastih jezgri, no dva su karakteristična.

Proizvodnja valovanjem (Corrugating process) (Slika 16) provodi se na način da se ravne metalne ploče prolaskom kroz prešu kontinuirano deformiraju u obliku valova, te se tako deformirane slažu jedna na drugu s određenim pomakom tvoreći ćelije među pločama. Kako bi se ploče međusobno povezale i stvorile kompaktnu strukturu, one se međusobno lijepe ili vare na dodirnim mjestima. Ovaj proces se najčešće upotrebljava kada je potrebno ostvariti veliku gustoću i čvrstoću sačaste jezgre [19].

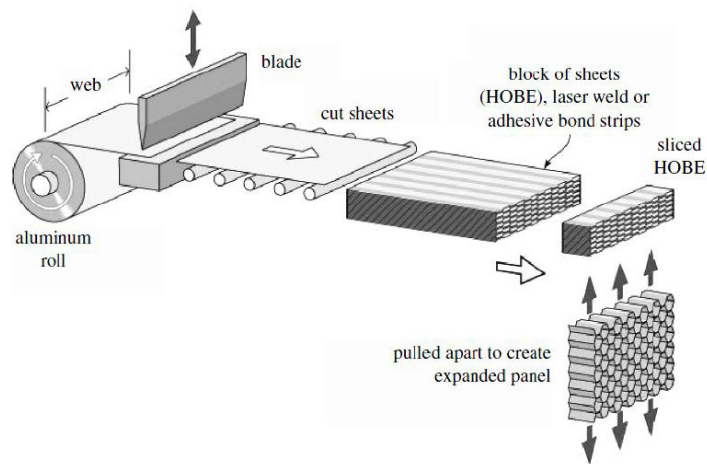


Slika 16 Prikaz proizvodnje valovanjem [20]

Proces proširenja (Expansion process) (Slika 17) izvodi se na način da se tanke ravne ploče postavljaju jedna na drugu te se između njih trakasto postavlja adheziv ili se laserski vare tvoreći kompaktni blok. Nakon ostvarivanja zahtijevane čvrstoće između ploča, blok se razvlači u smjeru slaganja ploča na način da se ploče deformiraju i stvore ćelije između nepovezanih dijelova ploče. Prilikom razvlačenja ploča od materijala koje nisu od metala, blokovi se griju te se naknadno impregniraju smolama kako bi materijal zadržao deformirani, sačasti oblik te postigao određenu krutost i vodootpornost. Metalne ploče nakon plastifikacije zadržavaju deformirani oblik te ih nije potrebno impregnirati [19].

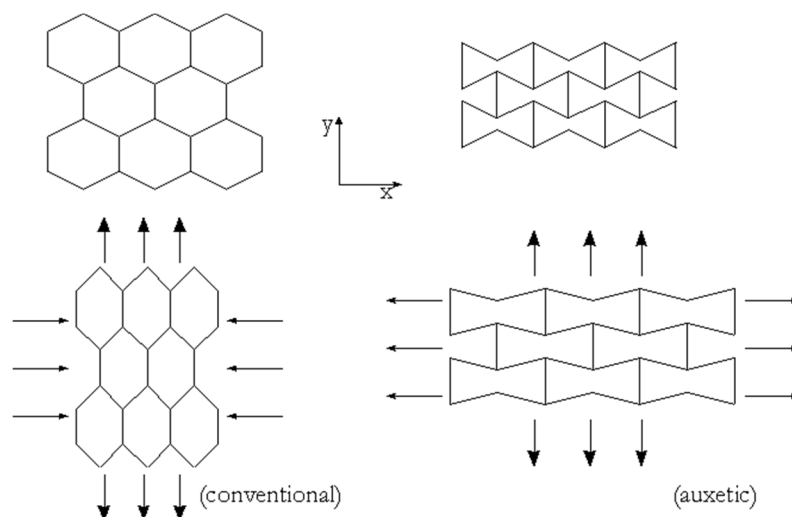
Ovaj se proces koristi i pri proizvodnji sačastih jezgri od papira. Proizvodi od papira su jeftini, no svejedno pružaju dobre mehaničke karakteristike.

Kako bi se poboljšala termička svojstva jezgre, određeni proizvođači pune ih sa raznim polimernim pjenama [1].



Slika 17 Prikaz proizvodnje proširenjem [20]

Saćaste jezgre imaju odlična mehanička svojstva, veoma visoku krutost okomito na obloge te najveći omjer čvrstoće i težine od svih materijala koje se koriste za izradu jezgri. Glavni nedostaci su visoka cijena i poteškoće prilikom proizvodnje kompozitnih panela. Također, postizanje određenih zakrivljenja jezgri može predstavljati probleme, posebice u avioindustriji, no tada se jezgre proizvode s posebnim geometrijskom oblikom saća koji ima negativan Poissonov omjer. Primjer takve geometrije prikazan je na slici (Slika 18) [1].



Slika 18 Prikaz uobičajenog materijala (conventional) i materijala s negativnim Poissonovim omjerom (auxetic) [21]

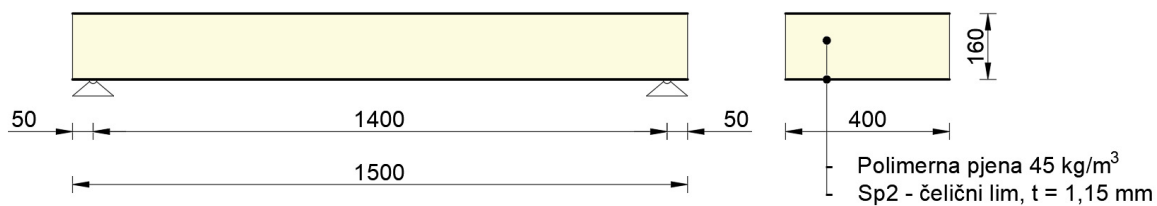
Razvoj polimernih pjena većih gustoća i kvaliteta, imao je veliki utjecaj na rast korištenja kompozitnih panela. Polimerne pjene u sastavu jezgri ne pružaju krutost te omjer čvrstoće i težine kao sačaste jezgre, no svejedno imao svoje prednosti. Općenito su pjene jeftinije od saća, ali važnije je to da su čvrste na makroskopskoj razini što znatno olakšava proizvodnju sendvič panela. Površina pjena lako je obradiva, a time je i olakšano povezivanje s vanjskim oblogama. Polimerne pjene imaju visoku toplinsku i akustičnu izolaciju te su često korištene u fasadnim sistemima kao nenosivi elementi. Postoje razne vrste polimernih pjena, a u nastavku navedene su neke od njih.

Pjene od poliuretana (PUR) jedne su od najviše korištenih tipova pjena. Njihovu primjenu pronalazimo u autoindustriji, elektronici, proizvodnji namještaja i odjeće te građevinskoj industriji [22]. Proizvode se mnogo tipova različitih svojstava, od mekih pjena s više ili manje otvorenih ćelija, do krutih pjena s pretežito zatvorenim ćelijama, gustoće od 30 do 500 kg/m³. Pjene mogu biti vatrootporne tako da se u njihov sastav dodaju aditivi koji sadrže fosfor. Radi velike molekularne mase PUR pjene imaju malu toplinsku vodljivost i malu difuzijsku konstantu pa su zato dobri izolatori. Mehaničke karakteristike PUR pjena manje su nego kod ostalih pjena, ali su zato najjeftinije. Koriste se primarno kao izolacijski materijali ili u manje opterećenim nosivim elementima [1].

Pjene od polistirena (PS) proizvode se ekstruzijom ili ekspanzijom u zatvorenim kalupima na način da se upuhuju u kalupe pri povišenoj temperaturi. PS pjene imaju zatvoreni tip ćelija i gustoću u rasponu od 15 do 300 kg/m³. Radi njihove osjetljivosti na otapala kao što su stiren i matrice na bazi estera, ne koriste se adhezivi, već epoksi ili poliuretan. PS pjene se koriste kao izolacijski materijali, no njihovu primjenu pronalazimo i u nosivim panelima za izradu kontejnera hladnjača [1].

3. ISPITIVANJE KOMPOZITNOG PANELA

U sklopu projekata Predgotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način i Istraživanje ponašanja komponenta kompozitnog panela s integriranom čeličnom jezgrom provedeno je istraživanje prionjivosti polimerne pjene i površinskih obloga kompozitnih panela. Prema planu i programu ispitivanja predviđeno je ispitivanje uzoraka oblika pravokutne prizme, poprečnog presjeka 160 x 400 mm i duljine 1500 mm. Uzorci su izvedeni od spregnutog panela s pocinčanim limom Sp2 i ispunom od polimerne pjene normirane gustoće 45 kg/m³ (Slika 19). Ispitivanje se provodi kontrolom sile s konstantnim prirastom pomaka klipa aktuatora te se pritom prate pomaci na uzorcima uz primjenu GOM sustava i 3D kamera za optička mjerenja. Kao rezultat ispitivanja potrebno je odrediti dijagrame odnosa sila [N] i pomaka [mm] na sredini uzorka, najveću silu i pomak pri slomu uzorka te oblike sloma uzoraka.



Slika 19 Dimenzije uzorka za ispitivanje prionjivosti savijanjem za uzorke polimerne pjene i čelika [23]

3.1. Norme za ispitivanje

Ispitivanje je provedeno prema američkim normama ASTM C393/C393M-11 i ASTM D7250/7250M-20 [24] [25]. Unatoč tome što se radi o američkim normama, jedinice koje se koriste u navedenim normativima odgovaraju SI sustavu mjernih jedinica. Navedene norme koriste se za određivanje posmičnih karakteristika jezgre ravnih kompozitnih panela koji su opterećeni savijanjem, na način da se aplicirano opterećenje nanosi okomito na stijenku panela. Prilikom apliciranja sile, bilježi se odnos sile i pomaka.

Testom savijanja moguće je odrediti krutost sendvič panela, posmičnu čvrstoću jezgre, modul posmika te tlačnu i vlačnu čvrstoću obloge. Test za određivanje posmične čvrstoće jezgre može se primijeniti i na određivanje čvrstoće veze jezgre i obloge.

Jedina normom prihvatljiva otkazivanja su posmično otkazivanje jezgre i otkazivanja spoja između jezgre i obloge. Otkazivanje obloge nakon čega slijedi otkazivanje jezgre i/ili veze jezgre sa oblogom, normom nije prihvatljivo. Određivanje čvrstoće obloge moguće je odrediti iz test metode D7249/7250M, no kako se radi o pocinčanim pločama čija je čvrstoća veća od čvrstoće jezgre, ovaj test je zanemaren.

3.2. Uzorci

Uzorci su nezaobilazne komponente svakog istraživanja, no upravo njihov broj utječe na preciznost rezultata.

Uvidom u prethodno spomenute norme, definirano je ispitivanje barem 5 uzoraka, osim ako se valjani rezultati mogu postići korištenjem manjeg broja uzoraka. Normom su definirane dvije konfiguracije ispitivanja uzoraka, a time i određene dimenzije koje uzorci moraju ispunjavati.

Standardna konfiguracija definira ispitni uzorak pravokutnog poprečnog presjeka, širine 75 mm i duljine 200 mm dok debljina uzorka odgovara debljini panela.

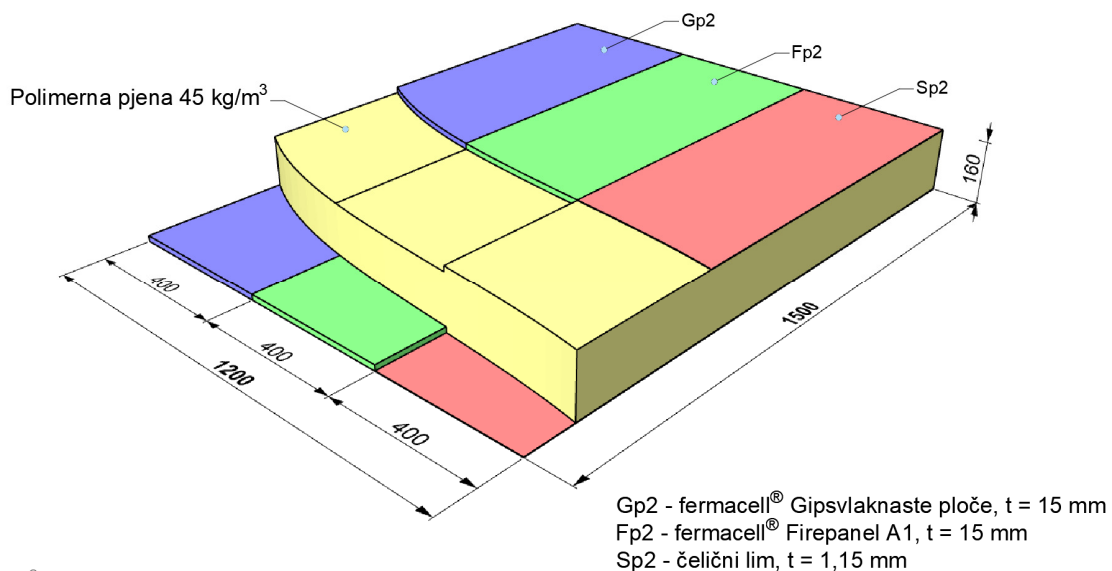
Ispitni uzorci pri ne standardnoj konfiguraciji trebaju biti širi od dvije debljine uzorka, a manji od šest debljina uzoraka. Također, širina mora biti veća od tri debljine jezgre i manja od polovice duljine uzorka. Duljina uzorka treba biti jednaka razmaku između oslonaca koji je uvećan za 50 mm ili polovicu debljine jezgre, te se pritom odabire veća vrijednost.

Ograničavanje maksimalne dimenzije širine uzorka koristi se zbog uporabe gredne teorije. Ako se koriste uzorci velike širine, potrebno je uzorke promatrati kao ljsuke.

Pri vađenju uzoraka iz blokova, potrebno je obratiti pažnju kako ne bi došlo do oštećivanja uzoraka, odnosno pojave zareza, podrezivanja, hrapavih ili neravnih površina reza te delaminacije. Također, potrebno je svaki uzorak jedinstveno označiti i povezati sa početnim blokom kako ne bi došlo do zabune prilikom obrade rezultata.

3.2.1. Izrada uzoraka

Ispitni uzorci vade se iz blokova oblika pločastog sendvič panela, dimenzija 1200 x 1500 mm i debljine 160 mm. Kompozitni panel/blok izveden je od dvije površinske obloge te jezgre od polimerne pjene gustoće 45 kg/m³. Površinsku oblogu tvore fermacell® Gipsvlaknaste i fermacell® Firepanel A1 ploče debljine t = 15 mm te ploče od čeličnog lima debljine t = 1,15 mm, složene jedna pored druge na međusobnom razmaku od 2 mm. Razlog ovakvog načina slaganja ploča je taj kako bi se omogućilo vađenje tri različite vrste uzoraka iz istog bloka. Na slici 20 shematski je prikazan ispitni blok s oznakama različitih ploča.



Slika 20 Prikaz ispitnog bloka s oznakama ploča u sastavu površinske obloge (izradio autor)

Ispitni blokovi proizvode se na način da se na oplatni stol postave ploče Gp2, Fp2 i Sp2 jedna do druge, tako formirajući donju oblogu budućeg bloka. Donja se obloga uokviruje rubnom oplatom. Kako bi se omogućilo postavljanje gornjeg sloja ploča, prije injektiranja jezgre, na donje se ploče postavljaju kartonski distanceri koji služe kao potpora gornjim pločama. Na gornje se ploče dodatno postavlja oplata koja se zajedno sa rubnom oplatom pričvršćuje za oplatni stol, tako tvoreći kalup spreman za injektiranje jezgre. Dodatno se postavljaju cjevčice, tj. plastične slamčice, koje omogućavaju izlazak zraka iz bloka prilikom ekspanzije pjene. Radi sprječavanja vertikalne deformacije bloka prilikom injektiranja pjene, oplatni stol se zajedno sa kalupom postavlja u prešu. Nakon kalibracije preše započinje proces injektiranja

polimerne pjene. Pjena se injektira do granice koja je predviđena da će tvoriti gustoću jezgre od 45 kg/m^3 . Blok se naknadno ostavlja pod prešom određeno vrijeme kako bi zadržao ravni oblik. Nakon stvrdnjavanja pjene, kalup se zajedno sa blokom vadi iz preše te se uklanja oplata. Prema nacrtnoj se dokumentaciji iz novonastalog bloka izrađuju ispitni uzorci.

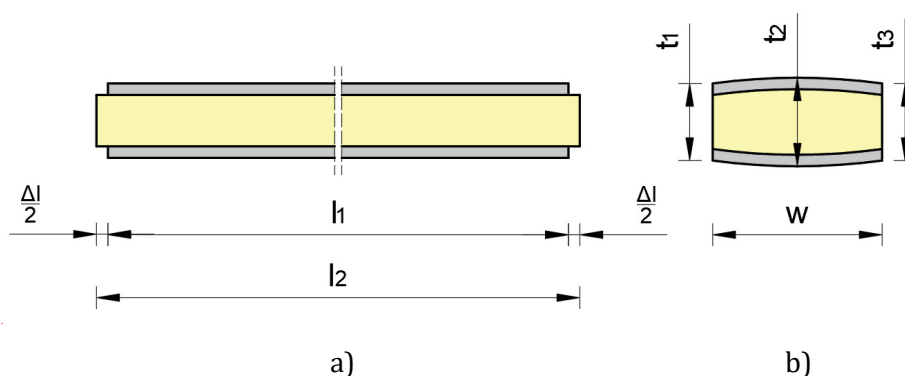
Kako se pjena injektira u blok samo s jedne strane, radi mogućnosti pojave neravnomjerno distribuirane gustoće u bloku, provedene su tri različite pozicije injektiranja pjene u panel. Prikaz shema uzoraka u ispitnim blokovima s označenim smjerovima punjenja pjene prikazani su u priložima 1 - 3.

Projektom je predviđena izrada pet jednakih ispitnih blokova te vađenje po tri ispitna uzorka, različitih stijenki iz pojedinog bloka.

U diplomskom radu provedena su preliminarna ispitivanja dvaju uzoraka te je detaljno definirana postava ispitnog uzorka. Opisani su koraci ispitivanja i svi uočeni nedostaci tijekom ispitivanja radi sprječavanja istih prilikom ispitivanja preostalih uzoraka.

3.2.2. Dimenzije uzoraka

Neposredno prije ispitivanja, napravljene su detaljne izmjere dimenzija uzoraka, koje su prikazane na slici 21, dok su izmjerene vrijednosti dane u Tablicama 1-2. Također, vizualnom analizom utvrđeno je da postoji razlika u debljinama uzoraka, tj. da su uzorci blago napuhnuti u sredini. Kako bi se odredila prosječna debljina jezgre uzorka, izvršene su izmjere debljine jezgre u tri točke, odnosno na krajevima (debljine t_1 i t_3) te u sredini uzorka (debljina t_2).



