

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tihana Đukanović
Marcela Medić

**ANALIZA DETALJA STOPE
SKELE ZA OBNOVU ZAGREBAČKE KATEDRALE**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Davora Skejića i izv. prof. dr. sc. Marka Bartolca te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

Sadržaj

1.	UVODNO O ZAGREBAČKOJ KATEDRALI	1
1.1.	Općenito	1
1.2.	Rekonstrukcije katedrale kroz povijest	1
1.3.	Konstruktivni sustav.....	4
1.4.	Zagrebački potres 2020. godine.....	5
1.5.	Konstruktivska obnova katedrale nakon potresa 2020. godine.....	7
2.	NOVA SKELA ZA OBNOVU ZAGREBAČKE KATEDRALE	1
2.1.	Općenito o skelama	1
2.1.1.	Podjela skela	2
2.1.2.	Dijelovi skele.....	4
2.2.	Nova skela za obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale	6
2.2.1.	Koncept konstrukcije skele i faze izgradnje	6
2.2.2.	Stope skele	9
3.	CILJ I HIPOTEZA RADA.....	13
4.	PROCJENA OTPORNOSTI DETALJA STOPE SKELE	15
4.1.	Ulazni podaci	15
4.2.	Analitička procjena otpornosti	16
4.2.1.	Proračun otpornosti vijaka.....	16
4.2.2.	Otpornost zavara	19
4.2.3.	Proračun otpornosti vretena.....	19
4.2.4.	Zaključci analitičke procjene otpornosti	22
4.3.	Numerička procjena otpornosti.....	22
4.3.1.	IDEA StatiCa.....	22
5.	LABORATORIJSKA ISPITIVANJA PONAŠANJA DETALJA STOPE SKELE.....	24
5.1.	Opseg i ciljevi laboratorijskog ispitivanja	24
5.2.	Opis programa laboratorijskog ispitivanja detalja stope.....	24
5.2.1.	Postav ispitivanja	24
5.2.2.	Geometrijske karakteristike uzoraka	30
5.3.	Ispitivanje uzoraka	35

5.3.1.	Općenito	35
5.3.2.	Tijek ispitivanja	36
5.4.	Rezultati ispitivanja	37
5.4.1.	Odnos sile i pomaka preše.....	37
5.4.2.	Odnos sile i pomaka na mjestu PV1, PV2 i PV3	44
5.4.3.	Odnos sile i pomaka na mjestima PH1 i PH2.....	48
5.5.	Ponašanje uzoraka i načini otkazivanja.....	52
6.	NUMERIČKA SIMULACIJA PONAŠANJA DETALJA STOPE SKELE	55
6.1.	Općenito	55
6.2.	Opis modela konačnih elemenata	56
6.3.	Numerički rezultati i diskusija	58
6.3.1.	Ponašanje uzorka stope skele opterećenog na savijanje uslijed poprečne sile 58	
6.3.2.	Numerička analiza utjecaja uzdužne sile na ponašanje detalja stope	63
7.	DISKUSIJA REZULTATA.....	65
7.1.	Usporedba rezimiranih rezultata otpornosti	65
8.	ZAKLJUČAK	71
8.1.	Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja	71
8.2.	Smjernice za daljnja istraživanja	72
9.	ZAHVALE	73
	POPIS LITERATURE	74
	POPIS SLIKA.....	76
	POPIS TABLICA	78
	SAŽETAK	79
	SUMMARY	80

1. UVODNO O ZAGREBAČKOJ KATEDRALI

1.1. Općenito

Zagrebačka katedrala prva je gotička građevina u Hrvatskoj. Svojom povijesti predstavlja povijest Zagrebačke biskupije, ali i Grada Zagreba. Iako ne postoji službena povelja o samom osnutku katedrale, iz tzv. *Felicijanove isprave* iz 1134. doznajemo da je njen utemeljitelj bio kralj Ladislav. Nakon njegove smrti započeta je gradnja nove prvostolnice koja je trajala više od 100 godina. Posvećena je 1217. godine Blaženoj Djevici Mariji. U provalama Tatara početkom 13. stoljeća katedrala je gotovo u potpunosti razrušena te je ostala sačuvana sakristija i ostaci koji ukazuju na prijelazni romanički stil u kojem je bila građena. Na slici 1.1. prikazana je Zagrebačka katedrala prije potresa 1880. [1]



Slika 1.1 Zagrebačka katedrala prije potresa 1880. [1]

1.2. Rekonstrukcije katedrale kroz povijest

Nakon provale Tatara gradnja nove katedrale započeta je u gotičkom stilu kada su izgrađene središnja te dvije pokrajnje apside i sakristija. Svetište i sakristija sagrađeni tada su sačuvani do danas. Posvetom oltara 1285. godine označen je kraj izgradnje katedrale. U naredna dva stoljeća nastavljena je obnova katedrale te su nadograđeni svodovi zapadnog dijela crkve i donji dijelovi dvaju zvonika u gotičkom stilu. U drugoj polovici 15. stoljeća, za vrijeme biskupa Osvalda Thuza, cijela je građevina natkrivena te je započela gradnja zvonika na južnoj strani pročelja. [1]

Godine 1624. u katedrali je izbio prvi veliki požar uzrokovan udarom groma koji je zapalio krovšte. Drugi veliki požar dogodio se 1645. godine te je nanio još veću štetu konstrukciji. U narednim obnovama katedrala se nadograđivala te se nastavila uređivati unutrašnjost katedrale.

Zagreb je 9. studenog 1880. godine pogodio potres sa epicentrom u blizini Medvednice, magnitude 6,3 prema Richteru. Potres je uzrokovao teška oštećenja na raskošnoj katedrali poput urušavanja svodova, drobljenja poda i oltara te oštećenje zvonika, slika 1.2. Zbog navedenih posljedica potresa bila je potrebna temeljita obnova katedrale koju je predvodio Hermann Bollé prema nacrtima graditelja Friedricha Schmidta, u neogotičkom stilu. Za vrijeme te obnove katedrala je dobila novo pročelje sa tornjevima visine 105 metara. Obnova je završena 1902. godine, a katedrala je dobila sadašnji prepoznatljivi izgled.



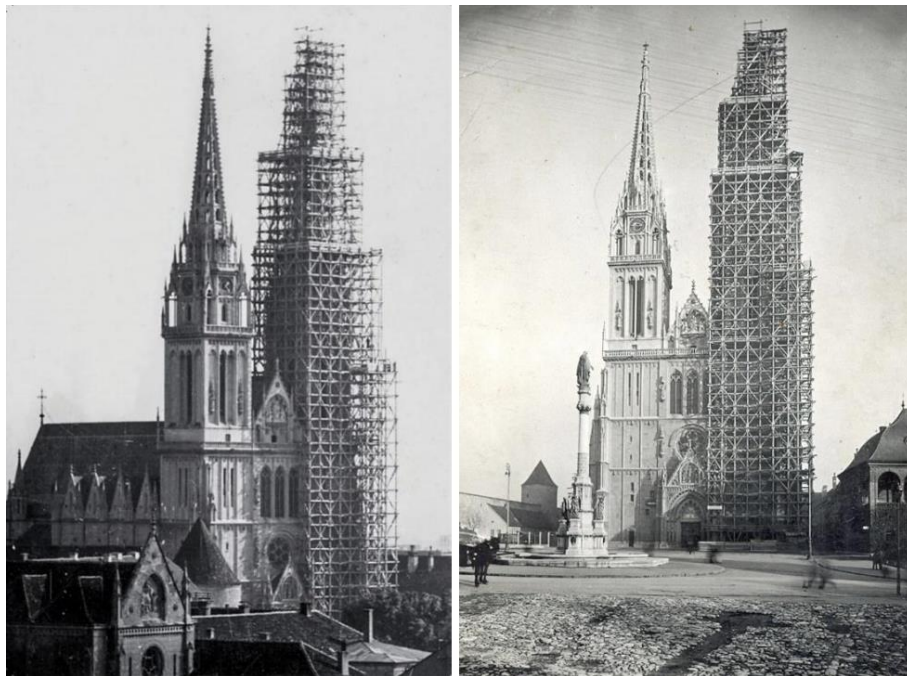
Slika 1.2 Oštećenja na katedrali nakon potresa 1880.[2]

Iz financijskih je razloga u obnovi katedrale korišten vapnenački kamen koji ima manju trajnost, osobito za tornjeve i zapadno pročelje. Na slici 1.3 vidljivo je trenutno stanje kamena, odnosno porozna struktura oštećena djelovanjem agresivnih atmosferilija. Progresivno propadanje vapnenačkog kamena je dovelo do novih oštećenja, a time i do nove potrebe za obnovom koja je započela 1938. i trajala do 1941. prilikom koje se obnavljao cijeli južni toranj. [3]



Slika 1.3 Prikaz porozne strukture oštećenog kamena na tornjevima

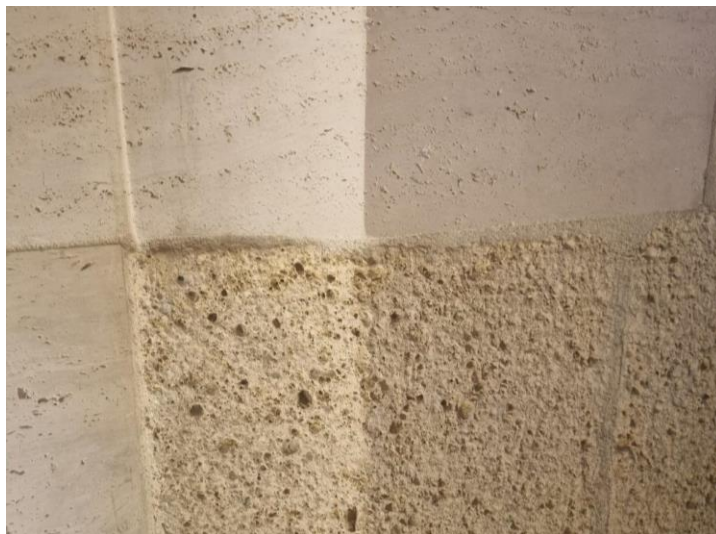
Na slici 1.4. prikazan je pogled na južni toranj katedrale za vrijeme sanacije koja je trajala od 1938. do 1940.



Slika 1.4 Skela na južnom tornju za vrijeme sanacije 1938.-1940.[4]

Obnova katedrale se nastavila 1968. godine kada je obnovljen dio sjevernog tornja, točnije vrha tornja u visini od približno 15 metara. Godine 1974. je glazirani crijep zamijenjen bakrenim limom [3]. Posljednja obnova započela je u prosincu 1990. kada je započeto postavljanje skele na sjeverni toranj. S prvim se radovima krenulo 1993. godine, a obnova je obuhvaćala je i protupotresna ojačanja svih galerija. Zbog same investicije za skelu, Odbor za obnovu katedrale je donio odluku da se dijelovi

galerije, baldahina, kamenih ograda i poda u potpunosti zamjene novim kamenim elementima metodom "tašeliranja" [3]. Od tada se radovi nisu prekidali do danas, a u obnovi se koristi kamen travertin. Na slici 1.5. vidljiva je razlika između starog i obnovljenog kamena na sjevernom tornju.



Slika 1.5 Kamen na sjevernom tornju

1.3. Konstrukcijski sustav

Gotički stil gradnje, kojim je građena katedrala u Zagrebu, odlikuje se zidanom građom, svodovima i lukovima koji oslonjeni na vitke stupove natkrivaju lađe. Visoki uski prozori oslabljuju vanjske zidove, a tornjevi uzrokuju asimetriju mase i krutosti konstrukcije. Kvaliteta materijala s vremenom opada, a prostorna povezanost konstrukcijskih elemenata se dovodi u pitanje. [5] Konstrukcijski sustav katedrale većinski čine elementi namijenjeni prijenosu vertikalnog opterećenja, dok je manji dio kao što su spone i sustav kontrafora namijenjen prijenosu horizontalnog opterećenja. Zidane konstrukcije ne odlikuje zajedničko ponašanje međusobno povezanih elemenata, već zasebno djelovanje nosivih konstruktivnih elemenata. Međudjelovanje se u konstrukciji ostvaruje preko tlačnih sila, dok je prijenos vlačnih sila uvjetovan neznatnom vlačnom čvrstoćom zida [5].

Kritičnim mjestima smatraju se lukovi i svodovi koji se međusobno razupiru, a nisu vezani horizontalnim čeličnim sponama. Na slici 1.6 vidljive su vlačne pukotine na svodu Zagrebačke katedrale nastale nakon Zagrebačkog i Petrinjskog potresa. Razmicanjem ležajeva svoda (npr. zidova) mijenja se "tlačna linija" što dopušta

stvaranje pukotine izazvanih vlačnim naprezanjem. Također, javlja se opasnost da se lučna konstrukcija prilikom potresa ponaša kao sustav sa zglibom koji dopušta “otvaranje” i “zatvaranje” pukotina.

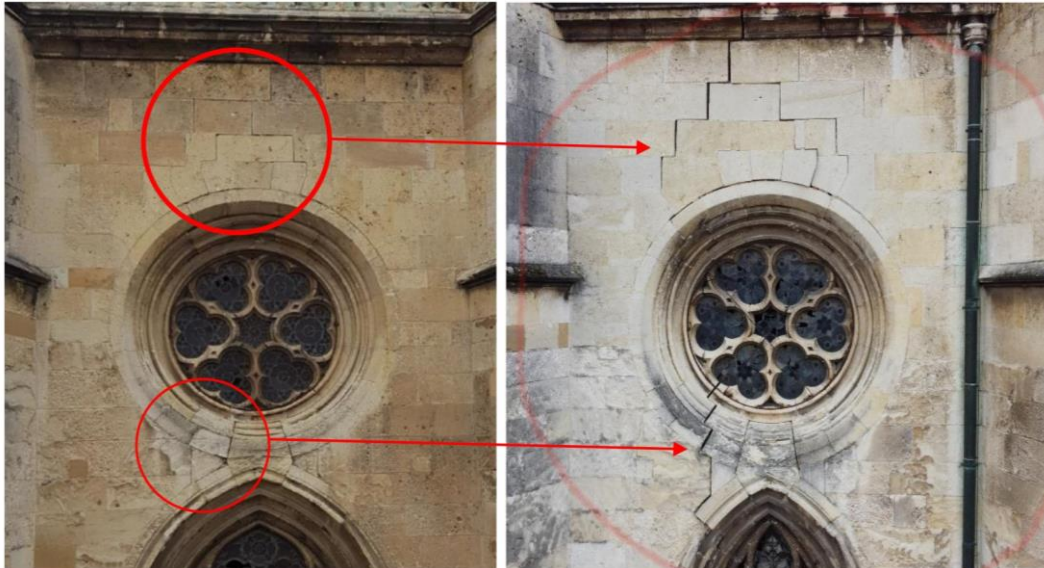


Slika 1.6 Vlačne pukotine u svodu Zagrebačke katedrale

1.4. Zagrebački potres 2020. godine

Gotovo 140 godina nakon velikog potresa iz 1880., 22. ožujka 2020. godine u 6 sati i 24 minute, Zagreb je još jednom pogodio potres. Epicentar mu je bio na Markuševcu, jačine 5,5 po Richteru. Katedralu su zadesila teška oštećenja. Jedna od značajnijih posljedica bio je pad kamenog vrha s južnog tornja. Do loma je došlo na visini od 95 metara te je srušen dio tornja visine 10,3 metara, na čijem se vrhu nalazio i pozlaćeni križ s gromobranom visine 3,2 metra. Obzirom da su kameni elementi dijelom pali na skelu koja je služila za obnovu južnog tornja, oštećen je dio netom dovršene treće galerije koja se nalazi na visini od 66 metara. Dio kamenih elemenata je pao i na krovšte katedrale čime je ono bilo dodatno oštećeno i probijeno. Kontroliranom se eksplozijom 17. travnja 2020. godine uspješno uklonio vrh sjevernog tornja visine 13 metara zbog velikih oštećenja na njemu. Iste te godine, 29. prosinca u 12 sati i 19 minuta Petrinju je zadesio potres magnitude 6,2 po Richteru. Iako je udaljenost epicentra petrinjskog potresa bila približno 60 kilometara jugoistočno od Zagreba, potres je vrlo nepovoljno utjecao na katedralu. Razlog tome je što period potresnih valova raste s udaljenošću od mjesta epicentra te iako je amplituda valova

relativno mala, frekvencija izrazito nepovoljno djeluje na visoke građevine zbog vrijednosti bliske vlastitoj frekvenciji. Zbog navedenog je katedrala zadobila nova oštećenja. Dodatna oštećenja su se javila na cijeloj katedrali, osobito na gornjim dijelovima tornja. Na slici 1.7 prikazana je usporedba pukotina na sjeveroistočnoj strani apsida nakon potresa u Zagrebu i nakon potresa u Petrinji gdje je jasno vidljiva propagacija oštećenja [6].



Slika 1.7 Propagacija pukotina uzrokovanih potresom [6]

Oštećenja nije zadobila samo katedrala već i postojeća skela na južnom tornju, slika 1.8. Odlomljeni kameni elementi s tornjeva pali su na skelu, pri čemu je srušen dio njezine konstrukcije. Zbog narušene stabilnosti i dotrajalosti postojeće konstrukcije skele te složenosti budućih radova pri obnovi istu je bilo potrebno ukloniti te zamijeniti novom.

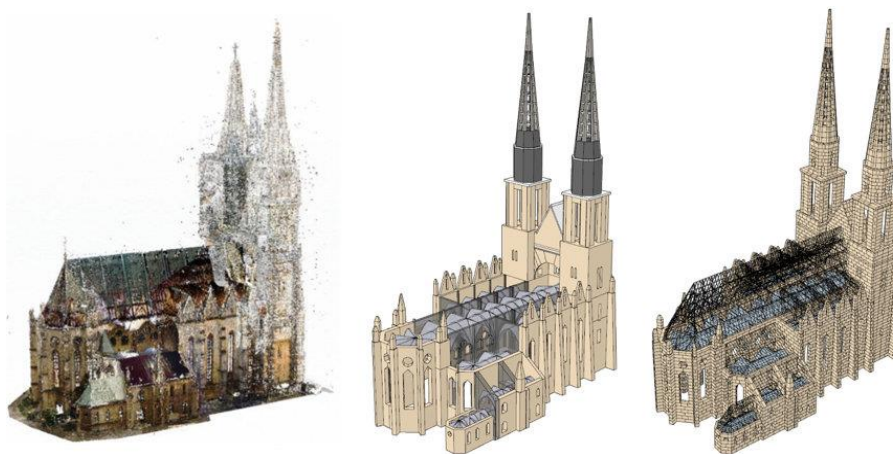


Slika 1.8 Oštećenje skele tornja nakon potresa

1.5. Konstrukcijska obnova katedrale nakon potresa 2020. godine

Obnova Zagrebačke katedrale, monumentalnih dimenzija, tradicijske gradnje i velikog kulturnog značenja, predstavlja zahtjevan inženjerski pothvat. Otpornost katedrale dodatno je, uz sva prethodna oštećenja, oslabljena nakon potresa iz 2020. godine. Obnovom se zahtijeva značajna otpornost na potres što predstavlja zahtjevan projektantski zadatak.