Slika 21 Prikaz izmjere uzorka a) uzdužni pogled; b) poprečni pogled (izradio autor)

Tablica 1 izmjerene dimenzije jezgre pojedinih uzoraka

Uzorak	Duljina			Širina	Debljina			Prosječna debljina	Volumen
	l_1 [mm]	l_2 [mm]	Δl [mm]	w [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	t [mm]	[mm ³]
Sp2-1	1495	1517	22	370	154	158	154	155	85676028
Sp2-2	1495	1520	25	370	152	156	153	154	84893972

U Tablici 2 prikazane se izmjerene dimenzije čeličnih ploča koje se koriste za formiranje obloge kompozitnih panela. Sve su obloge debljine 1,15 mm te je za prosječnu gustoću pocinčanog lima uzeta vrijednost od 8000 kg/m³.

Tablica 2 Izmjerene dimenzije obloge pojedinih uzoraka

Uzorak	Širina	Duljina	Volumen
	w [mm]	l_1 [mm]	[mm ³]
Sp2-1	365	1495	627526
Sp2-2	365	1495	627526

Mjerenjem mase uzorka, te oduzimanjem proračunate mase obloge određena je masa jezgre. Iz omjera mase jezgre te prethodno izračunatog volumena jezgre, proračunata je gustoća mase jezgre. Navedeni podaci prikazani su u Tablici 3.

Tablica 3 Proračunane gustoće jezgri uzoraka na temelju izmjerenih i proračunatih veličina

Uzorak	Masa uzorka	Masa obloge	Masa jezgre	Gustoća jezgre
	[kg]	2 x [kg]	[kg]	[kg/m ³]
Sp2-1	13,76	10,040	3,720	43,41
Sp2-2	13,80	10,040	3,760	44,29

Na temelju dobivenih rezultata, prosječna gustoća jezgre uzoraka iznosi 43,85 kg/m³.

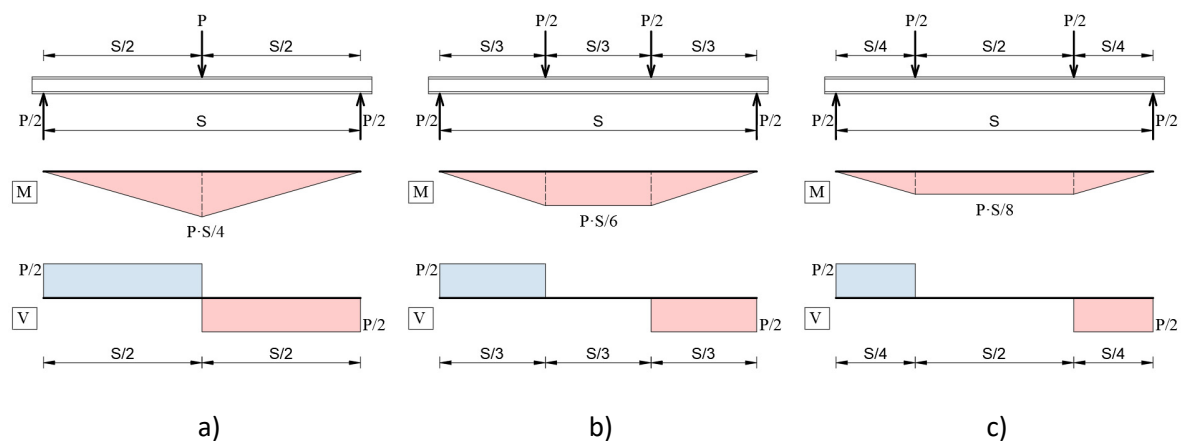
3.2.3. Način opterećivanja uzorka

Prethodno spomenute norme predviđaju dva načina opterećivanja uzorka: savijanje u tri točke (3-Point Bending) te savijanje u četiri točke (4-Point Bending). Uzorak se oslanja na osloncima koji predstavljaju dvije točke, dok se sila nanosi s gornje strane uzorka ovisno o načinu opterećivanja.

Standardna konfiguracija odnosi se na savijanje uzorka u tri točke gdje udaljenost između oslonaca iznosi 150 mm, dok se za sve ostale slučajeve koristi ne standardna konfiguracija. Kako se radi o uzorcima čija debljina iznosi 160 mm, primijenjena je ne standardna konfiguracija.

Cilj ovog ispitivanja je odrediti prionjivost između čeličnih stijenki i polimerne pjene, no kako se radi o istom ispitivanju kao i za određivanje posmične čvrstoće panela, potrebno je odrediti način opterećivanja uzorka pri kojemu će se pojaviti maksimalno posmično naprezanje i najmanji moment savijanja. Na slici 22 prikazana su i analizirana tri različita načina opterećivanja uzorka gdje je uzorak opterećen u tri i četiri točke. U slučaju opterećivanja uzorka u četiri točke, definirani su različiti razmaci između sila koje se nanose na uzorak, i to u iznosu od trećine i polovice udaljenosti između oslonaca. Također, za svaki su način opterećivanja prikazani dijagrami momenata savijanja i poprečnih sila.

Analiziranjem dijagrama, ustanovljeno je da je situacija c) mjerodavna, tj. kada su opterećenja postavljena na četvrtini raspona, ostvaruje se najveći omjer poprečne sile i momenata savijanja naspram ostalih varijanti.



Slika 22 Prikaz slučajeva opterećenja uzorka, a) 3PB - opterećenje na sredini raspona, b) 4PB - opterećenja na trećinama raspona, c) 4PB - opterećenja na četvrtini raspona (izradio autor)

Prilikom određivanja udaljenosti između oslonaca, vođena je briga o mogućnosti otkazivanja čvrstoće u oblogama. Kako se radi o tankim i vitkim stijenkama, norma definira uvjet za razmak među osloncima S koji je dan izrazom 1:

$$S \leq \frac{2k\sigma t}{F_s} + L \quad (1)$$

gdje su $k = 0,75$ faktor čvrstoće stijenke kojim se osigurava otkazivanje jezgre, $\sigma = 300$ MPa očekivana čvrstoća stijenke, $F_s = 0,24$ MPa procijenjena čvrstoća jezgre te $L = 700$ mm udaljenost između mjesta nanošenja sila.

Navedeni izraz vrijedi za uzorke koji imaju stijenke jednake debljine i izvedene od istog materijala te je omjer između debljina stijenke i jezgre manji ili jednak 0,1.

Rješavanjem nejednadžbe utvrđeno je da raspon između oslonaca mora biti manji ili jednak $S \leq 2,86$ m te je za ispitivanja odabran razmak $S = 1400$ mm.

3.3. Postava ispitivanja

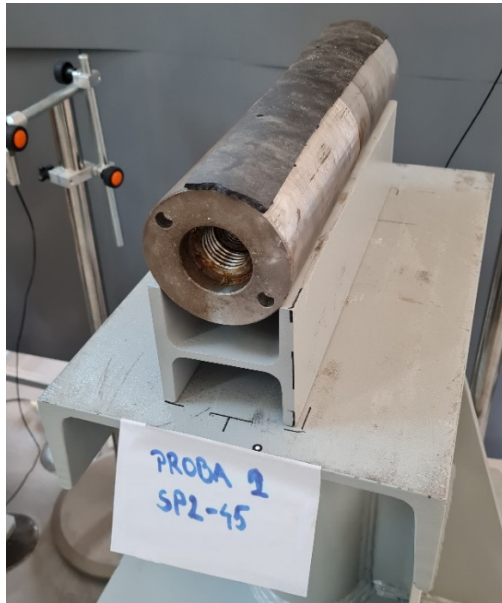
3.3.1. Postavljanje oslonaca

Prilikom oslanjanja i opterećivanja uzorka, potrebno je osigurati određene uvjete na osloncima i mjestima opterećenja. Zahtjeva se da je omogućena slobodna rotacija uzorka na tim mjestima kako ne bi došlo do pojave dodatnih neželjenih naprezanja. U konstruktivnom smislu, oslonci trebaju biti dovoljno kruti kako ne bi došlo do njihova izvijanja i/ili progibanja, odnosno formiranja praznina na kontaktu s uzorkom. Također, potrebno je da se uzorak oslanja cijelom svojom širinom duž oslonca.

Za potrebe ispitivanja, oslonci su izvedeni na način da su čelični cilindri postavljeni na obrnuti HEA 100 profil te pritom nivelirani pri jednakim visinama. Oslonci su međusobno udaljeni 1400 mm te se nalaze na jednakoj udaljenosti od centra opterećivanja, tj. klipa aktuatora.

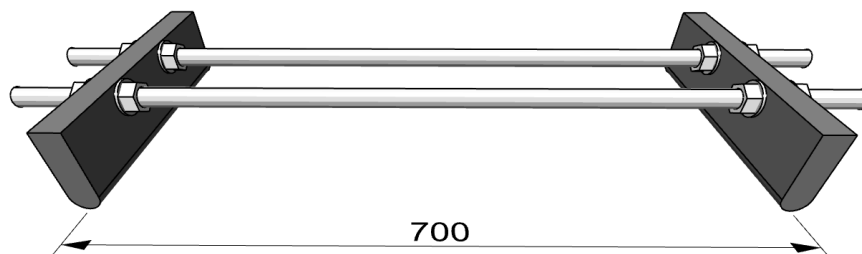
Prilikom opterećivanja uzorka, moguća je pojava utiskivanja ležaja u uzorak te je radi toga postavljen gumeni jastučić koji bi spriječio navedeno i omogućio bolju distribuciju naprezanja. Jastučić je postavljen između oslonca i uzorka te je izveden od gume debljine 6 mm i približne je širine 50 mm duž cijele osi oslonca.

Prikaz izvedenog oslonca i jastučića koji se postavlja između uzorka i oslonca, prikazan je na slici 23.



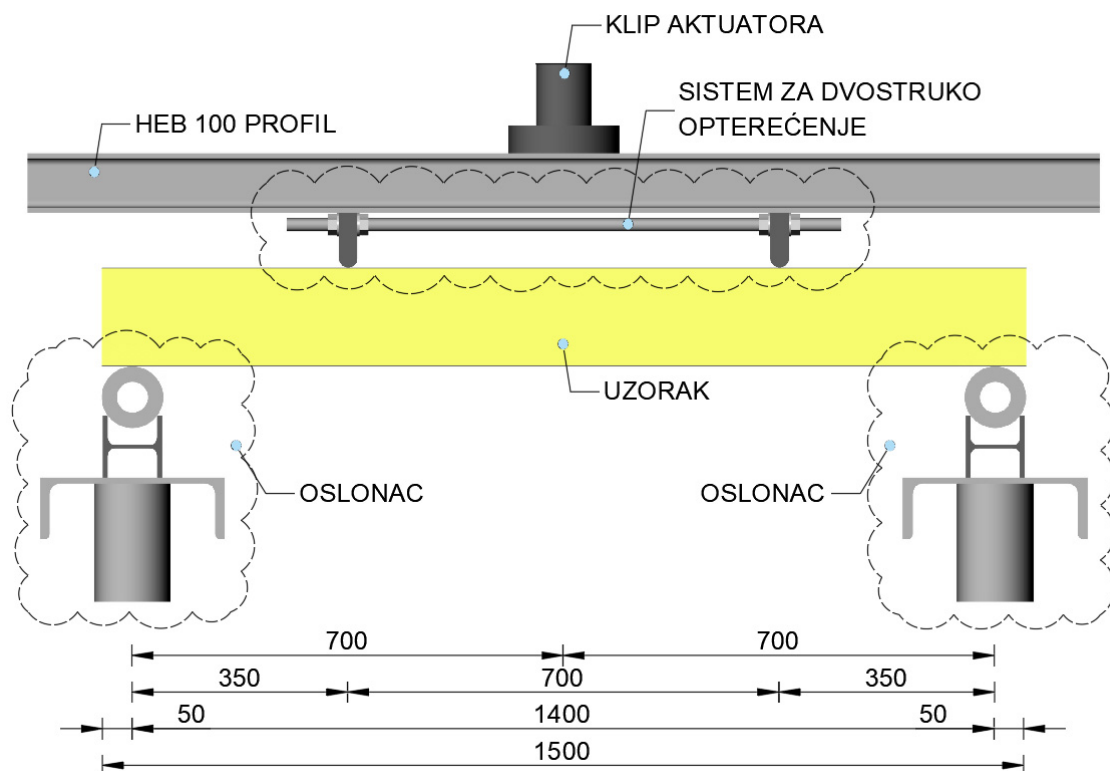
Slika 23 Prikaz izvedbe oslonca (fotografirao autor)

Za ispitivanje uzorka savijanjem u četiri točke, potrebno je istovremeno unijeti jednak iznos sile na dva mjesta na ispitnom uzorku, te je radi toga konstruiran sistem koji to omogućava. Sistem za dvostruko opterećenje (Slika 24) izveden je na način da su dvije ležajne ploče, debljine 30 mm i duljine 310 mm, međusobno povezane dvjema navojnim šipkama, promjera 18 mm, te maticama pritegnute i pozicionirane na predviđenu poziciju. Razmak između ploča iznosi 700 mm. Ploče su na kontaktu s uzorkom zaobljene, no kako bi se spriječilo utiskivanje, između ploča i uzorka postavljena je traka tvrde spužve debljine 22 mm i širine 30 mm.



Slika 24 Prikaz sistema za dvostruko opterećenje (izradio autor)

Prijenos opterećenja s aktuatora i jednaka distribucija opterećenja na sistem za dvostruko opterećenje, postignuti su na način da se između klipa aktuatora i sistema postavlja čelični HEB-100 profil duljine 1740 mm koji se centrira s obzirom na os aktuatora. Na slici 25 prikazana je postava za izvođenje ispitivanja savijanjem u četiri točke s naznačenim udaljenostima od osi aktuatora.



Slika 25 Postava za izvođenje ispitivanja savijanjem u 4 točke (izradio autor)

Postavljanjem sistema za dvostruko opterećenje i HEB-100 profila na uzorak, uneseno je dodatno opterećenje na uzorak koje je potrebno uzeti u obzir prilikom obrade podataka. Mase sistema i HEB profila izmjerene su na vagi s dvostrukim mjernim područjem KERN DE150420DXL, DE-A10 [26]. Masa sistema za dvostruko opterećenje iznosi 17,10 kg, dok masa čeličnog HEB-100 profila iznosi 35,16 kg.

3.3.2. Postavljanje mjerne opreme

Tijekom ispitivanja praćeni su pomaci uzorka te su za navedeno korišteni LVDT uređaji i GOM sustav s kamerama za 3D mjerenja.

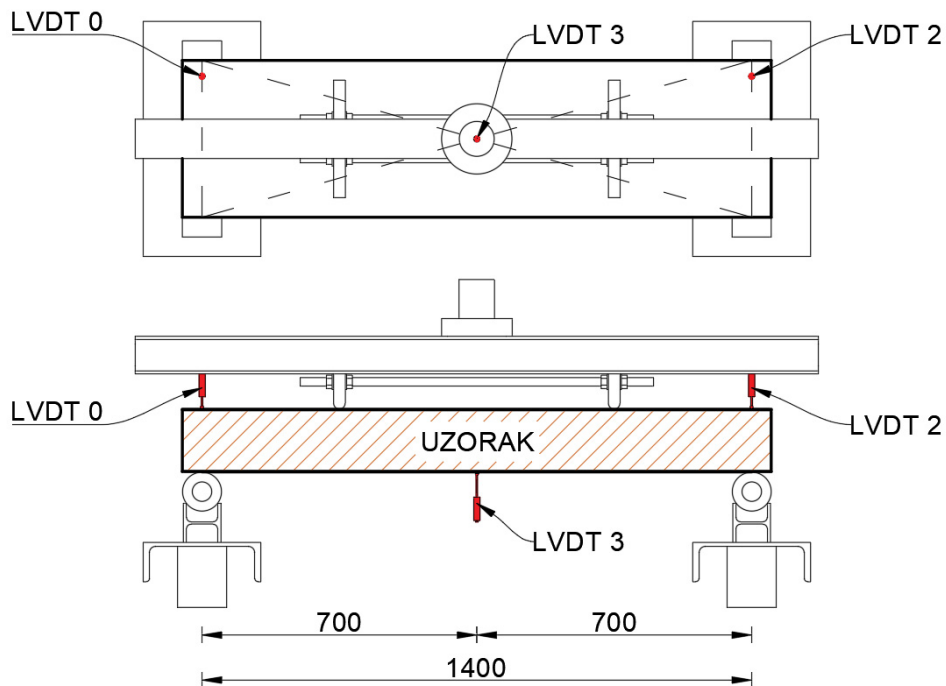
Pozicije LVDT uređaja prikazane su na slikama 26 i 27 gdje LVDT-0 i LVDT-2 prate pomake na gornjoj oblozi uzorka, dok LVDT-3 prati pomak na donjoj oblozi uzorka.

Korištenjem HEB-100 profila, koji služi za preraspodjelu opterećenja, ograničio se radni prostor za postavljanje gornjih mjernih uređaja, pa su radi toga uređaji LVDT-0 i LVDT-2 približeni vanjskom rubu uzorka. Oba LVDT uređaja, postavljena su na osi oslonaca kako bi pratila moguće promjene uslijed rotacije na osloncima. LVDT-3 postavljen je na sredini uzorka s donje strane, te se nalazi na polovici širine uzorka. Kako se na donjoj strani uzorka očekuje veći pomak, nego na gornjoj, korišten je LVDT uređaj s većim nominalnim hodom.

Pri ispitivanju korišteni su sljedeći uređaji:

LVDT-0 i LVDT-2 AC LVDT s nominalnim hodom ± 25 mm OMEGA LD320-25 [26]

LVDT-3 AC LVDT s nominalnim hodom ± 50 mm OMEGA LD320-50 [26]



Slika 26 Prikaz pozicija LVDT uređaja (izradio autor)



a)

b)

Slika 27 Prikaz pozicija LVDT uređaja a) LVDT-2 b) LVDT-3 (fotografirao autor)

3.3.3. Postavljanje kamera za optička mjerenja

Optička mjerenja spadaju u beskontaktno načine mjerenja gdje naspram kontaktnih (npr. LVDT), mjerni uređaj nije u direktnom kontaktu sa uzorkom. Sustav za optička mjerenja sastoji se od dva seta kamera koje se postavljaju ispred uzorka, te radne stanice na koju se one priključuju i šalju podatke.

Mjerenje se odvija na način da se uzorak tokom cijelog ispitivanja snima kamerama, te se naknadno uspoređuju pomaci određenih točaka koje sustav prepoznaje. Koncept analiziranja i uspoređivanja dviju slika, odnosno prepoznatih točaka na slikama prije i poslije pomaka, naziva se korelacija digitalne slike (Digital Image Correlation - DIC). Deformacije i naprezanja određuju se korelacijom položaja skupova ili blokova piksela u izvornoj i deformiranoj slici, obično na temelju kontrasta, tj. razini intenziteta sive boje [27]. Ovakvim načinom mjerenja, analizirani su pomaci i polja deformacija uzorka na cijeloj prednjoj strani uzorka te u karakterističnim točkama kao što su to oslonci i mjesta nanošenja opterećenja. Prilikom izvođenja mjerenja korištena su dva načina markiranja uzorka, površinsko markiranje i točkasto markiranje.