Zbog oštećenja tornjeva i brojnih pukotina u svodovima, katedrala je nakon potresa bila nesigurna za korištenje. Prvobitni cilj je bio dovesti katedralu pod kontrolu provedbom urgentnih mjera kako bi se naknadno mogle provesti predviđene aktivnosti rekonstrukcije pod vodstvom Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u suradnji sa nekoliko građevinskih firmi i brojnim stručnjacima. Neizbježno je spomenuti i prisutnost nadležnih konzervatora. [6]

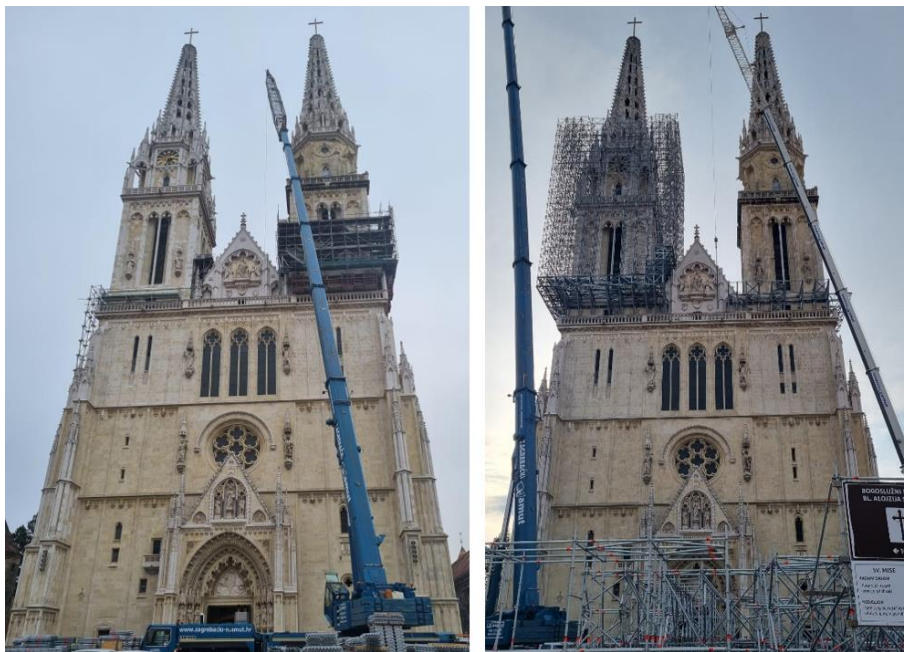


Slika 1.9 Računalni modeli Zagrebačke katedrale [6]

Zbog brojnih nepoznanica morali su se obaviti opsežni istražni radovi, a s aktivnostima se krenulo u studenome 2021. Na Građevinskom fakultetu u Zagrebu izrađen je 'Elaborat istražnih radova' i 'Elaborat mjerenja dinamičkih svojstava konstrukcije Katedrale'. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu bio je zadužen za detaljnu fotogrametrijsku snimku katedrale zbog manjkavosti arhitektonskih podloga. Stručnjaci sa Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu su obavili laboratorijske fizičko-kemijske analize kamena. Seizmološki podaci su omogućeni nakon izvršenih geotehničkih mjerenja te su provedena preliminarna istraživanja konstrukcije krovišta sačinjene od drveta [6]. Istražni radovi rezultirali su brojnim

podlogama neophodnim za izradu projekata obnove Zagrebačke katedrale kao što su model oblaka točaka, slika 1.9. lijevo, i BIM računalni modeli, slika 1.9. sredina i desno.

Na temelju prethodnih istraživanja izrađeni su brojni projekti među kojima se nalaze *Urgentni glavni (i izvedbeni) građevinski projekt nosive čelične skele na zapadnoj strani katedrale* kojim je dano rješenje izvedbi čeličnih skela na tornjevima Zagrebačke katedrale. Zbog iznimne složenosti problema izvedbe navedenih skela, morala su se primijeniti brojna nestandardna rješenja kako bi se zadovoljili svi relevantni zahtjevi prilikom projektiranja. Jedno od tih rješenja je i nestandardni detalj stope za oslanjanje skele na čeličnu konstrukciju platforme na razini prve galerije katedrale. Cilj ovog rada je eksperimentalno i numerički proučiti ponašanje navedenog nestandardnog detalja stope skele koji je primijenjen na projektu nosivih čeličnih skela za obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale. Na slici 1.10. lijevo prikazana je fotografija Zagrebačke katedrale u studenom 2022 godine u fazi demontaže skele koja se koristila za obnovu južnog tornja. Na slici 1.10. desno prikazano je zapadno pročelje u travnju 2023. godine u fazi montaže nove čelične skele za provedbu radova rekonstrukcije tornjeva katedrale.



Slika 1.10 Zagrebačka katedrala u studenom 2022 (lijevo) i travnju 2023. (desno)

2. NOVA SKELA ZA OBNOVU ZAGREBAČKE KATEDRALE

2.1. Općenito o skelama

Skela je privremena pomoćna konstrukcija koja je najčešće izrađena od čeličnih ili aluminijskih dijelova u kombinaciji s drvetom. Projektirana je za višestruku primjenu na gradilištima visokogradnje i niskogradnje. Skela predstavlja rješenje problema pristupa građevinama na velikim visinama i/ili nepristupačnom terenu te je kao takva neizostavan dio gotovo svakog građevinskog projekta. [7] Na slici 2.1. primjer je upotrebe skele na apsidi Zagrebačke katedrale.



Slika 2.1 Skela na apsidi Zagrebačke katedrale

Prednosti korištenja skele su omogućavanje rada na visini, jednostavna i relativno brza montaža i demontaža te mogućnost korištenja više puta na različitim gradilištima, što doprinosi njenoj ekonomičnosti. Međutim, rad na visini zahtjeva poštivanje posebnih zahtjeva za manipuliranje skelom i rad na njoj. Pogreške pri radu na skeli mogu uzrokovati pad materijala, alata, opreme pa čak i ozbiljne ozljede samih radnika pri padu. Upravo iz toga razloga zaštita na radu daje vrlo jasne sigurnosne upute za postavljanje skele i rad na njoj. [8, 9]

2.1.1. Podjela skela

Skele se mogu podijeliti s obzirom na više različitih kriterija, od kojih su u nastavku navedeni najčešći.

2.1.1.1. Podjela prema materijalu

Drvene skele nazivaju se i klasičnim ili tradicijskim skelama, budući da je drvo bilo temeljni građevni materijal kroz povijest. Primjenjuju se i danas, a drvo korišteno za njihovu izgradnju su uglavnom četinjače [7]. Primjer primjene drvene skele je privremena potporna konstrukcija postavljena u crkvi sv. Nikole i Vida u Žažini, prikazana na slici 2.2.



Slika 2.2 Drvena potporna skela u crkvi sv. Nikole i Vida u Žažini

Čelične skele češće nailaze na primjenu nego drvene skele zbog veće izdržljivosti i ekonomičnosti. Iako je sam materijal u usporedbi s drvom skuplji, čelične skele dugovječnije su od drvenih, a samim time dugoročno isplativije zbog mogućnosti višestrukog korištenja. Pri izradi čeličnih skela najčešće se koriste čelične uzdužno zavarene cijevi. Dodatna zaštita površine od korozije se u pravilu ostvaruje vrućim pocinčavanjem. Čelične cijevne skele se dijele u tri podgrupe: lagane cijevne skele, teške čelične skele i toranjske skele. [7]

Lagane cijevne skele izrađuju se od čeličnih cijevi vanjskog promjera od 48,3 mm, a duljine su standardizirane, raspona od 1,5 m do 6 m. Montaža je jednostavna jer se spojnicama može pričvrstiti bilo gdje na cijevi bez prethodnog obrađivanja. [7]

Teške čelične skele također su izrađene od okruglih cijevnih profila, ali promjera većeg od 48,3 mm. Time je osigurana veća nosivost pa se ovakve skele koriste za preuzimanje velikih opterećenja. Mogu se izvoditi s pojedinačnim stupovima ili kombinacijom stupova koja omogućava dodatno povećanje nosivosti. Primjenjuju se pri gradnji mostova i težih stropnih konstrukcija [7].

Toranjske skele se koriste kao nosive skele za preuzimanje vertikalnog opterećenja. Sastoje se od svega četiri elementa: nogara tj. ležajeva, osnovnog okvira, složivog okvira i dijagonala. Sastavljeni tornjevi se dizalicom mogu premješati na željene pozicije.

Betonske skele izrađuju se od armiranog ili prednapetog betona te su najčešće sastavljene od montažnih elemenata. Primjenjuju se u specijalnim slučajevima, često samo kao glavni dijelovi skele, dok je ostatak skele izrađen od čelika ili drva. [7].

2.1.1.2. Podjela prema namjeni:

Nosive skele su skele koje preuzimaju opterećenje od konstrukcije za koju su izgrađene te vlastitu težinu konstrukcije i dodatna opterećenja prenose na tlo, odnosno čvrstu podlogu. Nosive skele mogu podupirati dio ili cijelu konstrukciju sve do trenutka kad ona ne bude sposobna sama nositi vlastitu težinu i eventualna dodatna opterećenja.

Radne (pomoćne) skele su skele čija osnovna funkcija nije nosivost, već prijenos materijala pri gradnji konstrukcije, kretanje radnika te manipulacija građevinskog alata i opreme. Od nosivih skela se razlikuju po vrsti i veličini opterećenja koje mogu prenijeti.

Zaštitne skele koriste se u slučajevima kad je potrebno zaštititi ljude, prometnicu ili općenito prostor oko gradilišta od mogućih oštećenja uslijed rada gradilišta. Omogućuju nesmetano izvođenje radova uz primjerenu zaštitu okoline. [7]

2.1.1.3. Podjela prema načinu sastavljanja

Prema načinu sastavljanja skele se mogu podijeliti na klasične (standardne) i modularne. [10]

Elementi klasične skele povezuju se spojnicama koje mogu biti postavljene proizvoljno, neovisno o međusobnoj udaljenosti. Takav način sastavljanja omogućuje lakšu prilagodbu geometrije skele, budući da spojevi elemenata nisu fiksni, ali zahtijeva više vremena za montažu i demontažu skele. [11]

Modularna skela je sistemska skela na kojoj se nalaze predgotovljeni čvorovi koji služe za pričvršćivanje ostalih elemenata skele. Elementi modularnih skela se zavisno o sustavu skele nalaze na unaprijed određenim udaljenostima (moduli). [10] Moduli tvore osnovne jedinice geometrije skele koje se međusobno nadograđuju jedna na drugu. Montiranje i demontiranje modularne skele znatno je brže od klasične, a predgotovljeni čvorovi omogućuju veću sigurnost i efikasnost pri spajanju elemenata što rezultira većom nosivošću te visinom skele [12]. Najvažniji aspekti montiranja modularne skele su niveliranje i uporaba pravilno izvedenih elemenata u kojima nema odstupanja od propisanih dimenzija.

2.1.2. Dijelovi skele

Najčešće korišten tip skele je lagana čelična cijevna skela čiji su osnovni dijelovi stupovi, stope, uzdužne i poprečne prečke, podnice, vertikalne i horizontalne dijagonale i spojnice [13] Stupovi s prečkama tvore okvire skele, dok dodatne prečke na propisanoj visini čine sigurnosne ograde, što je prikazano na slici 2.3.

Stupovi skele su vertikalni cijevni elementi koji prenose opterećenje s vrha skele na stope na tlu ili čvrstoj podlozi, a na njih se spajaju uzdužne i poprečne prečke [7, 13]. Dijagonale su elementi koji dodatno stabiliziraju strukturu skele na horizontalna djelovanja. U jedno polje može se postaviti jedna ili više dijagonala, idealno pod kutom od 45 stupnjeva. Njihovim umetanjem se nestabilan oblik četverokuta pretvara u trokutnu formu koja je stabilna u svojoj ravnini. [14]



Slika 2.3 Dijelovi lagane cijevne skele

Spojnice su elementi koji omogućuju međusobno povezivanje elemenata skele. Prema načinu spajanja, ovisno radi li se o modularnoj ili klasičnoj skeli, razlikuje se više tipova spojnica. Klasične skele se u pravilu spajaju krutim ili okretnim spojnica (žabicama). Modularne skele imaju posebne sustave spojeva kao što su nastavci s trnovima ili umetcima koji se koriste samo za štapove u tlaku te nastavci za štapove u vlaku i tlaku [7]. Na modularnim skelama najčešće su korištene rozete na koje se klinovima može spojiti određen broj horizontalnih i dijagonalnih elemenata. Na slici 2.4. prikaz je spajanja horizontalnog elementa uz pomoć klina i rozete.



Slika 2.4 Rozeta s klinovima

Stopa skele je element koji prenosi opterećenje sa stupova te ga preko podložne ploče distribuira na veću površinu. Ispod stope skele se u pravilu umeću podloške od drvenih mosnica minimalne debljine 5 cm da se ostvari bolje nalijeganje na podlogu. Primjena drvenih mosnica kao podložaka stope skele prikaza je na slici 2.5.

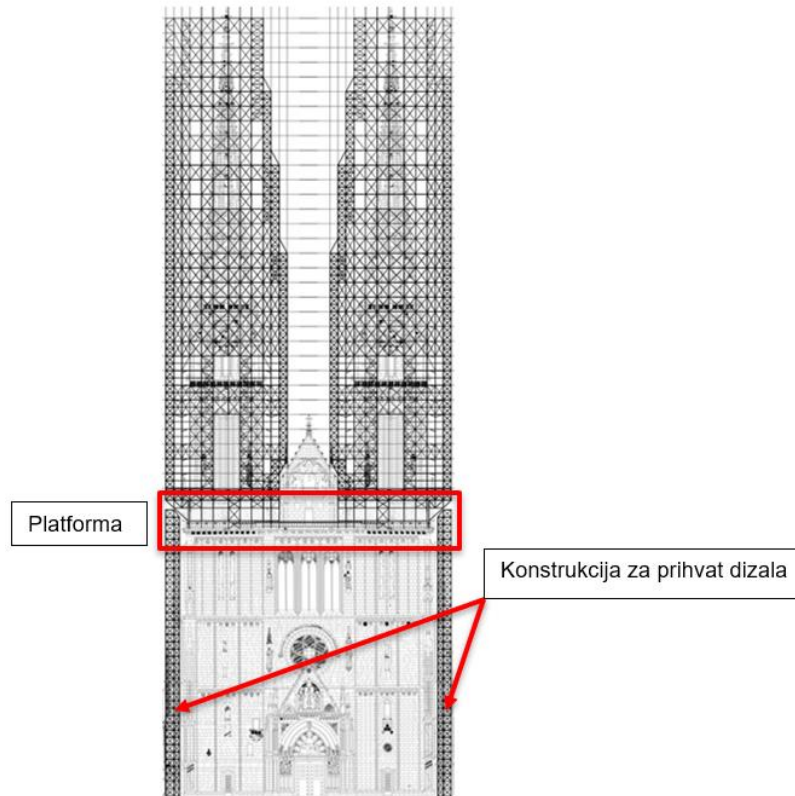


Slika 2.5 Stopa skele na drvenoj mosnici

2.2. Nova skela za obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale

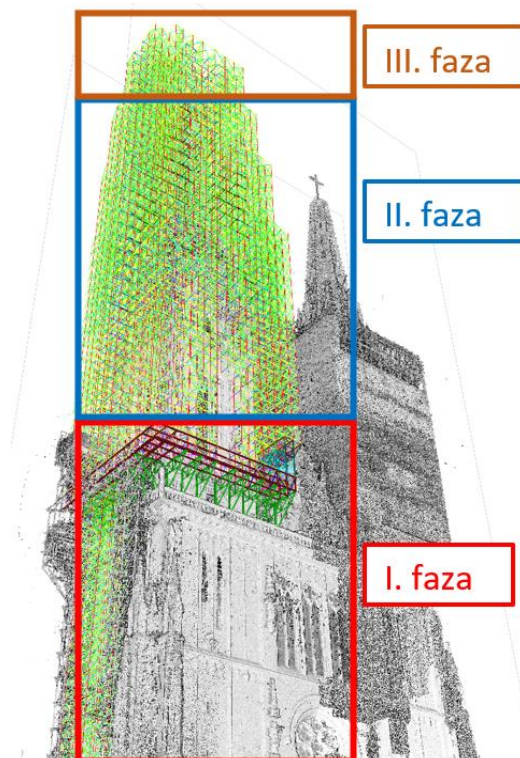
2.2.1. Koncept konstrukcije skele i faze izgradnje

Za svrhe obnove tornjeva Zagrebačke katedrale odabrana je višesmjerna modularna lagana cijevna skela. Projektom su predviđene dvije neovisne višesmjerne modularne skele te platforme za oslanjanje skela na razini prve galerije katedrale koja se nalazi na visini od 37 metara, odnosno u podnožju tornjeva [14]. Statički sustav skele je prostorna rešetka s ojačanjem u rubnom prstenu kojeg čine dodatni horizontalni elementi s pripadajućim vertikalama u polovici visine etaže. Uz ojačanja rubnog prstena, skela ima i predviđene otvore na zapadnoj strani čija je namjena izvođenja radova rekonstrukcije tornjeva. Na slici 2.6. su prikazane rešetkaste konstrukcije skela za rekonstrukciju tornjeva katedrale zajedno s platformom za oslanjanje skele te skelarskom konstrukcijom za prihvat dizala.



Slika 2.6 Prikaz neovisnih konstrukcija skele

Izvedba i postavljanje skele je predviđena u tri faze. Na slici 2.7. su prikazane predviđene faze postavljanja skele iz tehničkog opisa projekta [14]:



Slika 2.7 Faze izvedbe skele za zapadnoj strani katedrale

1. faza: Obuhvaća izgradnju čelične platforme, slika 2.8., na visinskoj koti od +36,75 m do kote +42,00 m na koju će se oslanjati nova modularna skela te postavljanje konstrukcije za prihvat dizala od razine tla ($\pm 0,00$ m) do kote +39,20 m skupa s dizalom i njegovom podkonstrukcijom. Konstrukcija za prihvat dizala se izvodi od elemenata modularne skele. Dizalo služi za vertikalnu komunikaciju ljudi i opreme, a predviđeno je da se montira od razine tla do vrha nove modularne skele, te se izvodi paralelno s konstrukcijom skele.



Slika 2.8 Platforma za oslanjanje skele na zapadnoj strani katedrale

2. faza: Obuhvaća postavljanje nove skele od čelične platforme (+42,00 m) do sadašnje visine tornja (+96,20 m). Tokom sukcesivne montaže, skela se horizontalno pridržava na tornjeve katedrale preko skelarskih cijevi CHS 76.1x5 na visinama +48,20 m, +50,20 m, +52,20 m, +54,20 m, +58,20 m, +60,20 m, +62,20 m, +64,20 m i +66,20 m.

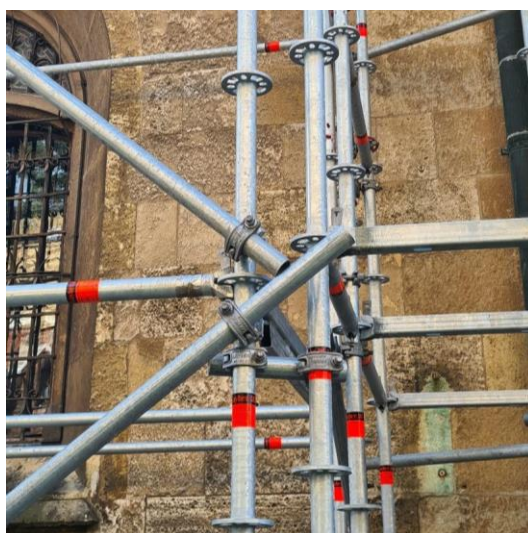
3. faza: Slijedi nakon rekonstrukcije i ojačanja tornjeva katedrale. Skela se nastavlja na postojeću konstrukciju iz II. faze, odnosno od +96,20 m do vrha novog ojačanog tornja na visini +106,20 m.