Površinsko markiranje svodi se na to da se promatrana površina uzorka označi nepravilnim točkicama (Speckle patterns), najčešće sprejom kontrastne boje kao što su to crna, bijela i siva. Kako bi se postigao bolji kontrast, promatrana je površina prije markiranja ofarbana u bijelu boju te su naknadno sprejom nanosene crne točkice (Slika 28).

Točkasto markiranje je pojedinačno lijepljenje crnih točkastih markera sa pravilnim bijelim krugom u sredini na uzorak. Zbog tankih stijenki uzorka, nije moguće zalijepiti markere direktno na stijenku uzorka, pa su zato korišteni aluminijski L profili koji su jednom stranicom zalijepljeni za uzorak a na drugu su zalijepljeni markeri (Slika 29).

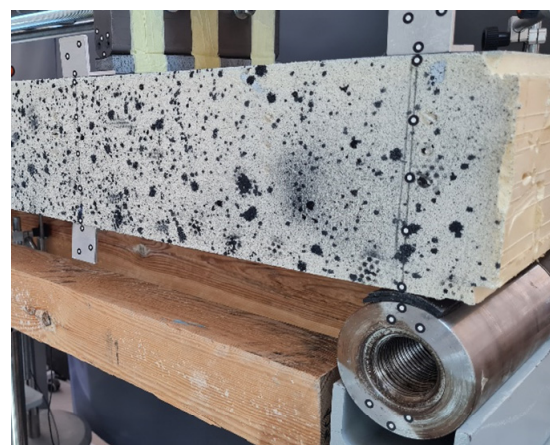
Dok kod površinskog markiranja software kontrastnu površinu dijeli u niz faceta, reprezentativnu točku pravokutnika određene dimenzije, točkasto mjerenje prati samo točku markera koja je zalijepljena na uzorak. Time se postiže veća brzina i točnost mjerenja bez pretjerane pojave šuma. Kao nedostatak točkastog markiranja valja napomenuti da software ima informaciju o pomaku samo u točkama (zalijepljenim markerima) te se time ne dobiva uvid u pomake cijele površine kao što je slučaj kod površinskog markiranja. Upravo je to razlog zašto se kombiniraju te dviju metode mjerenja.

Snimanje uzorka provedeno je GOM Correlate Pro sustavom s Aramis 12M kamerama za 3D mjerenja u rezoluciji 4096x3068 piksela i brzini snimanja pri 1,5 sličice u sekundi (fps). Mjerni volumen kojeg kamere snimaju dimenzija je 1745 x 1415 mm² [26].

Istovremeno je uzorak pri ispitivanju praćen High-speed Imagetec fps1000 Platinum kamerom koja omogućuje snimanje velikog broja sličica u sekundi. Time je omogućen bolji uvid u praćenje nastanka sloma uzorka. Snimanja su provedena u rezoluciji 1280x660 piksela pri brzini od 550 fps-a [26].



Slika 28 Prikaz markiranja uzorka
(fotografirao autor)



Slika 29 Prikaz markiranih oslonaca i točaka
na stijenkama (fotografirao autor)

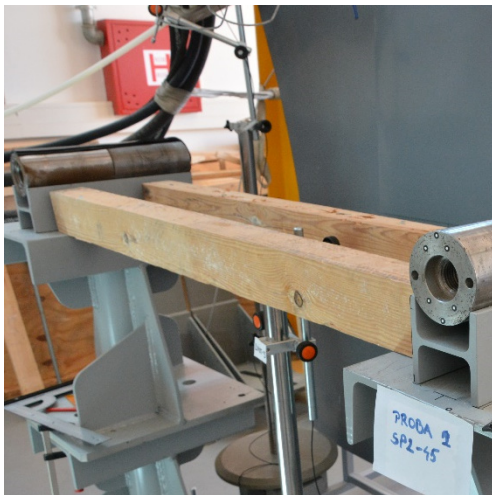
3.3.4. Osiguranje mjerne opreme i ispitnog alata

Usljed sloma uzorka, dolazi do velikih i nekontroliranih pomaka koji mogu oštetiti mjernu opremu, te je radi toga potrebno predvidjeti određene mjere zaštite.

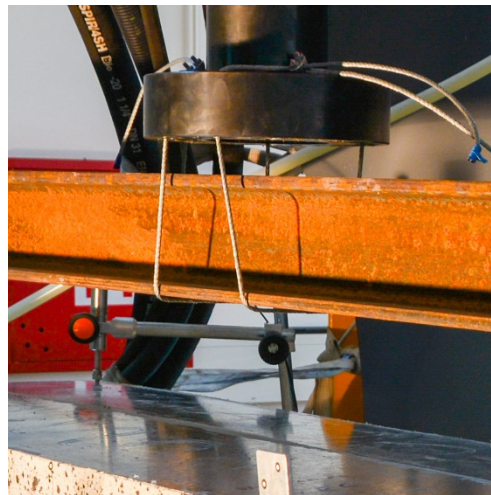
Iz prethodnih iskustava, predviđeno je da uzorak puca i zajedno sa masom sistema za dvostruko opterećenje i HEB-100 profilom pada na LVDT, koji se nalazi s donje strane uzorka, te tako ruši i oštećuje mjernu opremu.

Radi sprječavanja nekontroliranog padanja uzorka na LVDT uređaj, postavljene su dvije drvene gredice ispod uzorka (Slika 30) koje osiguravaju da se uzorak nakon loma nasloni na njih i preuzmu njegovo opterećenje. Gredice su odmaknute jedna od druge, tako da je između njih moguće postaviti sondu od LVDT uređaja. Također, uslijed sloma postoji mogućnost od izvrtanja i/ili klizanja HEB-100 profila te pada profila na kamere koje služe za optička mjerenja. Pridržavanjem profila sa čeličnom sajlom za klip aktuatora (Slika 31), onemogućilo se njegovo neželjeno ponašanje.

Važno je napomenuti kako primijenjene mjere ne utječu na sam uzorak u vrijeme ispitivanja, niti na rezultate ispitivanja.



Slika 30 Prikaz drvenih gredica radi sprječavanja oštećenja LVDT uređaja (fotografirao autor)



Slika 31 Prikaz pridržanja HEB-100 profila radi sprječavanja oštećenja optičkih kamera (fotografirao autor)

3.4. Provođenje ispitivanja

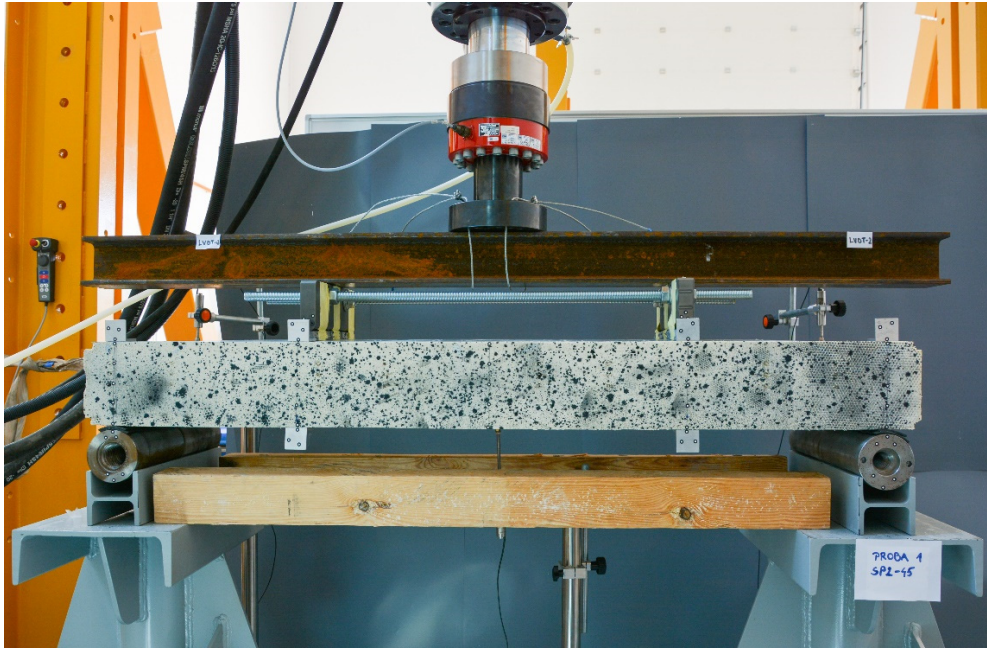
Ispitivanja su provedena dana 14. i 15. lipnja 2021. godine na Građevinskom fakultetu u Rijeci u Laboratoriju za konstrukcije. Za ispitivanje uzoraka koristi se aktuator Zwick Roell kapaciteta 250 kN koji je postavljen na čeličnom ispitnom okviru [26]. Aktuator se koristi za precizna statička i dinamička ispitivanja s mogućnošću kontrole ispitivanja preko pomaka ili sile te je prikazan na slici 32.



Slika 32 Prikaz akтуatora kapaciteta 500 kN (lijevo) i 250 kN (desno) [26]

Prije početka ispitivanja, softverom Cubus podešen je pomak koji akтуator treba ostvariti u određenom vremenu. Normom je predviđen slom uzorka u vremenu od 3 do 6 minuta, no kako se radi o preliminarnim ispitivanjima u kojima se ne zna točna čvrstoća uzorka, te se javljaju značajni pomaci uslijed deformiranja gumenih jastučića i spužve između sistema za dvostruko opterećenje i uzorka, vrijeme testiranja je postavljeno na 10 minuta. Pomak koji je potrebno ostvariti u navedenom vremenu iznosi 60 mm, što je u skladu s normom koja navodi da preporučeni pomak akтуatora iznosi 6 mm/min. Također, kalibrirani su svi uređaji, te su zabilježene vrijednosti u nultom položaju, odnosno u položaju kada uzorak nije opterećen.

Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti zraka $(50 \pm 5)\%$, tj. pri uvjetima u kojima su uzorci skladišteni. Prilikom opterećivanja uzorka, u realnom vremenu bilježeni su pomaci na akтуatoru te sile koje se ostvaruju prilikom pomicanja klipa. Bilježeni su i pomaci na LVDT uređajima, koji su postavljeni prema prethodno opisanom, te su optički praćene deformacije uzorka i postavljenih markera. Na slici 33 prikazan je uzorak neposredno prije početka ispitivanja.



Slika 33 Ispitivanje uzorka SP2-45 (fotografirao autor)

3.5. Rezultati ispitivanja i obrada podataka

Usljed postavljanja sistema za dvostruko opterećenje i HEB-100 profila, uzorak je dodatno opterećen silom 0,513 kN te su radi toga promatrane dvije faze.

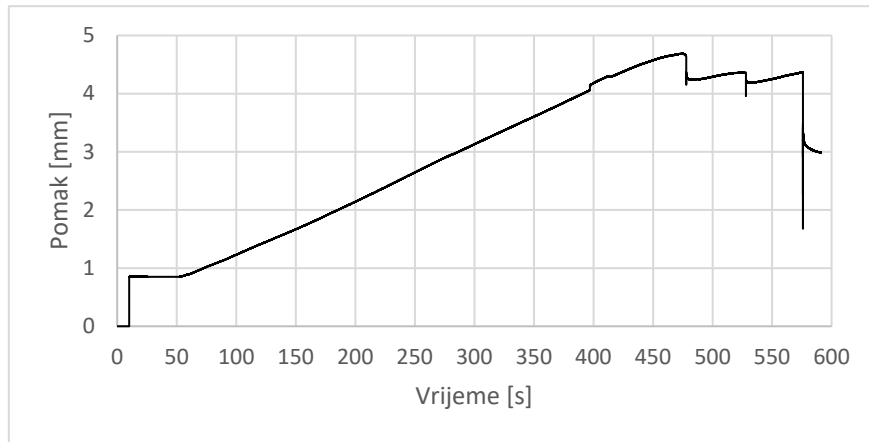
U početnoj fazi, kada je uzorak neopterećen sistemom i profilom, izmjeren je nulti pomak na svim LVDT uređajima u trajanju od 10 sekundi. Mjerodavna vrijednost nultog položaja pojedinog LVDT uređaja jednaka je aritmetičkoj sredini izmjerenih rezultata u navedenom trajanju. Nakon postavljanja sistema i profila, započinje druga faza te se postepeno unosi sila s aktuatora i pritom se nastavljaju bilježiti pomaci.

U dalje prikazanim dijagramima (1, 2 i 3), uočljiv je dio od početnih 10 sekundi koji predstavlja neopterećeni uzorak. Radi lakšeg očitavanja i analiziranja podataka, prikazani pomaci kalibrirani su na način da počinju iz nultog položaja, odnosno od 0 mm.

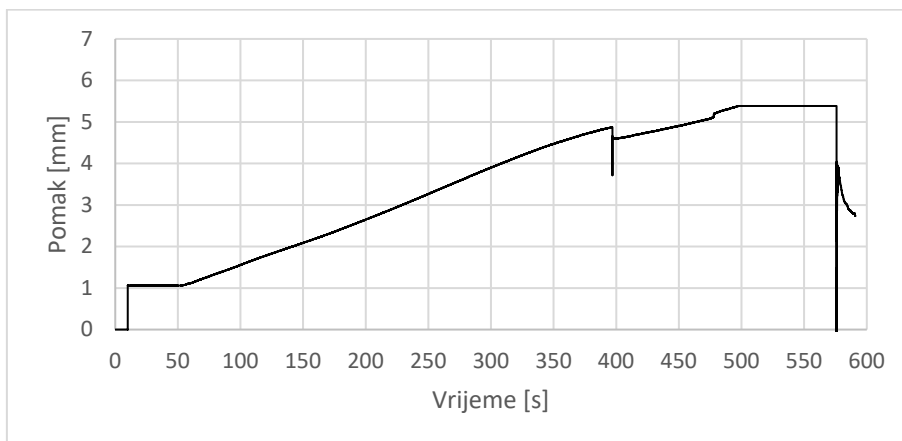
Ispitivanja utvrđivanja svojstva prionjivosti između čelika i polimerne pjene provedbom testa savijanja provedena su na dva uzorka čiji su rezultati prikazani u slijedećim pod poglavljima.

3.5.1. Ispitivanje PROBA 1 / SP2 - 45

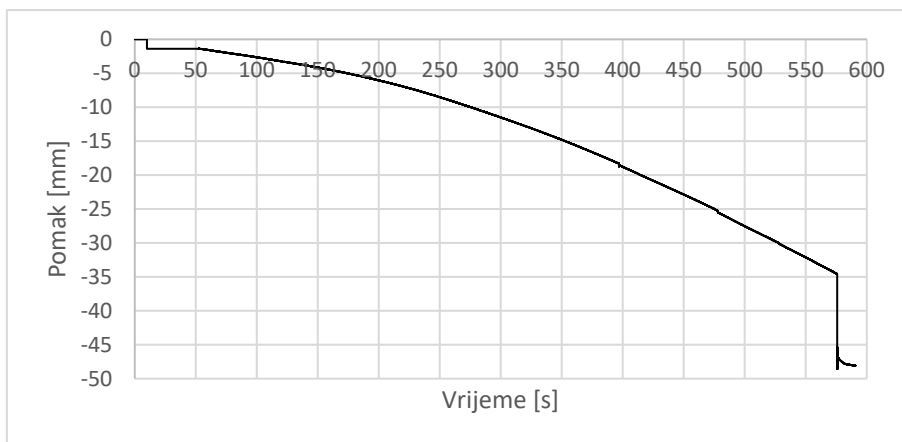
Na dijagramima 1, 2 i 3 prikazani su izmjereni pomaci na LVDT uređajima u vremenu.



Dijagram 1 – Izmjereni pomaci u vremenu - LVDT-0

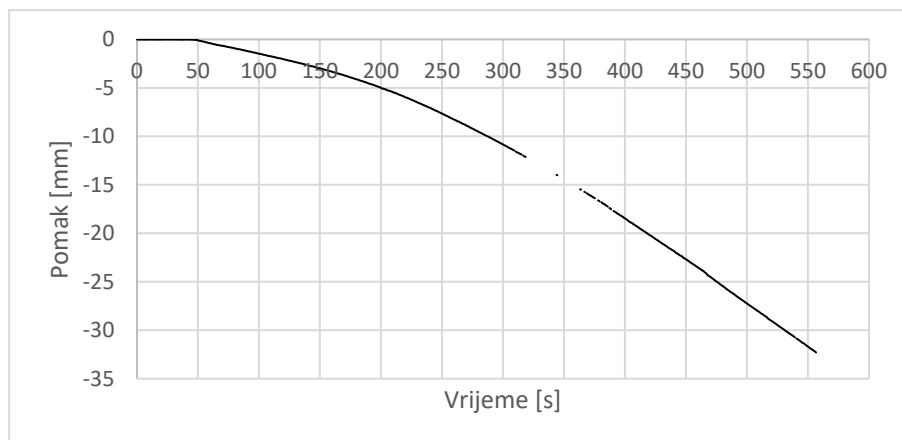


Dijagram 2 – Izmjereni pomaci u vremenu - LVDT-2



Dijagram 3 – Izmjereni (apsolutni) pomaci u vremenu - LVDT-3

Dijagram 4 prikazuje pomak uzorka na sredini raspona koji je zabilježen optičkim kamerama u vremenu.



Dijagram 4 – Izmjereni (apsolutni) pomaci na sredini uzorka u vremenu - GOM

Iz dijagrama je moguće uočiti kako nije zabilježena početna faza, tj. faza kada uzorak nije dodatno opterećen sistemom za dvostruko opterećenje i HEB-100 profilom, već samo faza kada se uzorak opterećuje silom iz aktuatora. To se očituje u nepostojanju skoka u početnom dijelu dijagrama. Pojava šuma u vremenu od 320 do 365 sekundi uzrokuje gubitak podataka prilikom mjerenja pa je iz tog razloga dijagram isprekidan. Usporedimo li oblike dijagrama 3 i 4, vidimo da se oni u drugoj fazi približno podudaraju. Maksimalne vrijednosti pomaka u trenutku sloma koje su zabilježene LVDT – 3 uređajem i optičkim kamerama, a da pritom nije dodan pomak uzrokovan dodatnim opterećenjem iz prve faze, prikazane su u Tablici 4.