Moduli skele su odabrani na način da maksimalno prate geometriju tornja, odnosno da podnice radnih platformi budu uz fasadu tornja. Na pojedinim mjestima koriste se konzolne istake i lokalne konstrukcije unutar osnovne modularne skele, kako bi se ostvario bolji pristup fasadi tornja.

Modularnu skelu sačinjavaju vertikalne standardizirane fasadne cijevi profila 48.3x2.9 s rozetom na svakih 500 mm gdje se pričvršćuju prečke i dijagonale. Dakle,

rozeta zajedno sa čeličnim pločicama postavljenim na vertikalama, na koje se spajaju svi horizontalni elementi svakih 1000 mm i vertikalne dijagonale čine spojni materijal modula skele.

Prednost korištenja ovakvog tipa skele je u mogućnosti ubrzane montaže uz korištenje posebnih konstruktivnih klinova i blokirajućih rješenja za pričvršćivanje elemenata na rozetu, slika 2.9. Ekscentricitet u čvorovima je unaprijed poznat i definiran. Obzirom da se ne koriste vijčana spojna sredstva montaža je brža, a dugotrajna upotreba skele je osigurana sa pocinčanosti svih elemenata. Zbog standardnog promjera skele od 48,3 mm omogućena su dodatna povezivanja sa skelarskim cijevima i standardiziranim spojnica drugog tipa.



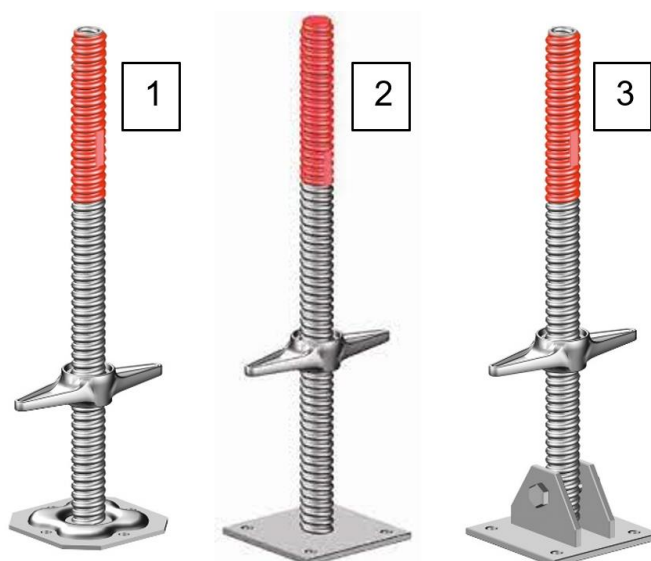
Slika 2.9 Detalj spajanja skele

2.2.2. Stope skele

Budući da su skele najčešće modularne konstrukcije, odnosno sastavljene su od elemenata standardiziranih dimenzija, njihova visina rijetko kad točno odgovara visini građevine ili visini samog stropa. Razlika u visini se do određene granice može nadoknaditi podešavanjem visine stope skele [15]. Međutim, pri prevelikim produljenjima dolazi do problema stabilnosti skele, zbog čega je potrebno poštovati specifikacije dane od strane proizvođača. Na slici 2.10. crvenom bojom su označena područja na koja se stopa ne smije podesiti.

Debljina i oblik podložne ploče također uvjetuju stabilnost i nosivost stope, pa samim time i skele. Postoje različiti tipovi podložnih ploča čija se nosivost na vanjska

opterećenja može značajno razlikovati, a neki su prikazani sa slici 2.10. Klasične ploče (detalj 1) imaju udubljenja i izbočenja koja optimiziraju utrošak materijala i nosivost stope. Pune ploče izvedene su od ravnih čeličnih limova konstantne debljine dok kod zakretne stope postoje dodatni elementi koji omogućuju kontrolu nagiba stope [16].



Slika 2.10 Primjeri vrsta stopa skele [16]

Za potrebe izgradnje skela na zapadnoj strani Zagrebačke katedrale, postojeći standardni detalji stopa skele nisu bili zadovoljavajući zbog specifičnosti problematike oslanjanja skele. Stope s klasičnim podložnim pločama nisu mogle osigurati zadovoljavajuću nosivost zbog prevelikih oslonačkih reakcija stupova skele velikih gabarita. Stope skele s ravnim podložnim pločama su imale zadovoljavajuću nosivost, ali se zbog svoje geometrije se nisu mogle spojiti na pojaseve čelične konstrukcije platforme za oslanjanje skele. Naime, širina podložne ploče i rupa za vijke je bila prevelika u odnosu na elemente pojaseva čelične platforme. Posljedično je napravljena modificirana verzija stope koja zadovoljava zahtjeve dane na konstrukciju skele (vidi točku 2.2.2.2.). U ovom radu će se ispitati dvije verzije stopa: standardna verzija s punom podložnom pločicom i nestandardna modificirana verzija korištena kod izvedbe skele za obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale.

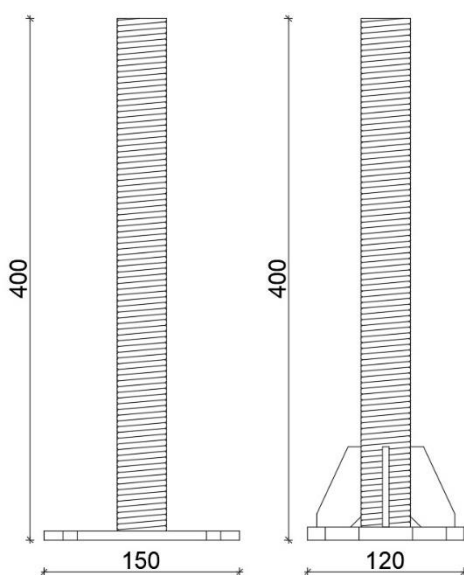
2.2.2.1. Standardna verzija stope

Standardna verzija detalja stope skele, slika 2.11. lijevo, sastoji se od punog vretena zavarenog na kvadratnu podložnu ploču dimenzija 150x150 mm debljine 8 mm. Podložna ploča ima četiri unaprijed probušene rupe za vijke promjera 11 mm na

osnom razmaku 110 mm. Na podložnoj pločici se nalazi industrijski zavareno vruće valjano čelično vreteno s navojima za podešavanje visine oslanjanja stupova skele. Promjer vretena na najširem dijelu iznosi 38,0 mm, a na najužem 32,0 mm. Standardizirani detalj stope je već ispitan od strane proizvođača te su mu nosivosti propisane u katalogu proizvoda. Ipak, radi usporedbe ponašanja standardnih i nestandardnih detalja stopa skela ispitanih u istim uvjetima i pod istim režimom opterećenja (vidi točku 5.3.2.), uz nestandardne detalje će se ispitati i ponašanje standardnih detalja stope skele opisanih u ovoj točki. Geometrijska svojstva standardnog detalja stope skele su prikazana u točki 5.2.2.

2.2.2.2. Nestandardna verzija stope

Zbog velikih oštećenja, odnosno male ili neznatne nosivosti postojećeg zida na tornjevima katedrale nije moguće sidrenje skele po visini građevine. To nas dovodi do konzolnog statičkog sustava skele te dodatnih opterećenja na podnožje skele kao što je moment savijanja od ekscentriciteta tlačne sile i poprečnih sila uslijed horizontalnih djelovanja. Posljedično se javio problem da standardni elementi skele, kao što je stopa skele, ne zadovoljavaju proračun na opterećenja koja se predviđaju za vrijeme eksploatacije. Obzirom da je riječ o povijesnoj građevini s elementima nepravilne geometrije dodatni zahtjev je posebna prilagodba oblika skele kako bi se što više približili postojećoj geometriji građevine.



Slika 2.11 Skica standardnog i nestandardnog detalja stope

Zbog navedenog, na standardnoj verziji detalja stope bilo je nužno napraviti određene modifikacije, slika 2.11. desno, u cilju zadovoljavanja posebnih uvjeta projekta. Dimenzija podložne ploče je smanjena na 120x120 mm kako bi odgovarala širini HEA profila na platformi oko tornjeva, a debljina je povećana te iznosi 10 mm. Na ploči se nalaze četiri rupe za vijke izduženog oblika, čija je najveća dimenzija u uzdužnom smjeru 26 mm i 13 mm u poprečnom, tako da se položaj stopa može pozicijski prilagoditi na licu mjesta prilikom montaže. Četiri ukrute širine 5 mm i visine 60 mm su zavarene na ploču i navojnu cijev kako bi se smanjio utjecaj savijanja uslijed velikog opterećenja vjetrom na konzolni dio toranjske skele. Za izradu nestandardnog detalja stope skele korišteno je šuplje vreteno dimenzije 38x8,1 mm. Detaljniji prikaz geometrijskih karakteristika nestandardnog detalja stope skele prikazan je u točki 5.2.2.

3. CILJ I HIPOTEZA RADA

Relativno nedavno su područje Zagreba i Petrinje zadesila dva velika potresa koji su uzrokovali značajna oštećenja velikog broja postojećih građevina pa tako i građevina kulturne baštine kao što je Zagrebačka katedrala. Posljedično se već planiraju ili provode urgentne, konstrukcijske ili cjelovite mjere obnove. Provođenje urgentnih mjera za osiguranje konstrukcije katedrale je započelo neposredno nakon Zagrebačkog potresa, a nedugo potom i radovi vezani uz rekonstrukciju i ojačanje konstrukcije katedrale. Za provođenje navedenih radova je neophodno korištenje privremenih konstrukcija skela. Zbog složenosti i jedinstvenosti svakog projekata obnove i uvjeta sanacije javljaju se brojni nestandardni izazovi kao što je bilo oslanjanje skele za obnovu tornjeva. Zbog velikih horizontalnih reakcija stupova skela te činjenice da se skele ne oslanjaju na tlo već na čeličnu konstrukciju, bilo je potrebno osmisliti nestandardni detalj stope skele. Od ožujka 2023. godine je započela montaža skela na zapadnoj strani katedrale korištenjem spomenutih nestandardnih detalja stope skele. Rješavanje detalja oslanjanja skele je izuzetno bitno jer stopa skele uvelike uvjetuje stabilnost i sigurnost ostatka konstrukcije. Iako je projektom analitički i numerički potvrđena mehanička otpornost i stabilnost takvog detalja oslanjanja, ona nije laboratorijski ispitana.

Cilj ovog rada je numerički i eksperimentalno okarakterizirati ponašanje nestandardnog detalja oslanjanja stope skele primijenjenog na skeli za obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale. Radi usporedbe, ispitat će se i standardni uzorak detalja stope skele uzet iz kataloga proizvođača. Važnost predloženog istraživanja proizlazi iz činjenice da razvijeni nestandardni detalj oslanjanja skele nije vezan samo uz projekt skele za obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale već se može koristiti i u budućim projektima.

Na temelju preliminarnog proučavanja ponašanja standardnog i nestandardnog detalja oslanjanja skele, mogu se donijeti sljedeće hipoteze:

- Otkazivanje uzoraka nestandardnog detalja stope skele će se dogoditi zbog plastifikacije poprečnog presjeka vretena na mjestu neposredno iznad ukruta;
- Otkazivanje uzoraka standardnog detalja stope skele će se dogoditi zbog plastifikacije poprečnog presjeka vretena na mjestu zavarenog spoja ili zbog otkazivanja zavara;

- Oba detalja će pružiti dovoljnu rotacijsku sposobnost te neće doći do naglog otkazivanja zavara niti vijaka;
- Standardni detalj oslanjanja će imati veću otpornost na savijanje zbog veće kvalitete čelika od kojeg je vreteno izvedeno te povoljnijih geometrijskih svojstava njegovog poprečnog presjeka;
- Unos uzdužne tlačne sile će reducirati otpornost detalja stope na savijanje dok će unos uzdužne vlačna sila reducirati.

4. PROCJENA OTPORNOSTI DETALJA STOPE SKELE

Cilj ovog poglavlja je analitički i numerički procijeniti otpornost stope skele u uvjetima opterećenja koji odgovaraju postavkama laboratorijskog ispitivanja te donijeti opće zaključke o otpornosti stope skele. Analitički proračun je proveden prema važećim normama HRN EN 1993-1-1 [17] i HRN EN 1993-1-8 [18]. Analitički dobivena otpornost na savijanje uslijed djelovanja poprečne sile usvojena je kao vrijednost djelovanja u numeričkom modelu.

4.1. Ulazni podaci

Poprečna sila se unosi na udaljenosti od 230 mm mjereno od donjeg ruba podložne ploče, što odgovara mjestu unosa opterećenja u laboratorijskim uvjetima. Poprečna sila stvara moment savijanja koji linearno raste do vrha ukruta, duž vretena, od mjesta unosa opterećenja. Na dijelu vretena koje je ukruženo rebrima nije moguće *a priori* odrediti raspodjelu momenta savijanja, već će se ona dodatno razmotriti u numeričkom modelu.

Vijci:

M12, klasa 10.9

$f_{ub} = 1000$ MPa - nazivna vrijednost vlačne čvrstoće vijka

$f_{yb} = 900$ MPa - nazivna vrijednost granice popuštanja vijka

$f_u = 490$ MPa- čvrstoća podložne ploče

$A_s = 84,3$ mm² - vlačno naprezana ploština vijka

$k_2 = 0,9$

$\gamma_{M2} = 1,25$ - parcijalni koeficijent sigurnosti za priključke

$\alpha_v = 0,50$ - faktor redukcije za vijke klase 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9

$d_0 = 13$ mm - promjer rupe vijka

$d = 12$ mm - promjer vijka

$t = 10$ mm - debljina podložne ploče

$d_m = 19$ mm - udaljenost nasuprotnih točaka i nasuprotnih stranica glave vijka ili matice

$a = 3$ mm - debljina zavora

Šuplje vreteno:

$f_y = 235 \text{ MPa}$ - granica popuštanja čelika

$\gamma_{M0} = 1,0$ - parcijalni faktor za otpornost poprečnog presjeka

$d = 35 \text{ mm}$ - vanjski promjer vretena

$t = 5,10 \text{ mm}$ - debljina stijenke vretena

$W_{pl} = 4,60 \text{ cm}^3$ - plastični moment otpora

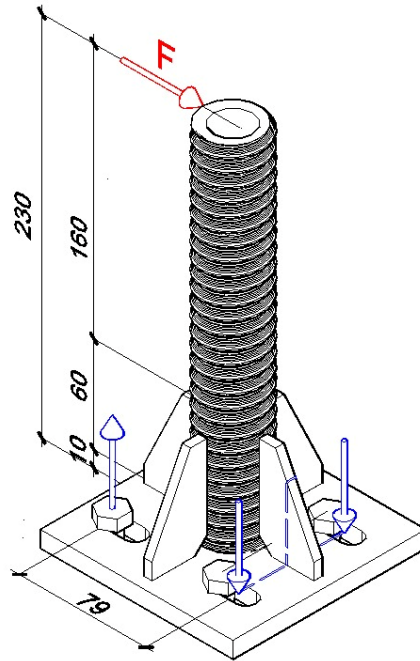
$A = 4,79 \text{ cm}^2$ - površina poprečnog presjeka

4.2. Analitička procjena otpornosti

Analitička procjena otpornosti provedena je za vijke i zavare prema HRN EN 1993-1-8 [18] te za vreteno prema HRN EN 1993-1-1 [17]. Proračunate su otpornosti vijaka na uzdužnu silu $F_{t,Rd}$ i posmičnu silu $F_{v,Rd}$ te njihovu interakciju, zatim otpornost na pritisak po omotaču rupe $F_{b,Rd}$ i posmična otpornost pri probodu $F_{p,Rd}$. Također, proračunata je i otpornost zavara $F_{w,Rd}$. Na razini poprečnog presjeka je proveden proračun otpornosti vretena na moment savijanja $M_{C,Rd}$ i poprečnu silu $V_{pl,Rd}$.

4.2.1. Proračun otpornosti vijaka

U proračunu se pretpostavlja preuzimanje djelovanja momenta savijanja spregom sila koji djeluje na kraku od 79 mm. Spreg čine rezultanta vlačne sile koja djeluje u smjeru uzdužne osi vijaka u vlačnoj zoni i rezultanta tlačne sile za koju se pretpostavlja djelovanje u ravnini polovice širine ukrute u tlačnoj zoni podložne ploče, prikazano na slici 4.1. Iz ravnoteže sila i momenata dobivene su reakcijske sile na vijcima u funkciji poprečne sile F koje se koriste pri procjeni otpornosti na interakcijsko djelovanje uzdužne i posmične sile.



Slika 4.1 Shematski prikaz opterećenja stope skele

4.2.1.1. Proračun otpornosti vijaka na uzdužnu silu

Prema tablici 3.4. iz EN 1993-1-8, proračun otpornosti na uzdužnu silu se računa kao:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 100 \text{ kN/cm}^2 \cdot 0,843 \text{ cm}^2}{1,25} = 60,7 \text{ kN}$$

Otpornost jednog vijaka na uzdužnu silu je 60,7 kN.

4.2.1.2. Proračun otpornosti vijaka na posmik

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,50 \cdot 100 \text{ kN/cm}^2 \cdot 0,843 \text{ cm}^2}{1,25} = 33,7 \text{ kN}$$

Otpornost jednog vijaka na posmik je 33,7 kN.

4.2.1.3. Interakcija uzdužne sile i posmika

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

Gdje su:

$F_{v,Ed}$ – poprečna sila djelovanja

$F_{t,Ed}$ – uzdužna sila djelovanja

$F_{v,Rd}$ – otpornost vijaka na posmik

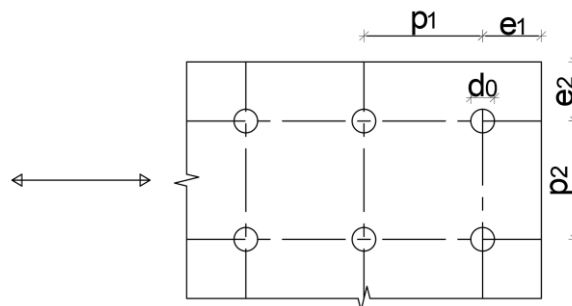
$F_{t,Rd}$ – otpornost vijaka na uzdužnu silu

4.2.1.4. Otpornost na pritisak po omotaču rupe

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$k_1 = \min(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 1.4 \cdot \frac{p_2}{3d_0} - 1.7, 2.5)$ - faktor za rubne vijke

Na slici 4.2. prikazane su odgovarajuće oznake za udaljenosti vijaka korištene pri određivanju koeficijenta k_1 . Udaljenost središta rupe vijka od ruba ploče u smjeru prijenosa opterećenja je označena s e_1 , odnosno e_2 u smjeru okomito na prijenos opterećenja. Analogno, udaljenosti između osi vijaka su označene s oznakama p_1 u smjeru prijenosa opterećenja i p_2 u okomitom smjeru. Promjer rupe vijka je označen s d_0 .