Tablica 4 Usporedba maksimalnih pomaka zabilježenih različitim mjernim metodama

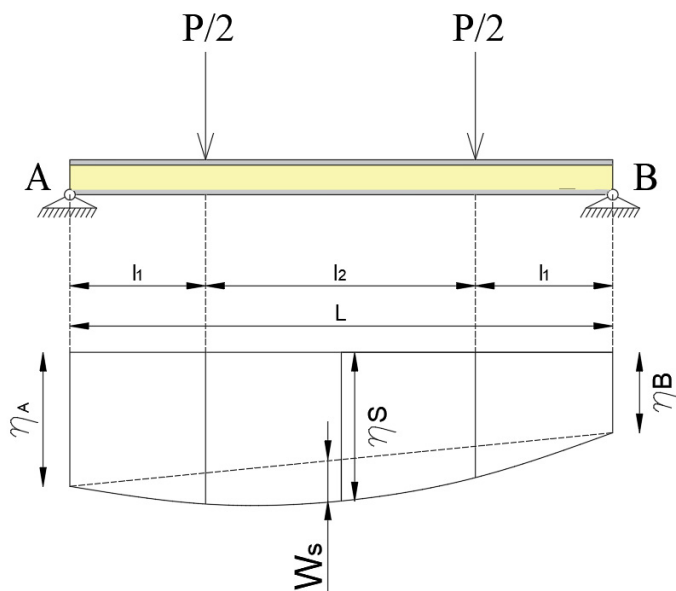
Mjerni uređaj	Maksimalni izmjereni pomak na sredini raspona [mm]
LVDT – 3	-33,1169
GOM Correlate i Aramis	-32,2871

Usporedbom rezultata, vidljivo je da je za 0.8298 mm (2.57 %) zabilježen veći progib mjeren LVDT mjernim uređajem nego optičkim kamerama.

Razlika je zanemariva jer je sustav LVDT uređaja osjetljiviji, tj. razlike pomaka mjere se u desetini sekunde, dok je razlika kod optičkog mjerenja vremenski veća zbog tehničke ograničenosti optičkih kamera.

Kako su LVDT uređaji i aktuator povezani istim sustavom za upravljanje, podaci o pomacima i silama, software prikazuje u istom vremenu s jednakom osjetljivošću podataka. Time se izostavlja potreba za kalibracijom podataka između dvaju mjernih sustava, kao što je to primjer kod povezivanja podataka dobivenim GOM sustavom i podacima o sili s aktuatora. Iz tog razloga u danjem su radu analizirani dijagrami dobiveni samo LVDT mjernim uređajima, dok su podaci dobiveni GOM sustavom optičkih kamera korišteni za kontrolu podataka. U prilogima 4-6 dan je izvještaj programa GOM Correlate Professional gdje su prikazani pomaci na osloncima, sredini uzorka te u točkama gdje se nanosi sila na uzorak. U istim prilogima vidljivo je i polje pomaka uzorka u smjeru opterećivanja uzorka (Y smjer).

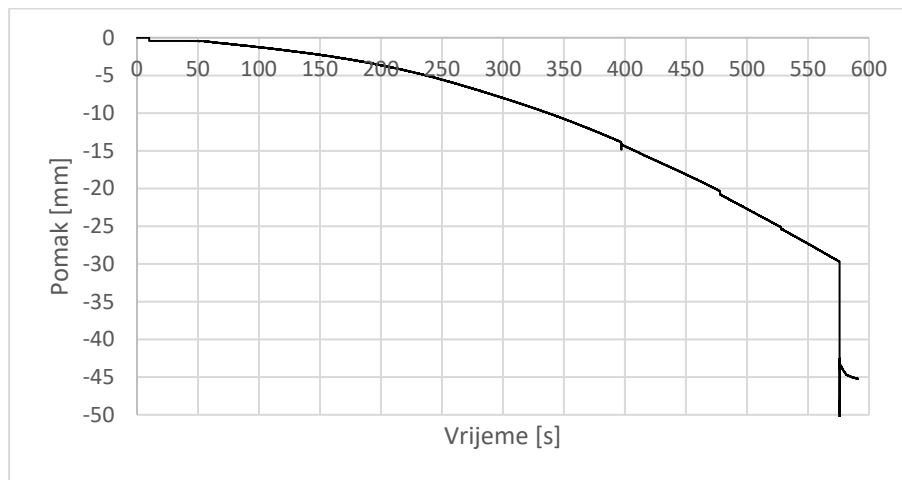
Usljed djelovanja opterećenja te rotacije uzorka na osloncu, dolazi do pomaka oslonca. Kako bi se odredili relativni progibi na sredini uzorka potrebno je isključiti utjecaj pomaka oslonaca. Na slici 34 prikazan je utjecaj pomaka oslonaca na pomak uzorka te je dan izraz za određivanje relativnog progiba na sredini uzorka iz izmjerenih pomaka.



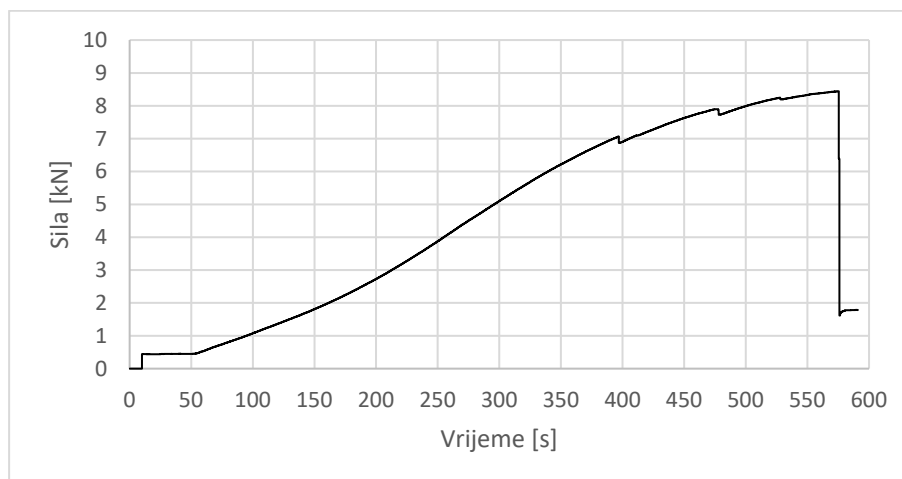
$$W_s = \eta_s - \frac{\eta_A + \eta_B}{2} \quad (2)$$

Slika 34 Određivanje progiba iz izmjerenih pomaka (izradio autor)

Na dijagramu 5 prikazani su relativni pomaci na sredini uzorka u vremenu nakon isključivanja utjecaja pomaka oslonaca, dok je na dijagramu 6. prikazano djelovanje sile u vremenu.

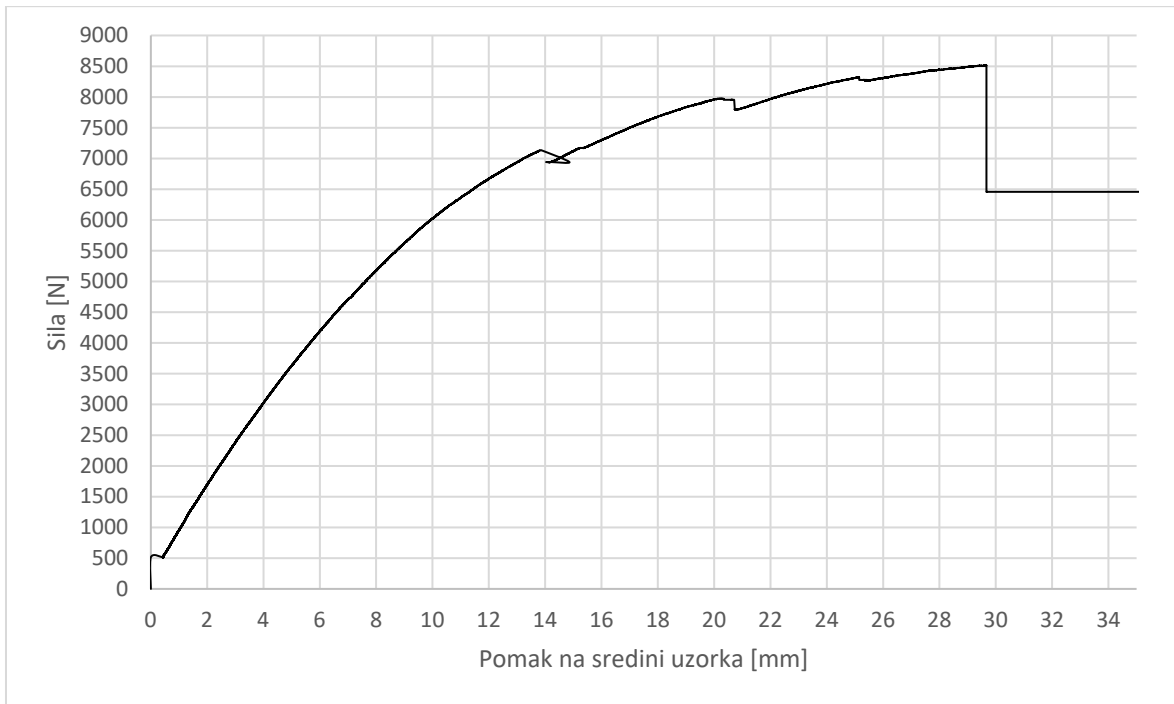


Dijagram 5 – Relativni progib na sredini uzorka u vremenu - LVDT-3



Dijagram 6 – Prikaz djelovanja sile u vremenu

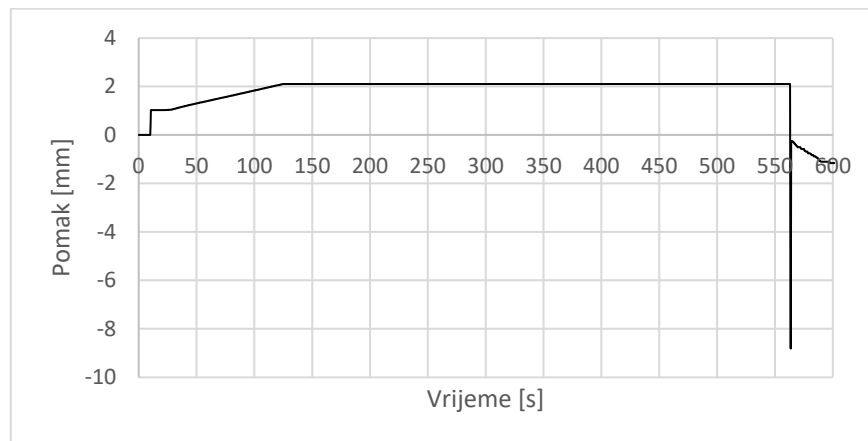
Dijagram 7 prikazuje odnos djelovanja sile i pomaka na sredini raspona uzorka. Na dijagramu je jasno vidljiva granica dviju faza, tj. skok u početnom dijelu dijagrama uslijed dodatnog opterećivanja uzorka. Također, vidljivo je kako dijagram nije zaobljen u kontinuitetu do pojave sloma, već se vide područja opadanja sile uslijed lokalnog popuštanja materijala pri vrijednostima od 7047, 7743 i 8198 N. Time je dijagram nazubljen, a slom uzorka javlja se pri sili od 8513,39 N.



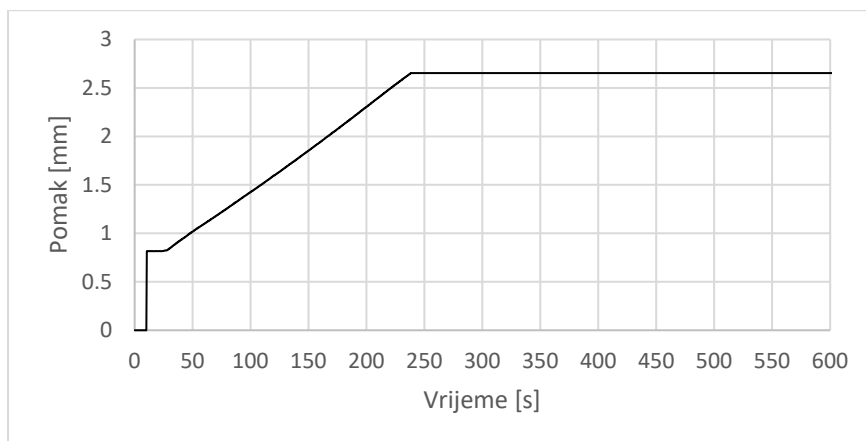
Dijagram 7 – Prikaz odnosa djelovanja sile i pomaka uzorka na sredini raspona

3.5.2. Ispitivanje PROBA 2 / SP2 – 45

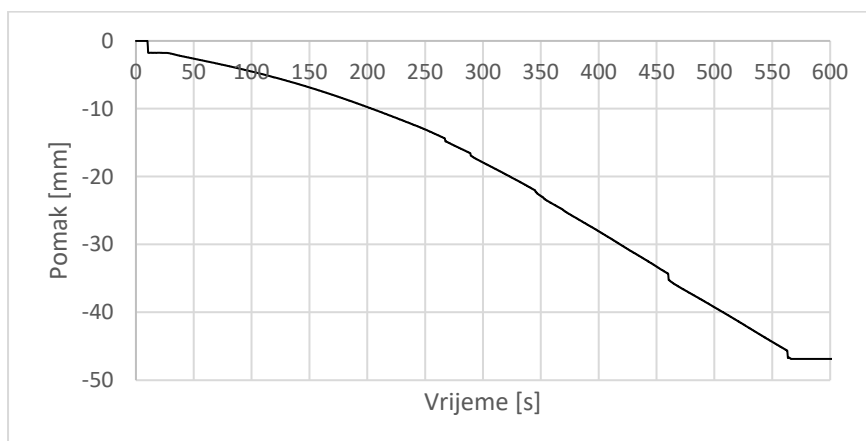
Na dijagramima 8, 9 i 10 prikazani su izmjereni pomaci na LVDT uređajima u vremenu.



Dijagram 8 – Izmjereni pomaci u vremenu - LVDT-0



Dijagram 9 – Izmjereni pomaci u vremenu - LVDT-2

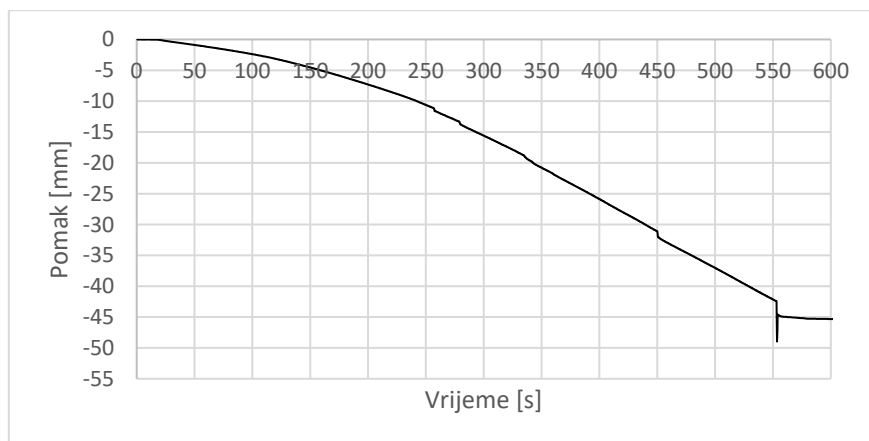


Dijagram 10 – Izmjereni (apsolutni) pomaci u vremenu - LVDT-3

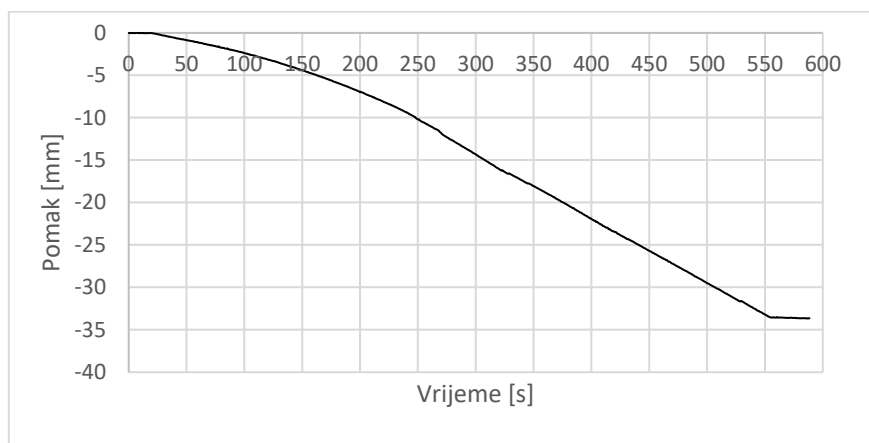
Na dijagramima 8 i 9 vidljivo je područje gdje je pomak uzorka u vremenu konstantan. Razlog je u tome što LVDT-0 i LVDT-2 uređaji nisu dobro postavljeni pri ispitivanju, odnosno pomak je prekoračio mjerno područje uređaja. Time se izgubio dio podataka pa je relativne pomake na sredini uzorka potrebno usporediti s rezultatima dobivenim optičkim mjerenjem.

Dijagramom 11 prikazani su relativni pomaci na sredini uzorka dobiveni LVDT mjernim uređajima, dok su dijagramom 12 prikazani relativni pomaci dobiveni optičkim mjerenjem.

Optičkim mjerenjima nije bilježena početna faza, pa je tako u dijagramima 11 i 12 ona izostavljena, odnosno prikazani su relativni pomaci samo u drugoj fazi.



Dijagram 11 – Relativni progib na sredini uzorka u vremenu - LVDT-3



Dijagram 12 – Relativni progib na sredini uzorka u vremenu – GOM

Uspoređivanjem dijagrama 11 i 12, vidljivo je kako postoji značajna razlika u rezultatima relativnog pomaka uzorka na sredini raspona. Naime, gubitkom podataka pomaka na osloncima prilikom mjerenja LVDT uređajima, relativni pomak na kraju ispitivanja veći je za 8,92 mm, odnosno 26,6 % naspram pomaka mjerenim GOM optičkim kamerama. Pomaci se razlikuju iz razloga što se uslijed gubitka podataka na osloncima nisu uklonili svi utjecaji pomaka oslonaca iz apsolutnog pomaka na sredini uzorka.

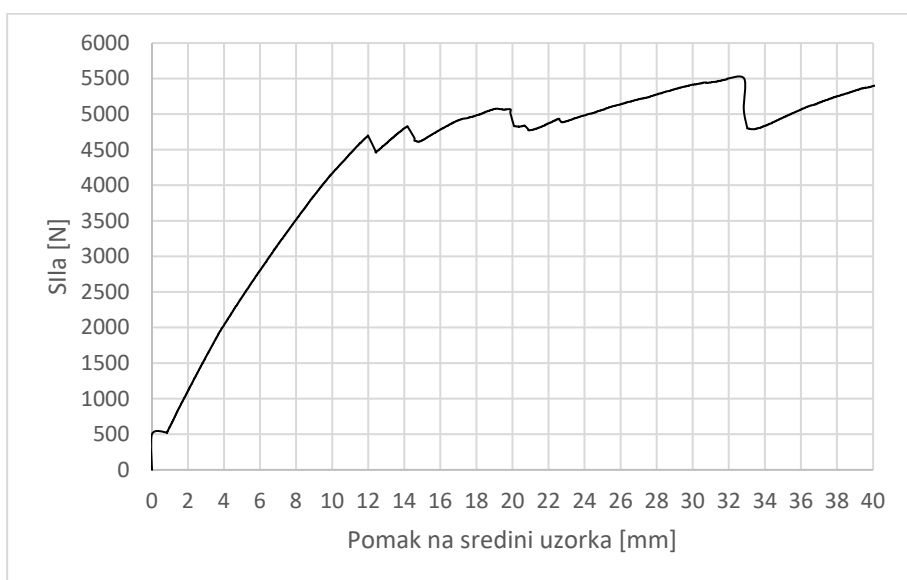
Dijagramom 13 prikazano je djelovanje sile u vremenu gdje je moguće uočiti trenutke opadanja vrijednosti sile. Uvidom u navedeni dijagram vidljivo je kako je granična vrijednost čvrstoće uzorka prekoračena prvim opadanjem sile pri vrijednosti od 4,85 kN.



Dijagram 13 – Prikaz djelovanja sile na uzorak u vremenu

Vrijednosti relativnog pomaka na sredini uzorka približno su jednake pri popuštanju čvrstoće uzorka (Dijagram 11 i 12). Time su za prikaz odnosa sile i pomaka korišteni podaci dobiveni LVDT uređajem unatoč greškama koje se javljaju u području već slomljenog uzorka.

Dijagramom 14 prikazan je odnos djelovanja sile i pomaka uzorka na sredini raspona.



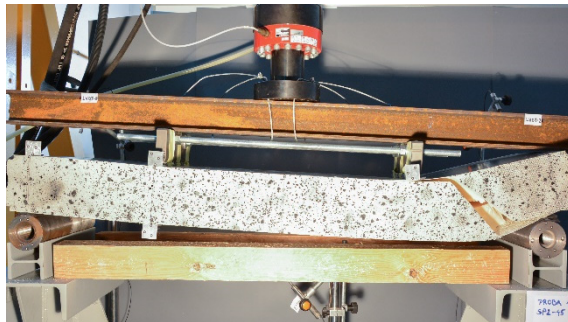
Dijagram 14 – Prikaz odnosa djelovanja sile i pomaka na sredini raspona

U prilogima 7-9 prikazani su pomaci na osloncima, sredini uzorka te u točkama gdje se nanosi sila na uzorak, koji su zabilježeni optičkim kamerama.

3.6. Oblici sloma uzorka i uočene nepravilnosti prilikom ispitivanja

Pri ispitivanju PROBA 1/SP-45, slom uzorka pojavio se između ležaja sistema za dvostruko opterećenje i desnog oslonca kao što je vidljivo na slici 35. Slom je nastao iznenada te je bio praćen glasnim praskom. Prilikom ispitivanja, u nekoliko trenutaka moglo se čuti tiše praskanje uzorka, a uvid u navedeno moguće je vidjeti iz dijagrama 6 i 7 koji su prikazani u poglavlju 3.5.1. u obliku lokalnog opadanja sile na aktuatoru ili lokalnog povećanja pomaka uzorka.

Slom uzorka nastao je uslijed prekoračenja posmične čvrstoće polimerne pjene te je uslijed slamanja uzorka došlo do pojave lokalne delaminacije, odnosno otkazivanja veze između jezgre i stijenke u području sloma (Slika 36). U prilogu 10 prikazan je tijek nastanka sloma uzorka koji je praćen High-speed kamerom i rastavljen na karakteristične sličice (frame-ove).



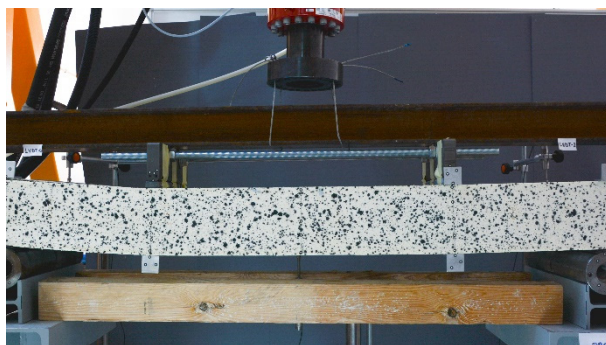
Slika 35 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 1/ SP2-45 – pogled sprijeda (fotografirao autor)



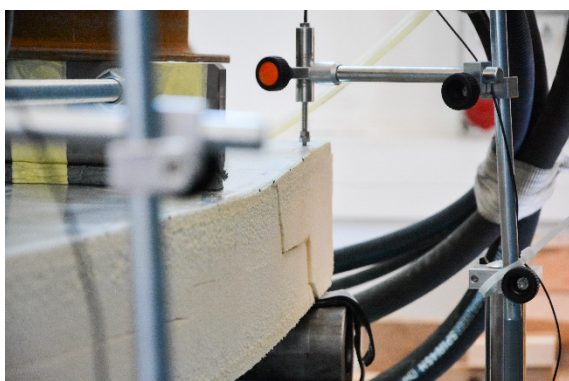
Slika 36 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 1/ SP2-45 – detalj (fotografirala Doc. dr. sc. Paulina Krolo)

Uslijed provođenja ispitivanja PROBA 2/SP-45 došlo je do pojave sloma uzorka na lijevom osloncu (Slika 37). Naime, došlo je do formiranja pukotine na stražnjoj i bočnoj strani uzorka dok je na prednjoj strani uočena delaminacija između gornje stijenke i jezgre (Slike 38 i 39). Uzorak je prilikom ispitivanja praskao češće nego u prethodnom ispitivanju, no kako se očekivao posmični slom, kao i prethodno, nastavljeno je opterećivanje uzorka do vidno uništenog uzorka. Time je došlo to postepenog otkazivanja nosivosti u području lijevog oslonca. Otkazivanje kao takvo normom nije prihvaćeno, pa se ovo ispitivanje smatra nerelevantnim za daljnju obradu.

Promatranjem dijagrama 13 i 14 koji su dani u poglavlju 3.5.2. ustanovljeno je da je čvrstoća uzorka prekoračena pri prvom popuštanju materijala.



Slika 37 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju PROBA 2/ SP2-45 – pogled sprijeda
(fotografirao autor)



Slika 38 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju
PROBA 2/ SP2-45 – pogled straga
(fotografirao autor)



Slika 39 Prikaz sloma uzorka pri ispitivanju
PROBA 2/ SP2-45 – pogled bočno
(fotografirala Doc. dr. sc. Paulina Krolo)

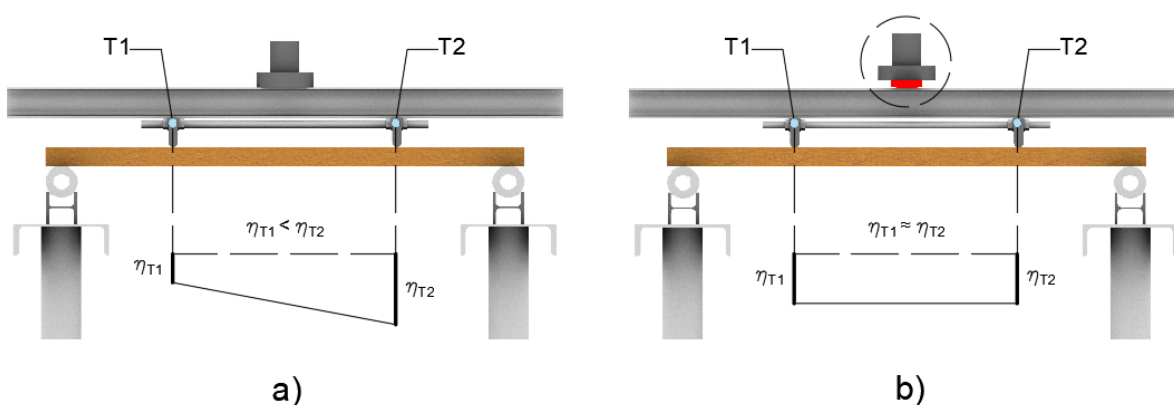
Valja napomenuti kako su oba uzorka i prije ispitivanja bila oštećena, tj. sadržavala su uzdužnu pukotinu u sredini jezgre preko većinske duljine uzorka. Time je uzorak značajno oslabljen pa su njegove vrijednosti čvrstoće i oblici loma upitne točnosti.

Usljed provođenja ispitivanja PROBA 1/SP2-45, uočeno je da se opterećenje s aktuatora ne prenosi podjednako na uzorak. Naime, pregledavanjem video snimke ispitivanja, vidljivo je kako se sila s aktuatora prenosi više na desni oslonac sistema za dvostruko opterećenje čime izaziva i veći pomak uzorka na promatranom dijelu.

Vođeni ovakvom pretpostavkom, provedeno je ispitivanje gdje je na već postavljenim osloncima, umjesto uzorka postavljen drveni tavalon koji je opterećen na isti način kao i u prethodnim ispitivanjima. Tavalon se nije opterećivao do sloma, već samo do pojave minimalnih progiba. Prilikom opterećivanja, optičkim kamerama praćeni su pomaci oslonaca sistema za dvostruko opterećenje u točkama T1 i T2 (Slika 40 a)).

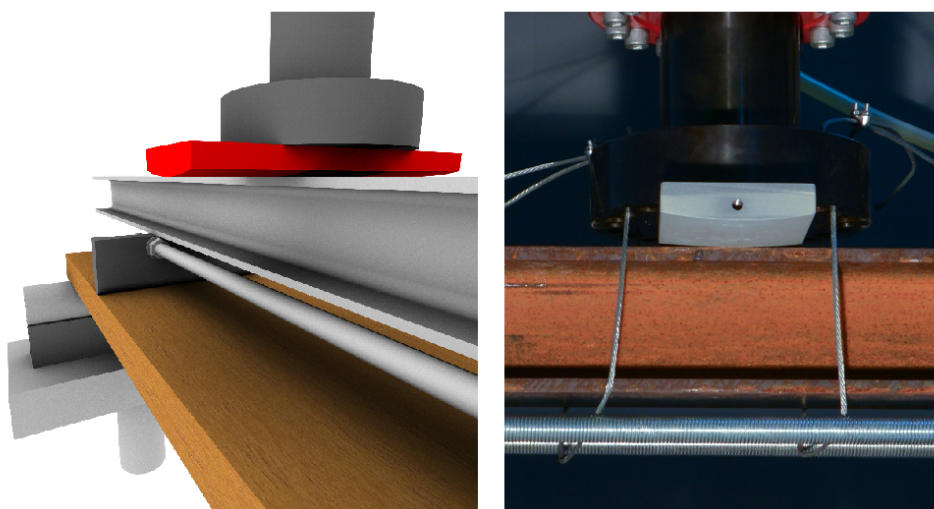
Uspoređivanjem njihovih pomaka potvrđena je pretpostavka o nejednolikoj distribuciji opterećenja.

Postavljanjem konveksne ploče, odnosno postave zglobnog ležaja između klipa aktuatora i HEB-100 profila, formirana je zglobna veza s aktuatorom. S ovako nadograđenim sustavom, ponovljeno je ispitivanje opterećivanja tavalona i promatranja pomaka na osloncima sistema. Analiziranjem rezultata, pomaci u točkama T1 i T2 bili su približno jednaki (Slika 40 b)).



Slika 40 Prikaz ispitivanja tavalona, te shematski prikaz pomaka točaka T1 i T2 a) bez korištenja konveksne ploče; b) sa korištenjem konveksne ploče (izradio autor)

Dodavanjem konveksne ploče omogućena je bolja distribucija opterećenja te je sustav kao takav korišten u danjem ispitivanju. Na slici 41 prikazana je konveksna ploča, odnosno zglobna veza s aktuatorom.



Slika 41 Prikaz konveksne ploče na poziciji između klipa aktuatora i HEB-100 profila (izradio i fotografirao autor)

3.6. Utvrđivanje čvrstoće između čeličnog lima i jezgre polimerne pjene

Analiziranjem rezultata ispitivanja, utvrđeno je da je ispitivanje PROBA 2/SP2-45 bilo neuspješno, te kao što je prethodno napomenuto, rezultati nisu uzimani u obzir prilikom obrade podataka.

Uvidom u snimke High-speed kamere pri ispitivanju PROBA 1/SP2-45 ustanovljeno je da nije došlo do otkazivanja nosivosti kontakta stijenke i jezgre uzorka prije pojave posmičnog sloma uzorka, već neposredno nakon posmičnog sloma.

Vođeni time, možemo utvrditi kako čvrstoća na kontaktu između stijenke i jezgre odgovara posmičnoj čvrstoći jezgre panela koja je dobivena savijanjem uzorka.

Posmična čvrstoća jezgre uslijed savijanja uzorka određena je prema izrazu (3) preuzetom iz [24] :

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d + c)b} \quad (3)$$

gdje su $P_{max} = 8513,39$ N maksimalna sila pri slomu uzorka izražena u njutnima (N), $d = 155$ mm debljina uzorka, $c = 152,7$ mm debljina jezgre uzorka i $b = 370$ mm širina uzorka kompozitnog panela. Posmična čvrstoća između čeličnog lima i jezgre polimerne pjene jednaka je posmičnoj jezgre, te ona iznosi $F_s^{ult} = 74,778$ kPa.

Naprezanje u oblogama uzorka uslijed savijanja uzorka moguće je odrediti prema izrazu (4) preuzetom iz [24]:

$$\sigma = \frac{P_{max} \cdot S}{4t(d + c)b} \quad (4)$$

gdje su $P_{max} = 8513,39$ N maksimalna sila pri slomu, $S = 1400$ mm razmak između oslonaca, $t = 1,15$ mm debljina stijenke uzorka, $d = 155$ mm debljina uzorka, $c = 152,7$ mm debljina jezgre uzorka i $b = 370$ mm širina uzorka kompozitnog panela.

Naprezanje u oblogama iznosi $\sigma = 22,758$ MPa, no usporedimo li je sa čvrstoćom pocinčanog lima koja se kreće u granicama od 500 – 600 MPa, možemo vidjeti kako postoji velika rezerva u otpornosti materijala obloge.

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je utvrditi svojstva prionjivosti između čelika i polimerne pjene provedbom testa savijanja kompozitnog panela.

Provedena ispitivanja, dio su projekata Predgotovljene zgrade gotovo nulte energije proizvedene na industrijski način i Istraživanje ponašanja komponenata kompozitnog panela s integriranom jezgrom, a služe kao preliminarni testovi za dobivanje uvida u rezultate koje je moguće očekivati u budućim ispitivanjima.

Ispitivanje je izvedeno u skladu s američkim normama ASTM C393/C393M-11 i ASTM D7250/7250M-20 koje opisuju cjelokupno provođenje ispitivanja te određivanje čvrstoće između obloge i jezgre testom savijanja.

Testom savijanja u četiri točke ispitano je ukupno 2 uzorka, gdje je udaljenost između djelovanja dvostrukih sila jednaka polovici raspona uzorka. Na prvom uzorku nastao je slom uslijed prekoračenja posmične čvrstoće jezgre panela (polimerne pjene), dok je kod drugom uzorka došlo do postepenog otkazivanja nosivosti na ležaju uzorka. U skladu s navedenim normama, prihvaćeni su rezultati samo s prvog ispitivanja, dok se drugo ispitivanje smatra neuspješnim.

Snimanjem tijekom nastanka sloma uzorka High-Speed kamerom, utvrđeno je kako se slom pojavio najprije u polimernoj pjenu, te je uslijedilo popuštanje veze između jezgre i obloge uzorka (debonding). Time se dokazuje kako je veza između čelika i polimerne pjene dobra, odnosno kako je njezina čvrstoća jednaka posmičnoj čvrstoći polimerne pjene dobivenoj testom savijanja. Također, nije potrebno dodavati adhezive između obloga i jezgre i/ili mehanički naborati i ohrapaviti oblogu panela.

Posmična čvrstoća jezgre dobivena savijanjem uzorka iznosi 74,778 kPa. Kako su se ispitivala samo dva uzorka, a od toga je samo jedno ispitivanje bilo uspješno, navedeni rezultat nije mjerodavan iz razloga jer ga nemamo s čime usporediti. Time se preporučuje da se ubuduće ispita više uzoraka kako bi rezultat bio točniji.

Unatoč rezultatima ispitivanja, prilikom provođenja ispitivanja i obrade podataka, uočene su brojne stavke koje se preporučuju primijeniti u budućim ispitivanjima.

Dostavljeni su uzorci nepravilna oblika kvadra, tj. blago su napuhnuti po duljini i imaju veliku posmičnu pukotinu u uzdužnom smjeru koja smanjuje čvrstoću panela. Preporuka je da se prilikom proizvodnje obrati pažnja na brzinu injektiranja pjene i duljinu prešanja uzorka kako se ne bi stvorili zračni džepovi u blokovima.

Pomaci uzorka pri ispitivanju praćeni su LVDT mjernim uređajima i GOM sustavom optičkih kamera. Dok se LVDT zasniva na kontaktnoj metodi mjerenja pomaka, GOM sustav bilježi pomake optičkim mjerenjima. Naime, radi se o dva zasebna sustava koji su neovisni jedan o drugom. Svaki od navedenih ima svoje prednosti i nedostatke, no poteškoće se javljaju kada se podaci iz jednog sustava pokušaju sinkronizirati s podacima iz drugog. Početno je zamišljeno da se LVDT uređajima mjeri pomak promatrane točke na jednom rubu uzorka, a optičkim mjerenjima pomak na drugom rubu uzorka. Prosječnom vrijednošću tih dvaju pomaka dobio bi se pomak na sredini uzorka promatrane točke. Kako su sustavi nepovezani, a osjetljivost mjerenja je drugačija za svaki sustav, sinkronizacija podataka je veoma mukotrpana i neisplativa za potrebnu preciznost. Time se preporučuje da se koristi jedan sustav kao glavni mjerni sustav, dok drugi služi za kontrolu rezultata ili kao zamjena u slučaju nepravilnog rada glavnog sustava. Kako bi se dobili precizniji rezultati mjerenja, predlaže se da se LVDT uređaji postave na sredinu uzorka, a sistem za dvostruko opterećenje preradi tako da ne smeta njihovom postavljanju u navedenu poziciju.

Površinskim markiranjem uzorka omogućilo se analiziranje polja pomaka uzorka pri ispitivanju. Trajanje ispitivanja vremenski je dugotrajno pa je i radi toga razlika između dvaju fotografija veća, odnosno pre velika kako bi se registrirao tijek nastanka sloma. Time nije moguće dobiti uvid u trenutku sloma, već samo u trenucima prije i poslije sloma. Kako se značajnije promjene u uzorku ne pojavljuju, radi brže i lakše obrade podataka, preporučuje se korištenje samo točkastog praćenja pomaka na specifičnim mjestima uzorka.

Prilikom ispitivanja uočena je neravnomjerna preraspodjela opterećenja s aktuatora na sistem za dvostruko opterećenje za slučaj kada je aktuator u direktnom kontaktu sa sistemom. Kako bi se postigla bolja preraspodjela opterećenja, preporučuje se korištenje zglobnog klipa aktuatora ili postavljanje konveksne ploče između klipa aktuatora i sistema radi formiranja zglobne veze.