Slika 4.2 Oznake za udaljenosti vijaka

$e_1 = 33 \text{ mm}$

$e_2 = 25 \text{ mm}$

$p_1 = p_2 = \infty$...zbog ukruta na detalju stope

$d_0 = 13 \text{ mm}$

$$\rightarrow 2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 = 2.8 \cdot \frac{2.5}{1.3} - 1.7 = 3.68$$

$$\rightarrow 1.4 \cdot \frac{p_2}{3d_0} - 1.7 = 1.4 \cdot \frac{\infty}{3 \cdot 1.3} - 1.7 ; \text{ nije primjenjivo}$$

$$\rightarrow 2.5$$

Odabrano: $k_1 = 2.5$

α_b -faktor redukcije ; $\min(\frac{e_1}{3d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0)$

$$\rightarrow \frac{e_1}{3d_0} = \frac{3,3}{3 \cdot 1,3} = 0,85$$

$$\rightarrow \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{100}{49} = 2,04$$

$$\rightarrow 1,0$$

Odabrano: $\alpha_b = 0,85$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,85 \cdot 49 \cdot 1,2 \cdot 1}{1,25} = 100 \text{ kN}$$

Otpornost jednog vijka na pritisak po omotaču rupe je 100 kN.

4.2.1.5. Posmična otpornost pri probodu

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 1,9 \cdot 1 \cdot 49}{1,25} = 140 \text{ kN}$$

Posmična otpornost pri probodu jednog vijka iznosi 140 kN.

4.2.2. Otpornost zavara

- $L = 8 \cdot 26 + 38 \cdot 3,14 = 327 \text{ mm}$ - pretpostavljena duljina zavara
- $\beta_w = 0,90$ - faktor korelacije za čelik S355
- $a = 3 \text{ mm}$ - debljina zavara

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w} \cdot a \cdot \frac{L}{\gamma_{M2}}$$

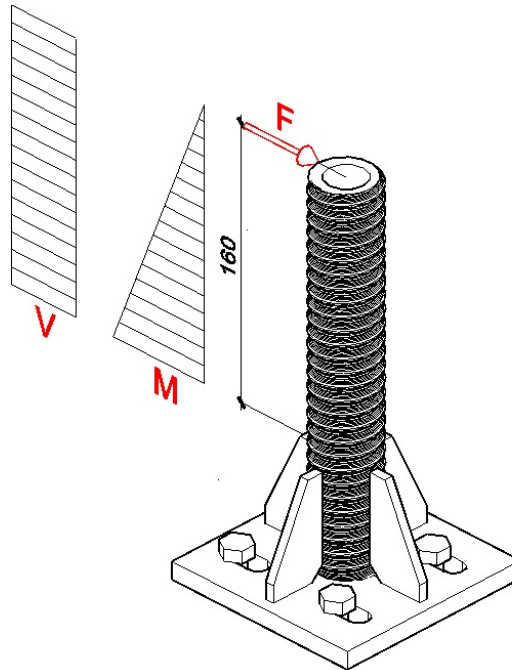
$$F_{w,Rd} = \frac{49}{\sqrt{3} \cdot 0,9} \cdot 0,3 \cdot \frac{32,7}{1,25} = 247 \text{ kN}$$

Otpornost zavara je 247 kN.

4.2.3. Proračun otpornosti vretena

4.2.3.1. Proračun otpornosti poprečnog presjeka šupljeg vretena na savijanje

U proračunu otpornosti presjeka šupljeg vretena na moment savijanja uzeta je vrijednost plastičnog momenta otpora W_{pl} od $3,26 \text{ cm}^3$ iz kataloga proizvođača. Na slici 4.3. je prikazana shema opterećenja vretena Duljina kraka sile za moment savijanja je uzeta od mjesta unosa opterećenja do vrha ukruta, za koje se pretpostavlja da djeluju kao pridržanje. Udaljenost od vrha ukruta do mjesta unosa opterećenja iznosi 160 mm.



Slika 4.3 Shematski prikaz opterećenja šupljeg vretena i poprečnog presjeka zamjenskog elementa

Klasifikacija cijevnog poprečnog presjeka (čelik S235)

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1$$

Uvjet za klasu 1 poprečnog presjeka:

$$d/t = 38/8,2 = 4,69 \leq 50 \cdot \varepsilon^2 = 50 \cdot 1^2 = 50$$

→ Poprečni presjek spada u klasu 1.

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{C,Rd} = M_{Pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{C,Rd} = \frac{3,26 \cdot 23,5}{1,0} = 76,6 \text{ kNcm}$$

Otpornost poprečnog presjeka vretena na moment savijanja je 0,77 Nm.

Na kraku djelovanja sile od 160 mm, otpornost poprečnog presjeka na uneseno horizontalno opterećenje iznosi:

$$F_{Rd} = \frac{0,77}{0,16} = 4,81 \text{ kN}$$

Otpornost poprečnog presjeka na posmik

$V_{pl,Rd}$ – proračunska plastična otpornost poprečnog presjeka na posmik

A_v – posmična površina poprečnog presjeka

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

$$A = \frac{3,8^2 \pi}{4} - \frac{2,18^2 \pi}{4} = 7,61 \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2A / \pi = 2 \cdot 7,61 / \pi = 4,84 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{4,84 \cdot (23,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 65,7 \text{ kN}$$

Otpornost poprečnog presjeka vretena na posmičnu silu je 65,7 kN.

4.2.3.2. Proračun otpornosti poprečnog presjeka punog vretena na savijanje

U proračunu otpornosti presjeka punog vretena na moment savijanja također je uzeta vrijednost plastičnog momenta otpora W_{pl} od $4,79 \text{ cm}^3$ iz kataloga proizvođača. Duljina kraka sile za moment savijanja punog vretena je uzeta od mjesta unosa opterećenja gornjeg ruba podložne ploče, odnosno 223 mm.

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje (S355)

$$M_{C,Rd} = M_{Pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{C,Rd} = \frac{4,79 \cdot 35,5}{1,0} = 170 \text{ kNcm}$$

Otpornost poprečnog presjeka vretena na savijanje je 1,7 kNm.

Na kraku djelovanja sile od 223 mm, otpornost poprečnog presjeka na uneseno horizontalno opterećenje iznosi:

$$F_{Rd} = \frac{1,7}{0,223} = 7,63 \text{ kN}$$

Otpornost poprečnog presjeka na posmik

$V_{pl,Rd}$ – proračunska plastična otpornost poprečnog presjeka na posmik

A_v – posmična površina poprečnog presjeka

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

$$A = \frac{3,8^2 \pi}{4} = 11,3 \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2A / \pi = 2 \cdot 11,3 / \pi = 7,19 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{7,19 \cdot (35,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 147 \text{ kN}$$

Otpornost poprečnog presjeka vretena na posmičnu silu je 147 kN.

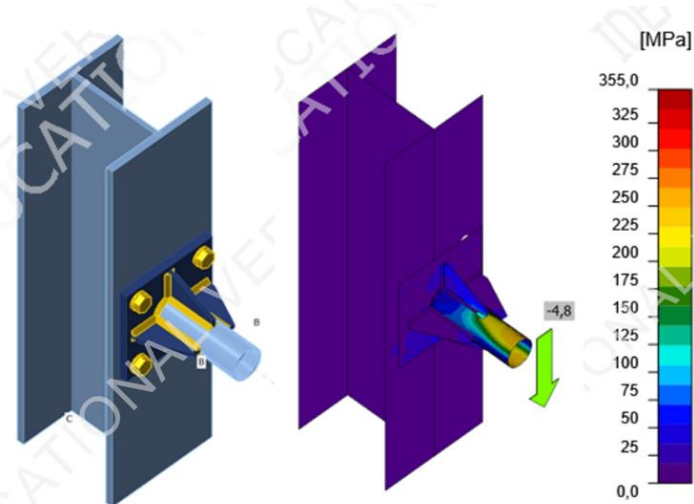
4.2.4. Zaključci analitičke procjene otpornosti

Razmatranjem mogućih načina otkazivanja je zaključeno da će, za razmatrano opterećenje i zadanu geometriju, mjerodavan način otkazivanja biti plastifikacija poprečnog presjeka šupljeg i punog vretena uslijed savijanja. Za nominalne vrijednosti karakteristika čelika od kojeg je šuplje vreteno izvedeno (S235), otpornost poprečnog presjeka vretena na savijanje iznosi 0,77 kNm. Na kraku djelovanja opterećenja od 160 mm, izračunata je proračunska otpornost nestandardnog detalja stope na horizontalna djelovanja iznosa 4,81 kN. Otpornost poprečnog presjeka vretena standardnog detalja stope skele na savijanje iznosi 1,7 kNm. Takav proračunati moment djeluje na kraku od 223 mm, što znači da je otpornost na horizontalna djelovanja standardnog detalja stope skele 7,63 kN.

4.3. Numerička procjena otpornosti

4.3.1. IDEA StatiCa

Preliminarna procjena otpornosti nestandardnog detalja stope skele provedena je u računalnom paketu IDEA StatiCa. Model je napravljen prema nominalnim dimenzijama iz točke 5.2.2. uz pojednostavljenu geometriju vretena za koje je uzeta efektivna vrijednost poprečnog presjeka od 38x3,78 mm. Materijal od kojeg je modelirano vreteno je čelik kvalitete S235, dok su ostali elementi modelirani od čelika kvalitete S355. Uneseno opterećenje je preuzeto iz analitičkog proračuna otpornosti poprečnog presjeka na savijanje (točka 4.2.3.1.). Poprečna sila nanesena na detalj stope u modelu jednaka je 4,81 kN te na kraku od 160 mm stvara moment savijanja na vretenu od 0,77 kNm jednak prethodno proračunatoj otpornosti. Na slici 4.4. je prikaz modela nestandardnog uzorka stope prije analize te modela s pripadnim naprezanjima nakon završetka simulacije.