5. LITERATURA

- [1] D. Zenkert, *The Handbook of Sandwich Construction*, Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1997.
- [2] Puput Wiyono, Faimun, Priyo Suprobo i Heppy Kristijanto, »CHARACTERIZATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RIGID POLYURETHANE FOAM,« *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, p. 14398, 24 Prosinac 2016.
- [3] Chung Kim Yuen, Cunliffe i du Plessis, »Blast response of cladding sandwich panels with tubular cores,« *International Journal of Impact Engineering*, p. 266, 27 Travanj 2017.
- [4] »U.S. Naval Academy (USNA),« [Mrežno]. Available: https://www.usna.edu/Users/mecheng/pjoyce/composites/Short_Course_2003/13_PAX_Short_Course_Sandwich-Constructions.pdf.
- [5] »Kingspan,« [Mrežno]. Available: <https://www.kingspan.com/hr/hr-hr/grupe-proizvoda/1-izolacijski-paneli-za-krovove-i-zidove/reference/centar-za-bowling-martigny>.
- [6] »agoda,« [Mrežno]. Available: <https://www.agoda.com/camping-adria-mobile-homes-lanterna/hotel/porec-hr.html?cid=1844104>.
- [7] »MBM kontejneri,« [Mrežno]. Available: <http://www.mbmkontejneri.com/sr/galerija#pid=70>.
- [8] »Design Composite,« [Mrežno]. Available: <https://www.design-composite.com/en/lightweight-construction/commercial-vehicles>.
- [9] »Design Composite,« [Mrežno]. Available: <https://www.design-composite.com/en/lightweight-construction/industry>.
- [10] »Flight-mechanic,« [Mrežno]. Available: <https://www.flight-mechanic.com/wings-part-three/>.
- [11] »TCN,« [Mrežno]. Available: <https://www.tcn.al/en/radomes/>.
- [12] H. G. Allen, *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, Oxford: Pergamon Press, 1969.
- [13] »Alternativa,« [Mrežno]. Available: <https://alternativa.ba/zidni-i-fasadni-termoizolacioni-paneli/topterm-fpp/>.
- [14] »Dragonplate,« [Mrežno]. Available: <https://dragonplate.com/carbon-fiber-nomex-honeycomb-core-025-x-6-x-6>.
- [15] »Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje,« Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. [Mrežno]. Available: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=5582>.

- [16] A. B. Morgan i E. Toubia, »Cone calorimeter and room corner fire testing of balsa wood core/phenolic composite skin sandwich panels,« *Journal of Fire Sciences*, 11 Studeni 2013.
- [17] D. Cripps, »NetComposites,« [Mrežno]. Available: <https://netcomposites.com/guide/core-materials/honeycomb-cores/>.
- [18] L. J. Gibson i M. F. Ashby, *Cellular solids*, Cambridge Solid State Science Series, 1997.
- [19] C. KILIÇASLAN, »EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE QUASI-STATIC AND HIGH STRAIN RATE CRUSHING BEHAVIOR OF SINGLE AND MULTI-LAYER ZIG-ZAG 1050 H14 AL TRAPEZOIDAL CORRUGATED CORE SANDWICH STRUCTURES,« Izmir, 2014.
- [20] H. N. Wadley, *Multifunctional periodic cellular metals*, Philos Transact A Math Phys Eng Sci, 2006.
- [21] K. Evans, »Exeter,« [Mrežno]. Available: http://people.exeter.ac.uk/jngrima/mat_sci/.
- [22] P. Krolo, N. Bede, D. Grandić i I. Palijan, »INFLUENCE OF DENSITY ON TENSILE AND COMPRESSIVE PROPERTIES OF POLYURETHANE FOAM,« u *2nd International Conference on Construction Materials for Sustainable Future*, Bled, Slovenia, 2020.
- [23] P. Krolo, »Plan i program ispitivanja, klasa: 361-03/20-02/04,« Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2021.
- [24] ASTM International, »C393/C393M-11 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Construction by Beam Flexure,« US, 2012.
- [25] A. International, »Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness,« US.
- [26] G. f. S. u. Rijeci, »Katalog laboratorijske i terenske opreme Građevinskog fakulteta u Rijeci,« Rijeka, 2017.
- [27] W. Broughton, »Testing the mechanical, thermal and chemical properties of adhesives for marine environments,« u *Adhesives in Marine Engineering*, National Physical Laboratory, UK, 2012, p. 99.

PRILOZI

- List 1 Shema uzoraka u ispitnim blokovima – Blok 002_045_1
- List 2 Shema uzoraka u ispitnim blokovima – Blok 002_045_2,3
- List 3 Shema uzoraka u ispitnim blokovima – Blok 002_045_4,5
- List 4 Proba 1 – SP2/45 – Pomaci na osloncima (GOM Correlate)
- List 5 Proba 1 – SP2/45 – Pomak na sredini uzorka (GOM Correlate)
- List 6 Proba 1 – SP2/45 – Pomaci u točkama 1 i 3 (GOM Correlate)
- List 7 Proba 2 – SP2/45 – Pomaci na osloncima (GOM Correlate)
- List 8 Proba 2 – SP2/45 – Pomak na sredini uzorka (GOM Correlate)
- List 9 Proba 2 – SP2/45 – Pomaci u točkama 1 i 3 (GOM Correlate)
- List 10 Prikaz praćenja nastanka sloma uzorka High-Speed kamerom

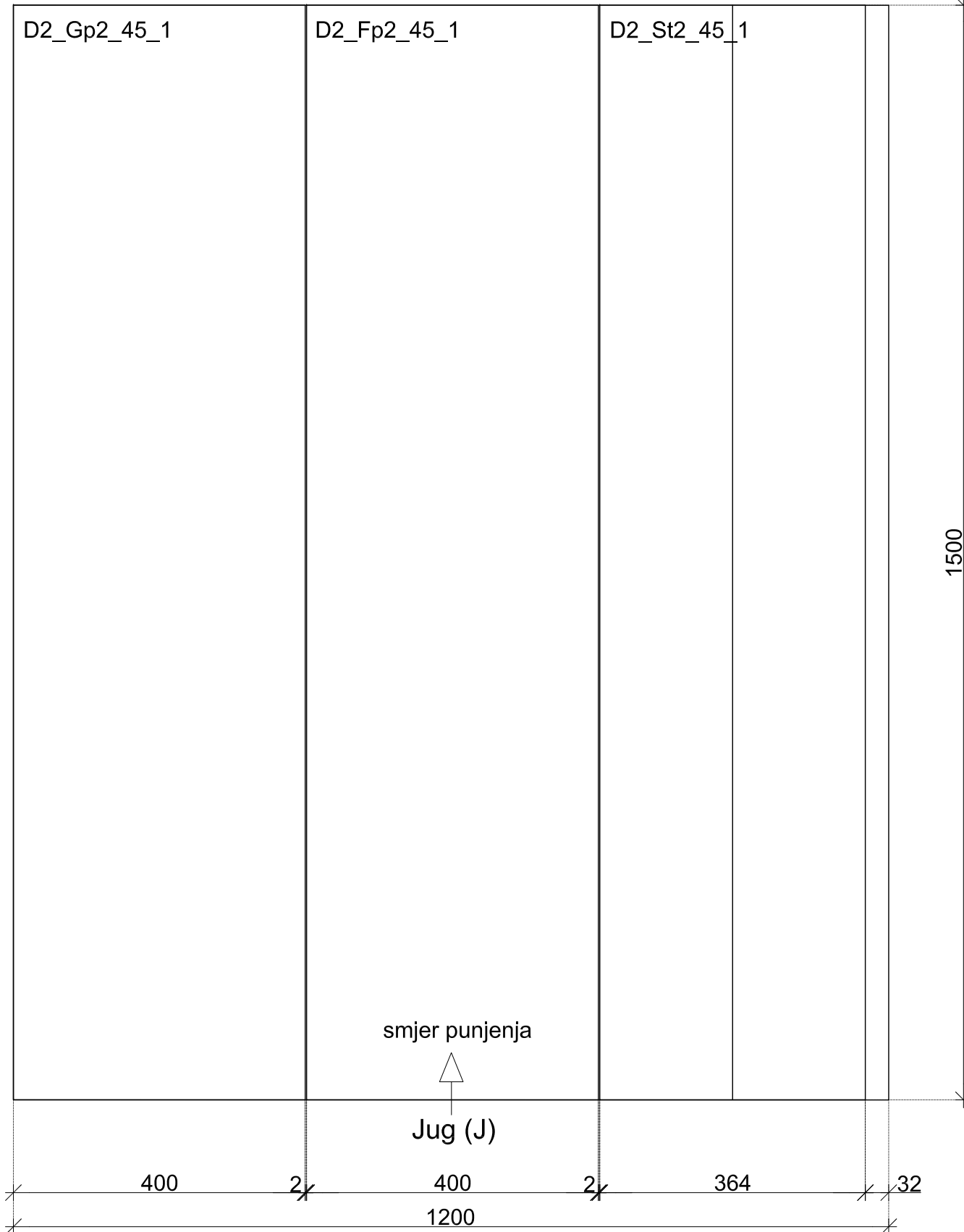
Tlocrt

Schema uzoraka u ispitnim blokovima

Blok 002_45_1

gustoća: 45 kg/m³

Sjever (S)



OZNAKE:

45 - gustoća pjene: 45 kg/m³

1... - broj uzorka

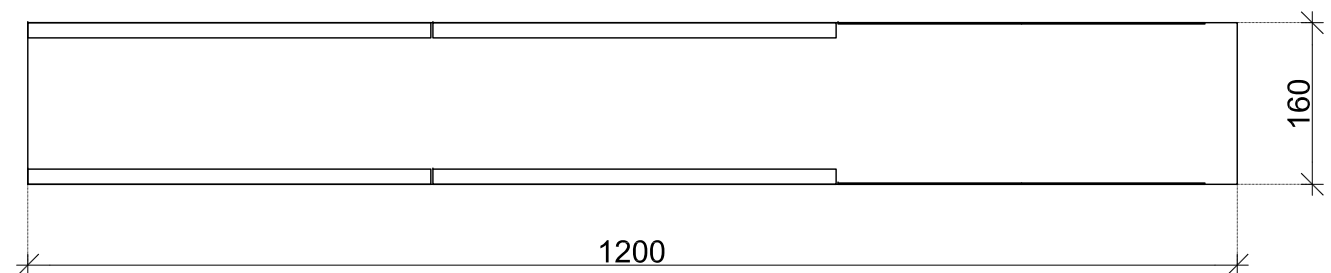
Ispitivanje svojstva prionjivosti - savijanje

Gp2 - fermacell® Gipsvlaknaste ploče, t₂ = 15 mm

Fp2 - fermacell® Firepanel A1, t₂ = 15 mm

St2 - čelični lim, t₂ = 1,15 mm

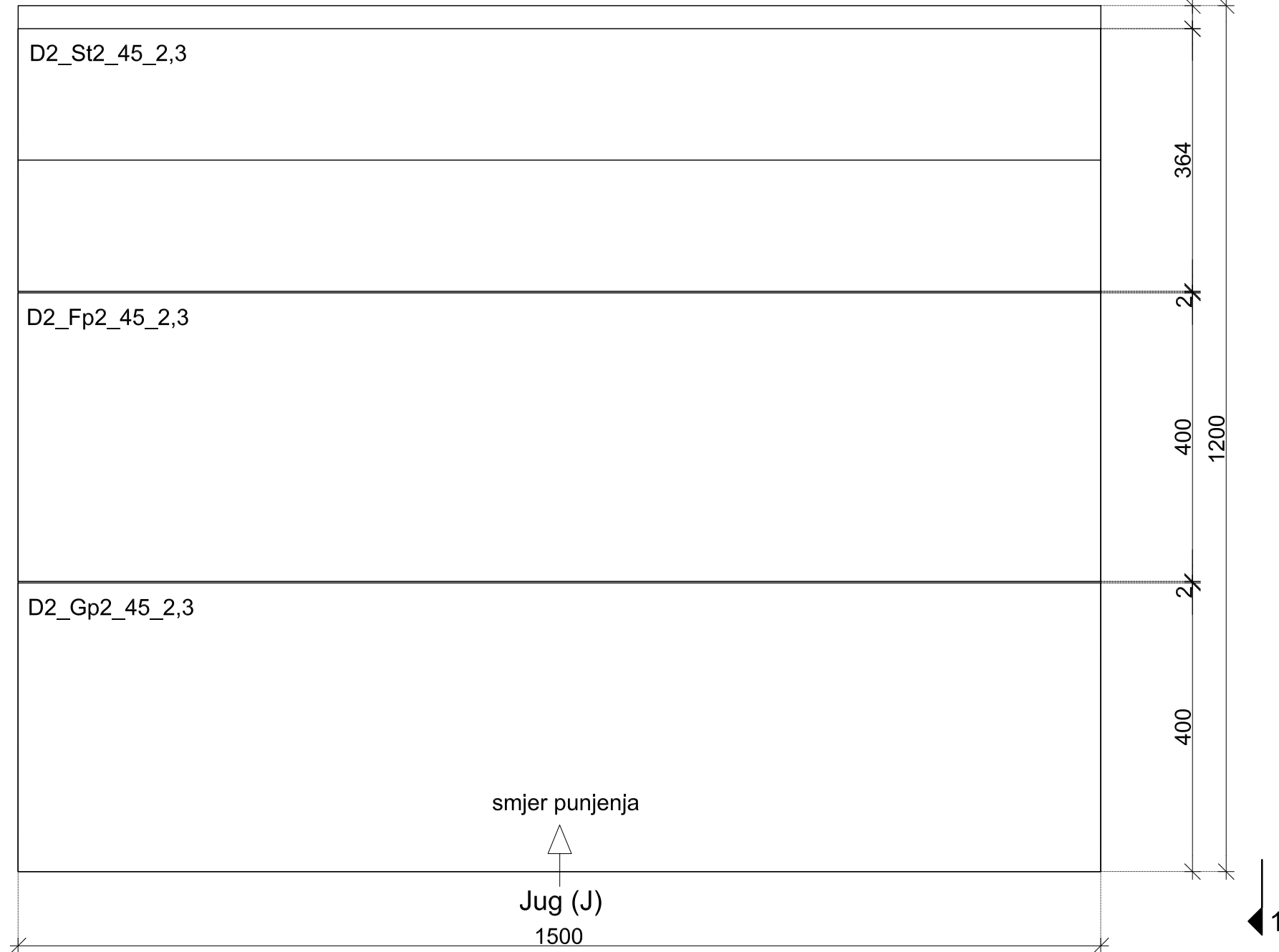
Pogled 1-1



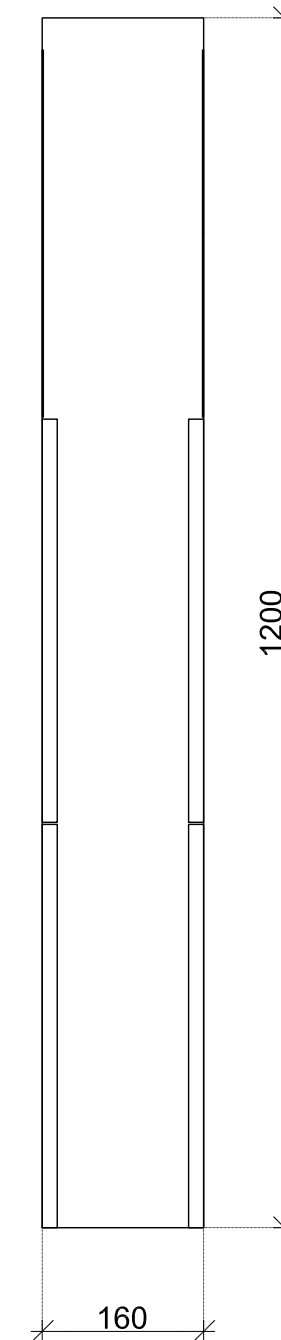
Izdanje	Potpis	Datum	Prezime	Potpis	Tolerancija slobodnih mjera	TEHN+PLAST PROFILI	
5		25.03.0201.			ISO 2768-1	Mjerilo 1:7,5	
4		Projektirao	Palijan				
3		Konstruirao	Crneković, Lulić		Tolerancija oblika i položaja		
2		Pregledao					
1		Odobrio			ISO 2768-2		
Kod projekta		KK.01.2.1.02.0046		Broj crteža		011	
Naziv projekta				Naziv crteža		List	11
PREDGOTOVLJENE ZGRADE GOTOVO NULTE ENERGIJE PROIZVEDENE NA INDUSTRIJSKI NAČIN				Blok 002_45_1		Listova	30
						Format	A3

Tlocrt

Sjever (S)



Pogled 1-1



OZNAKE:

45 - gustoća pjene: 45 kg/m³


2,3... - broj uzorka

Ispitivanje svojstva prionjivosti - savijanje

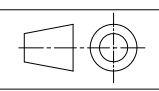
Gp2 - fermacell® Gipsvlaknaste ploče, t₂ = 15 mm

Fp2 - fermacell® Firepanel A1, t₂ = 15 mm

St2 - čelični lim, t₂ = 1,15 mm

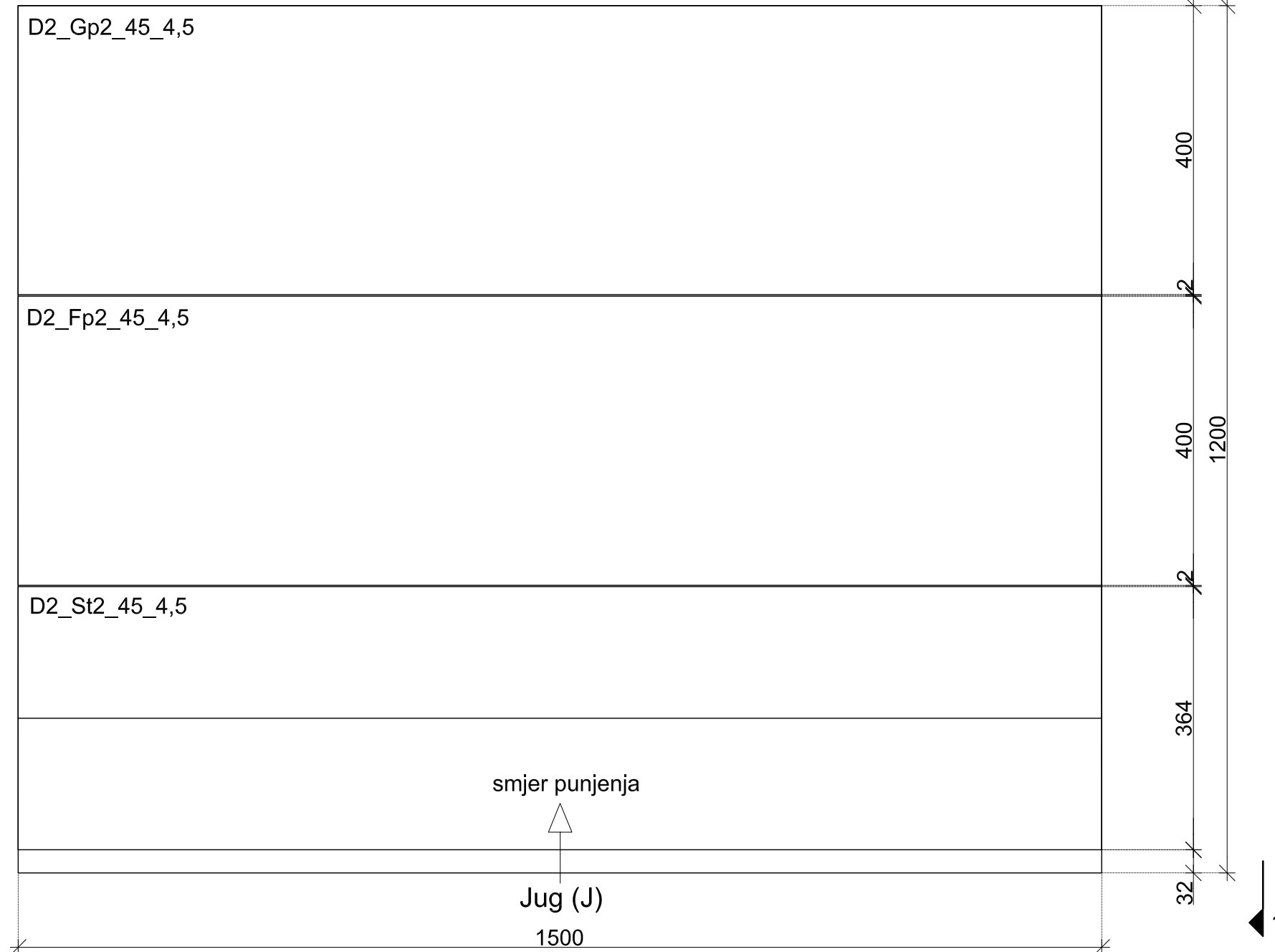
Izdanje	Potpis	Datum	Prezime	Potpis	Tolerancija slobodnih mjera		
5		25.03.0201.			ISO 2768-1		
4		Projektirao	Palijan		Tolerancija oblika i položaja		
3		Konstruirao	Crneković, Lulić				
2		Pregledao					
1		Odobrio			ISO 2768-2		
Kod projekta					KK.01.2.1.02.0046	Broj crteža	012
Naziv projekta					Naziv crteža		
PREDGOTOVLJENE ZGRADE GOTOVO NULTE ENERGIJE PROIZVEDENE NA INDUSTRIJSKI NAČIN					Blok 002_45_2,3		
					List	12	
					Listova	30	
					Format	A3	

Mjerilo 1:7,5

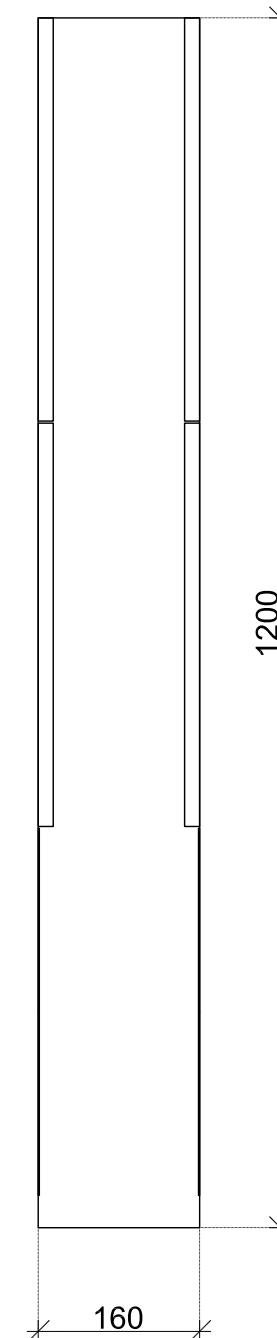


Tloct

Sjever (S)



Pogled 1-1



OZNAKE:

45 - gustoća pjene: 45 kg/m³


4,5... - broj uzorka

Ispitivanje svojstva prionjivosti - savijanje

Gp2 - fermacell® Gipsvlaknaste ploče, t₂ = 15 mm

Fp2 - fermacell® Firepanel A1, t₂ = 15 mm

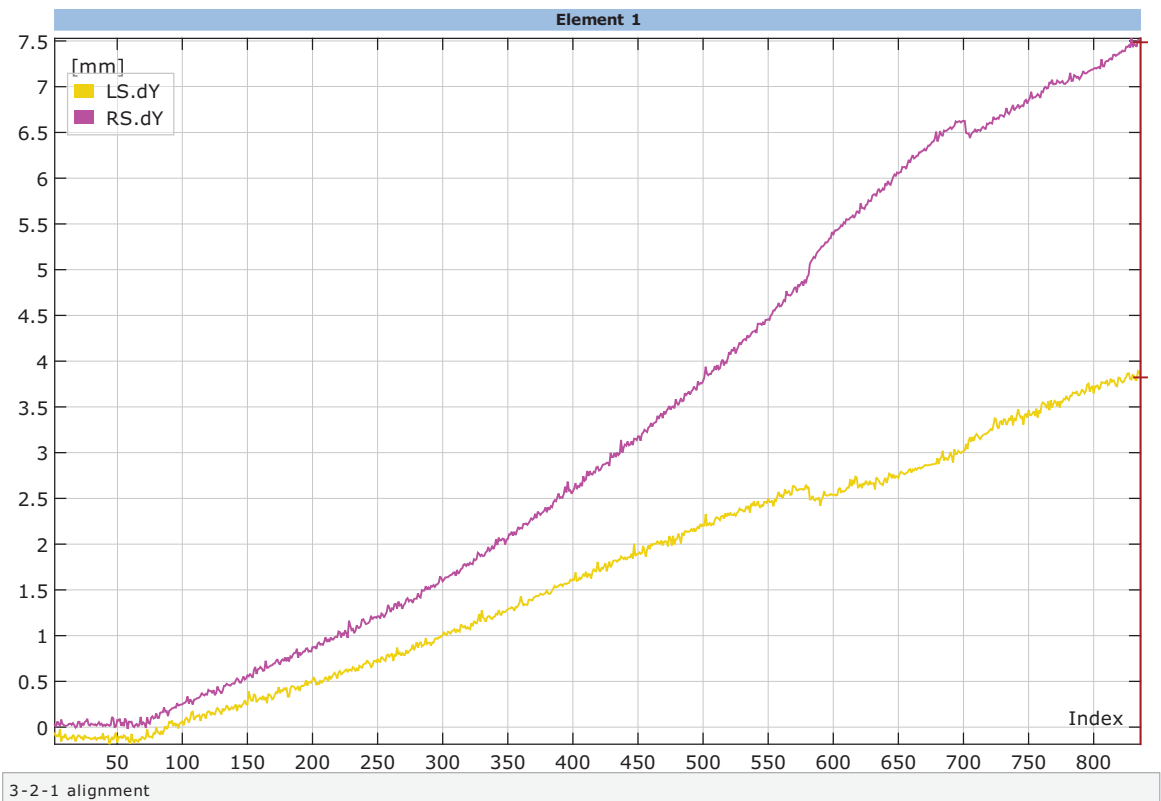
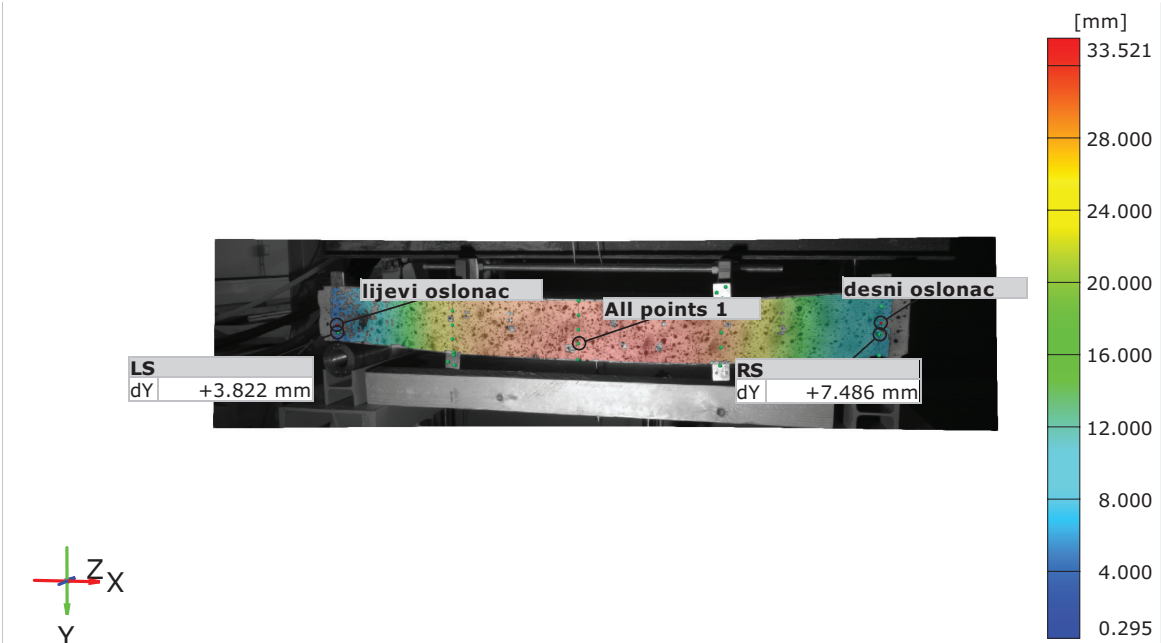
St2 - čelični lim, t₂ = 1,15 mm

Izdanje	Potpis	Datum	Prezime	Potpis	Tolerancija slobodnih mjera	
5		25.03.0201.			ISO 2768-1	
4		Projektirao	Palijan		Tolerancija oblika i položaja	
3		Konstruirao	Crneković, Lulić		Mjerilo	
2		Pregledao			1:7,5	
1		Odobrio			ISO 2768-2	
Kod projekta				KK.01.2.1.02.0046	Broj crteža	
Naziv projekta				Blok 002_45_4,5		13
PREDGOTOVLJENE ZGRADE GOTOVO NULTE ENERGIJE PROIZVEDENE NA INDUSTRIJSKI NAČIN				Naziv crteža		30
						Format
						A3

PROBA 1 - SP2/45 - Pomaci na osloncima

836

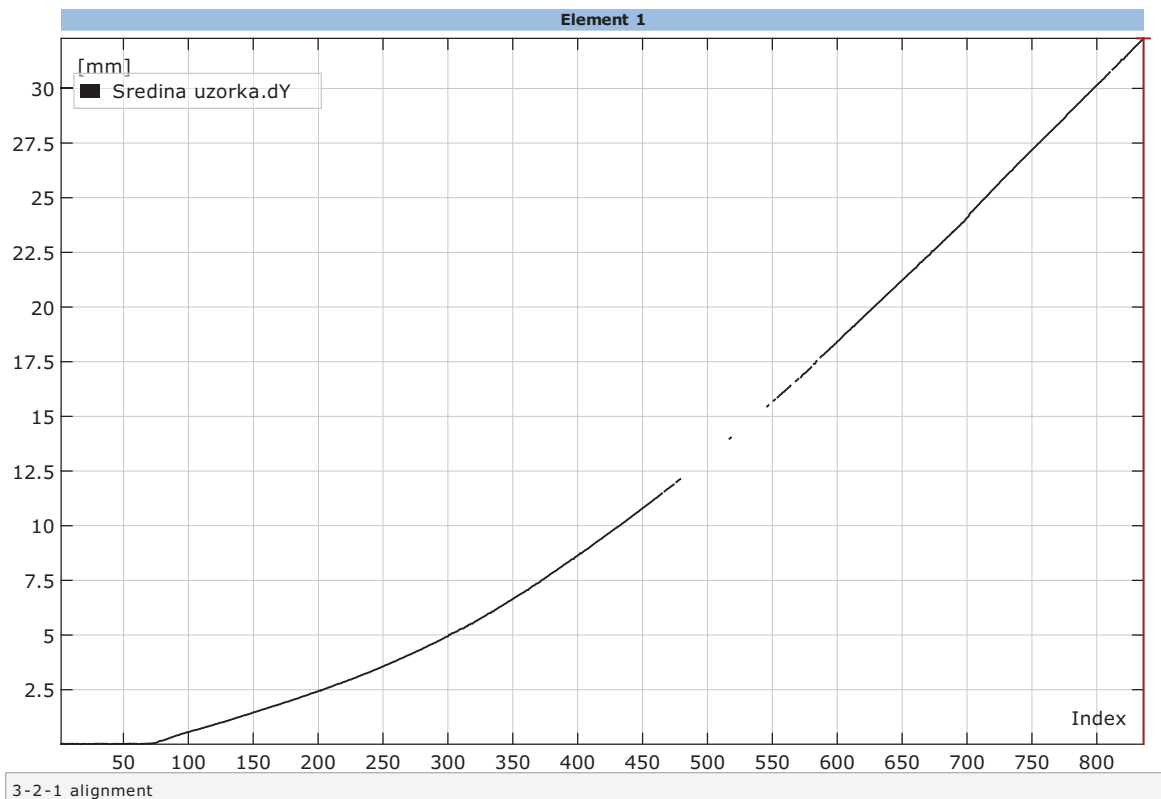
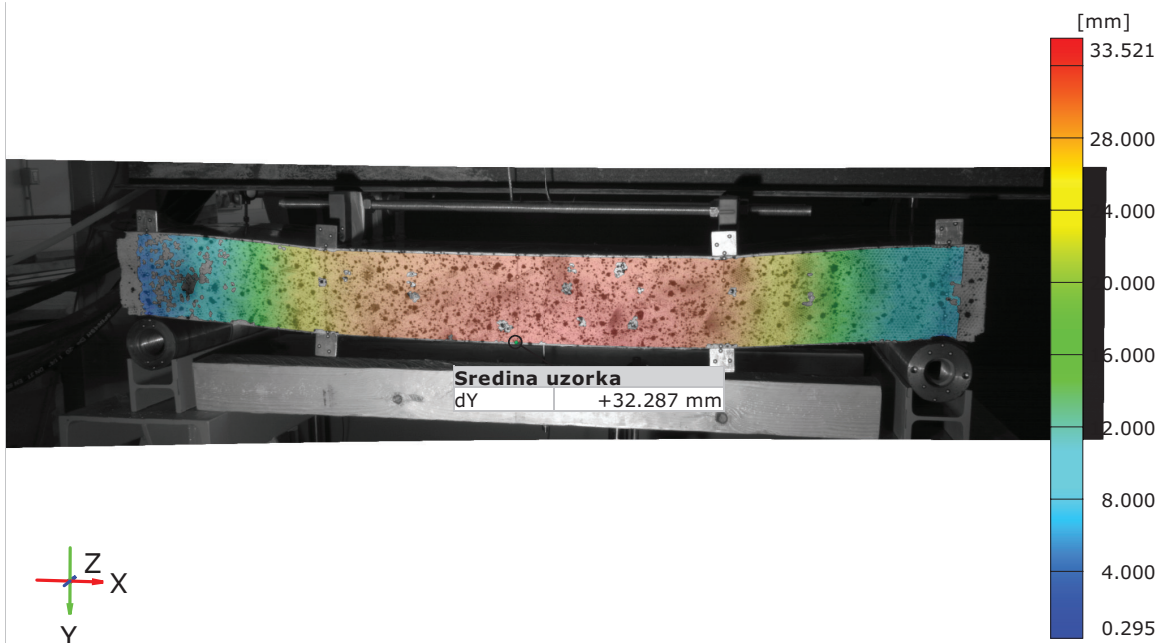
Geometry reference: 1



PROBA 1 - SP2/45 - Pomak na sredini uzorka

836

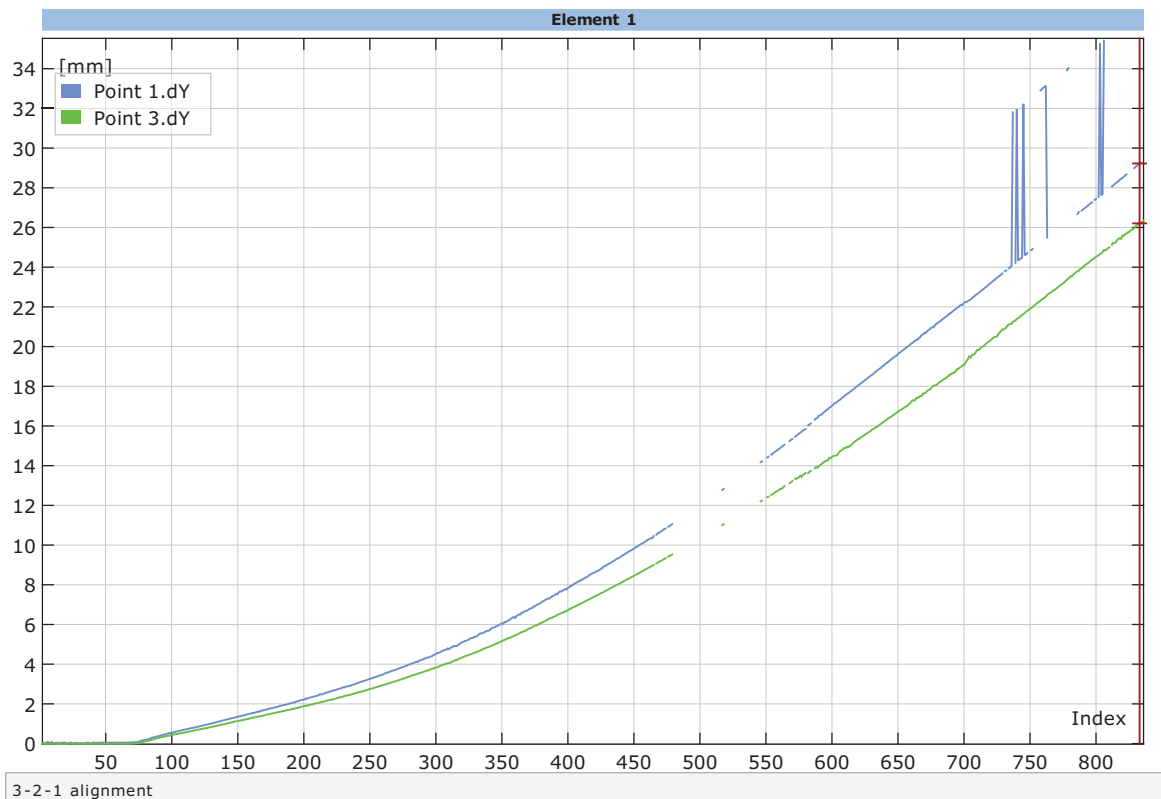
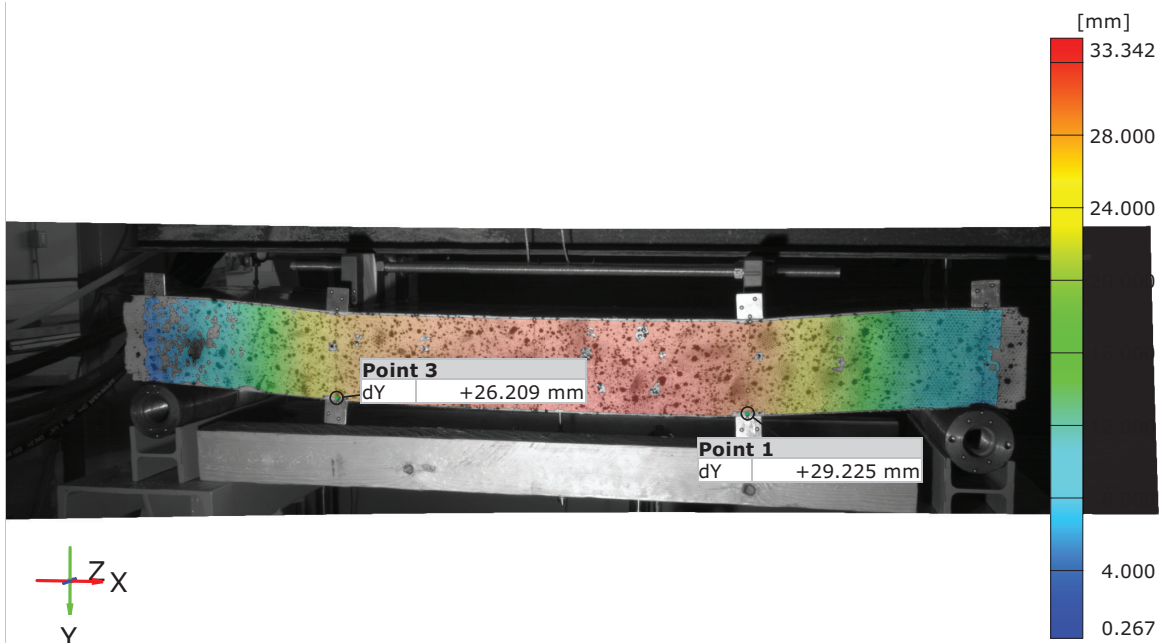
Geometry reference: 1



PROBA 1 - SP2/45 - Pomaci u točkama 1 i 3

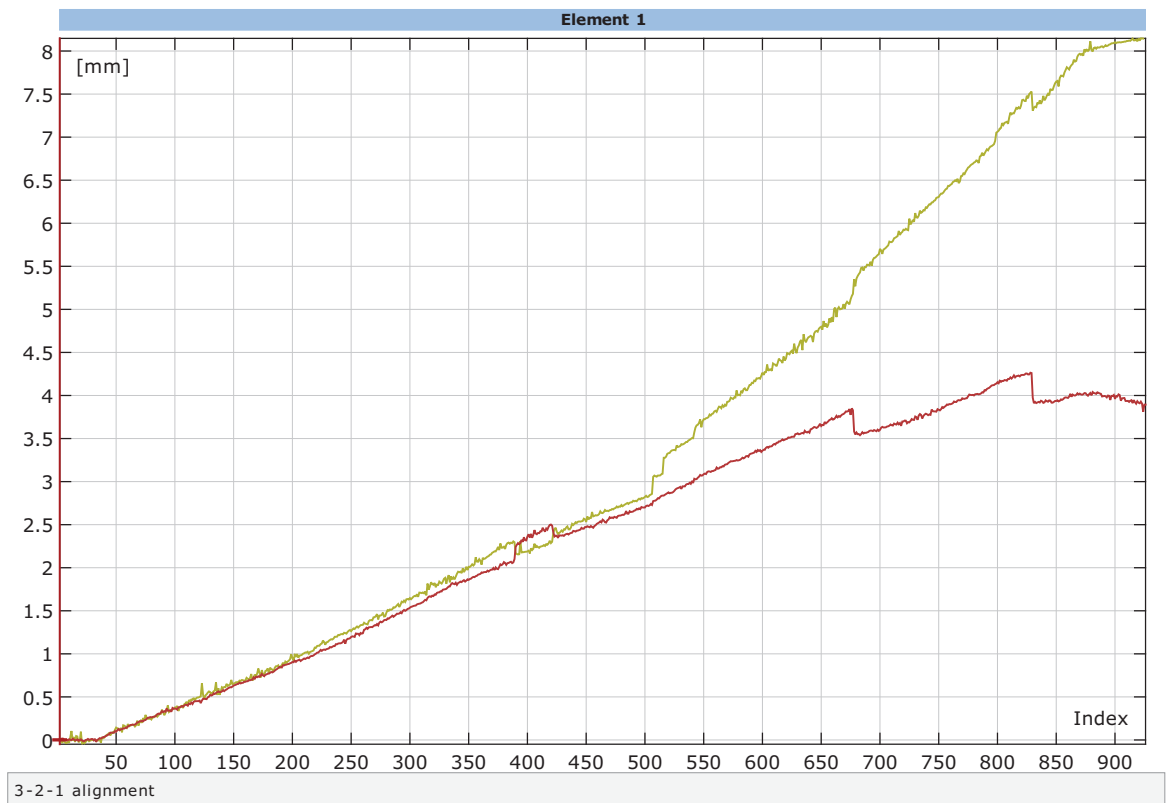
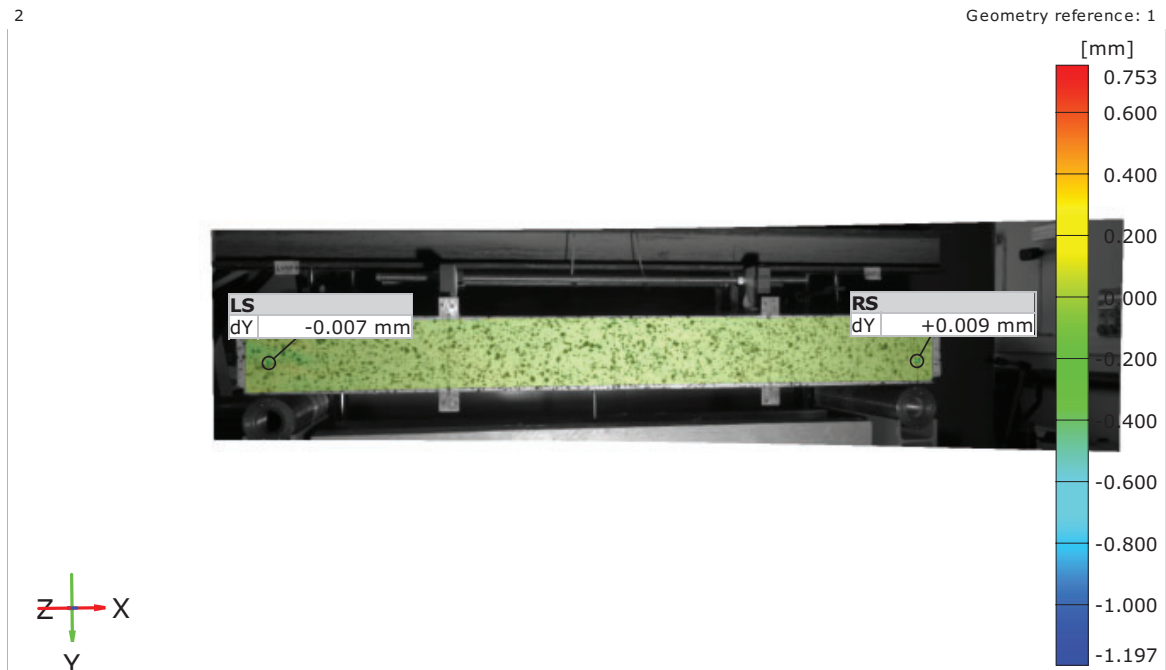
833

Geometry reference: 1



PROBA 2 - SP2/45 - Pomaci na osloncima

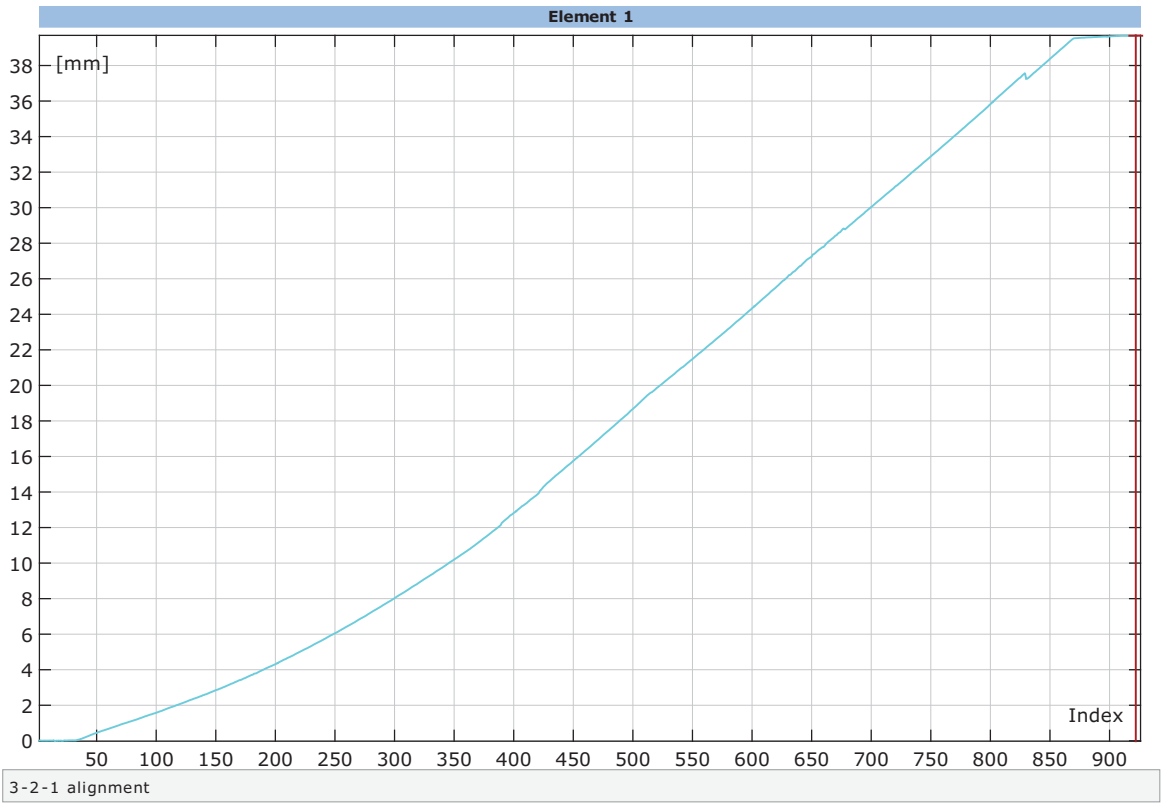
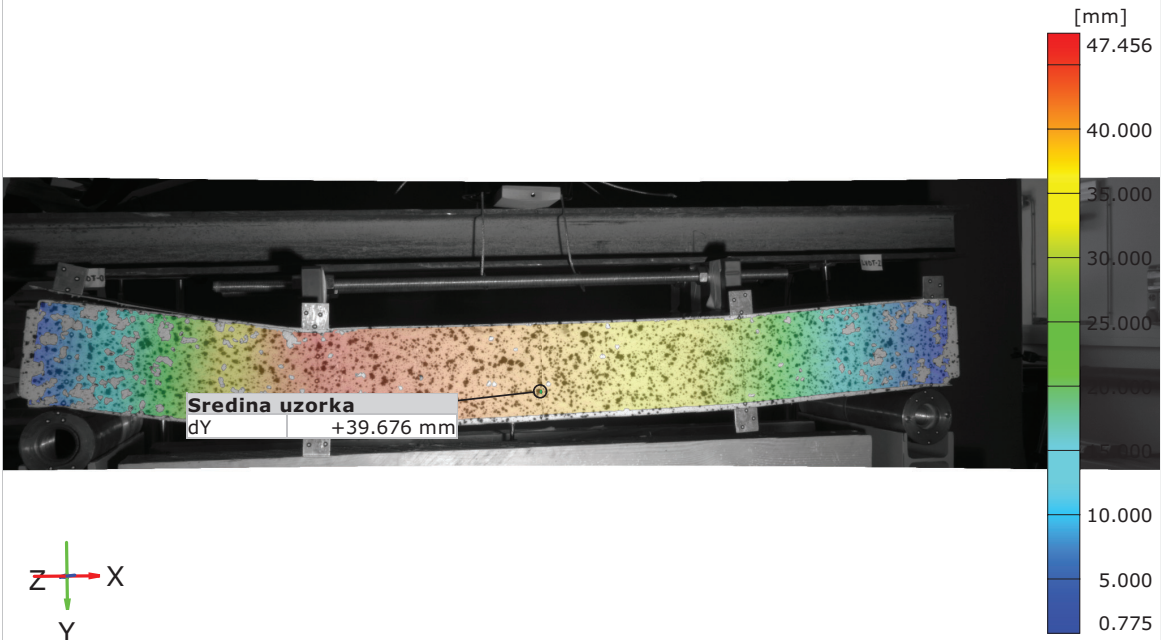
2



PROBA 2 - SP2/45 - Pomak na sredini uzorka

922

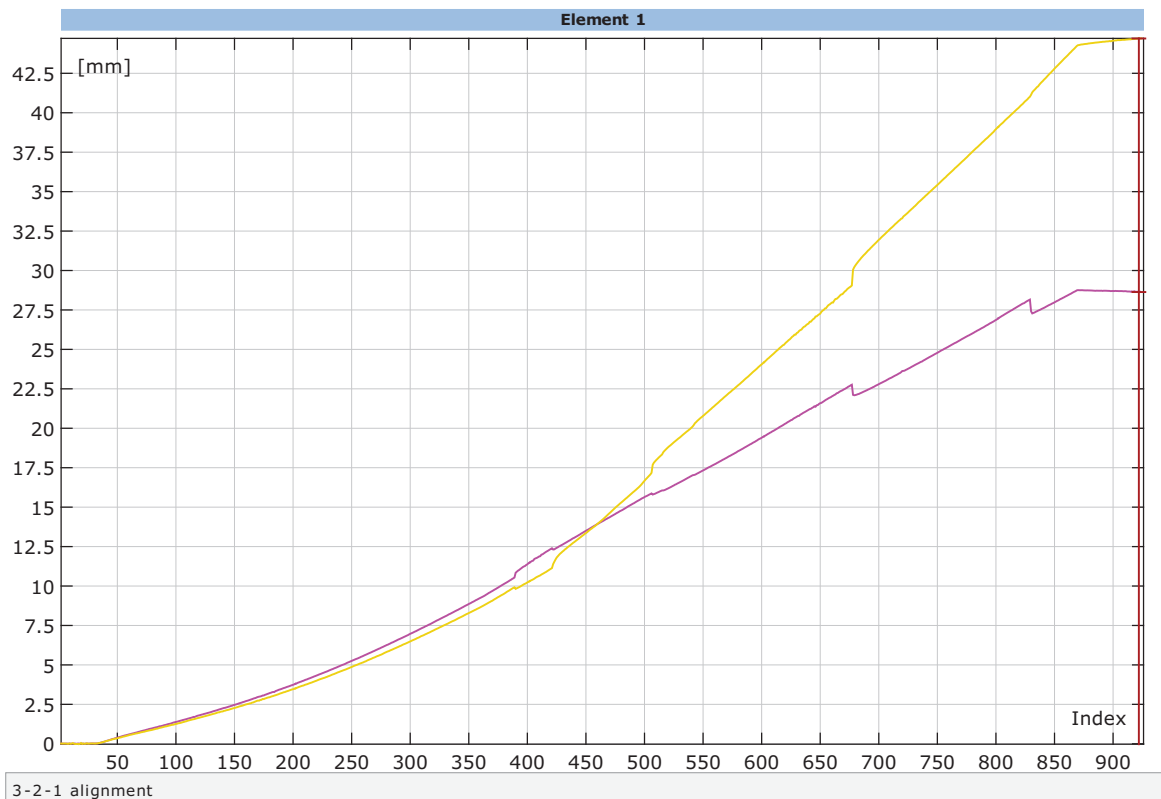
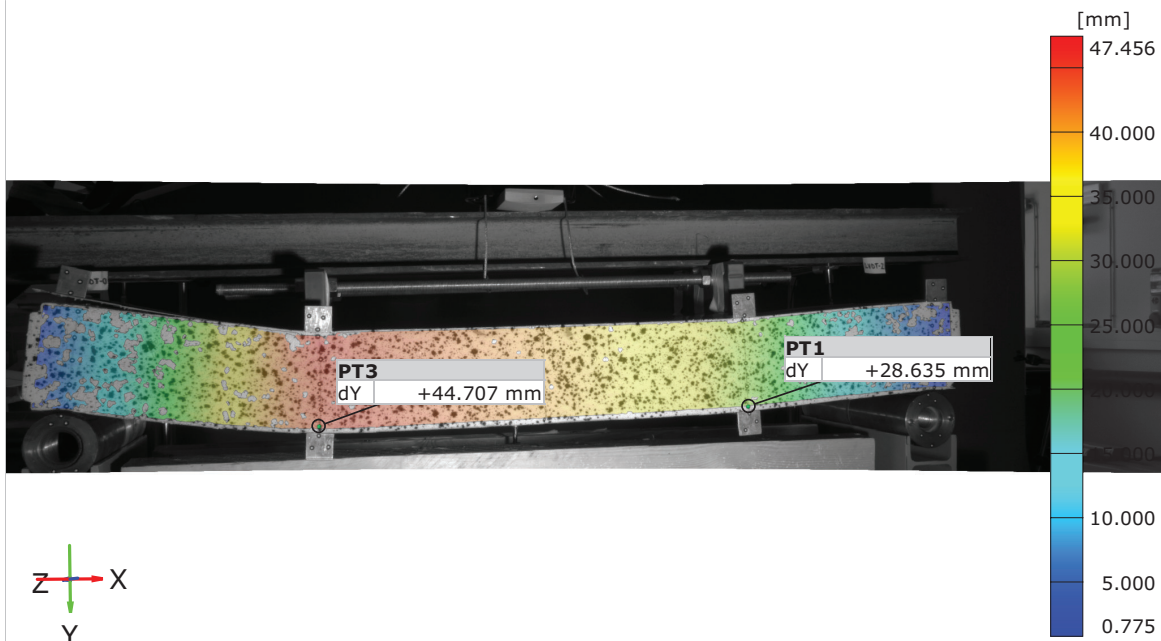
Geometry reference: 1



PROBA 2 - SP2/45 - Pomaci u točkama 1 i 3

922

Geometry reference: 1



Prikaz praćenja nastanka sloma uzorka High-Speed kamerom