Slika 4.4 FEM model IDEA SatiCa

Rezultati analize pokazuju doseganje kritičnih naprezanja na vretenu neposredno iznad ukrute, dok se naprezanja u preostalim elementima još uvijek nalaze u granicama elastičnih napona. Ova analiza ide u prilog pretpostavci da će do otkazivanja nestandardnih uzoraka stope skele doći zbog plastifikacije vretena na području iznad ukruta. Ponašanja uzorka stope skele pod utjecajem savijanja detaljnije će se istražiti u nastavku laboratorijskim i numeričkim ispitivanjem.

5. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA PONAŠANJA DETALJA STOPE SKELE

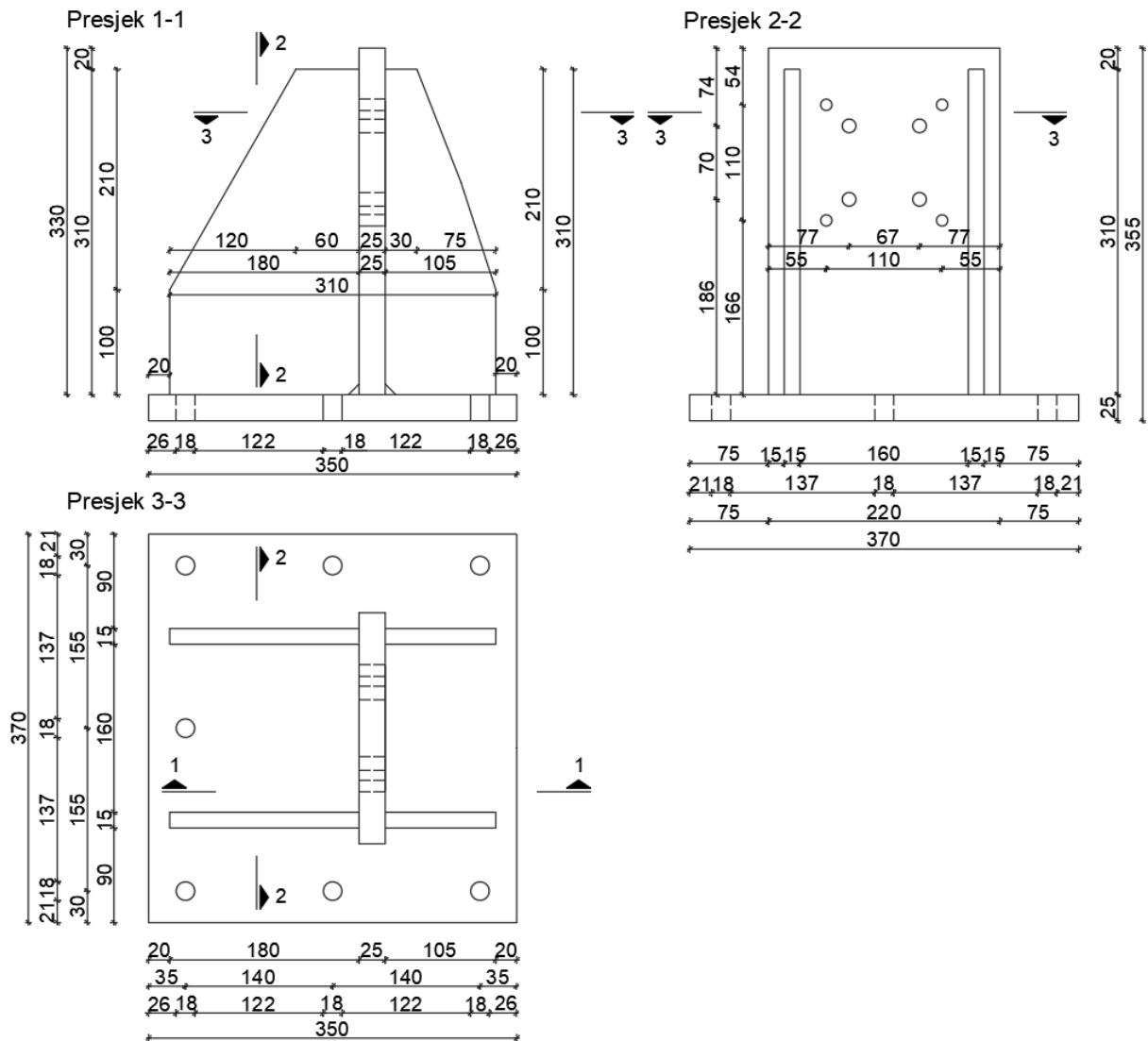
5.1. Opseg i ciljevi laboratorijskog ispitivanja

Cilj laboratorijskih ispitivanja je određivanje ponašanja nestandardnog detalja stope skele izloženog savijanju. U realnoj situaciji je stopa skele opterećena istodobnom djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja koji se javlja zbog unosa poprečnih sila na kontaktu sa stupom skele. Međutim, zbog jednostavnosti provođenja laboratorijskih ispitivanja, uzorci stopa će se ispitati isključivo na djelovanje savijanja, a utjecaj uzdužne sile će se istražiti numerički. Ispitivanje se provodi na dvije grupe po tri uzorka čime je ukupno ispitano šest uzoraka. Grupa uzoraka S označava standardne uzorke detalja stope skele, dok NS označava nestandardne uzorke.

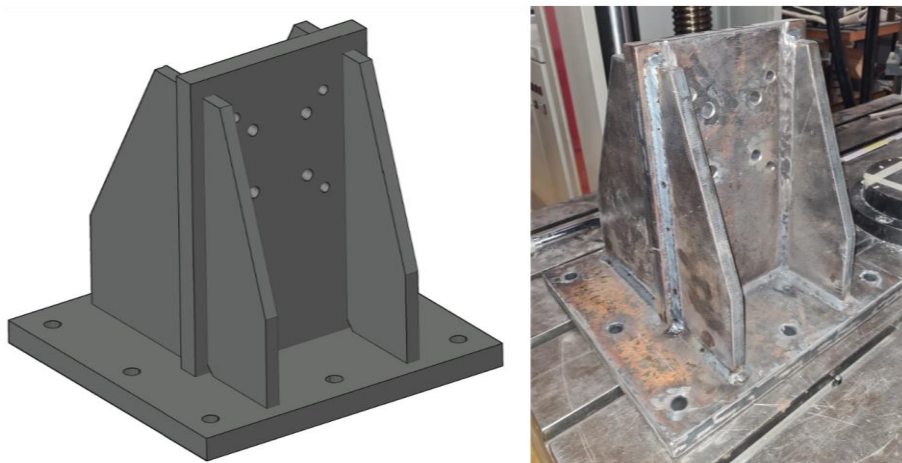
5.2. Opis programa laboratorijskog ispitivanja detalja stope

5.2.1. Postav ispitivanja

Za potrebe ispitivanja izveden je adapter koji služi kao nepomična baza na koju se s odgovarajućim vijcima horizontalno pričvršćuje stopa skele. Materijal od kojeg je izrađen je čelik kvalitete S235 Adapter je pomoću 8 M16 vijaka fiksiran za postolje preše te se može smatrati upetim i nedeformabilnim. Sastoji se od dviju zavarenih, međusobno okomitih čeličnih ploča dimenzija 370x350 mm i 250x310 mm debljina 30 mm koje su ojačane s dva para čeličnih ukruta debljina 15 mm. Na vertikalnoj ploči adaptera su izvedene rupe za vijke odgovarajućih dimenzija i takvog položaja da se može koristiti za montiranje obje skupine uzoraka stopa - standardnu i nestandardnu. Vanjske rupe su promjera 12 mm i na osnov udaljenosti 110 mm, a odgovaraju dimenzijama za standardne uzorke. Unutarnje rupe su promjera 14 mm te na osnov udaljenosti 67 mm, odnosno 70 mm, a odgovaraju dimenzijama nestandardnih uzoraka stope. Na slici 5.1. prikazane su dimenzije adaptera, a na slici 5.2. 3D model i stvarno izvedeni element.

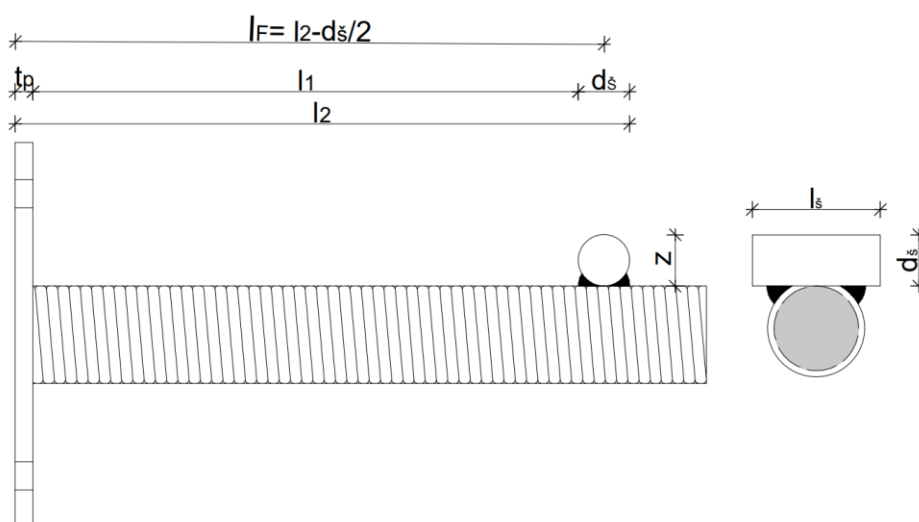


Slika 5.1 Nacrt adaptera za ispitivanje stopa skele



Slika 5.2 Adapter stopa skele

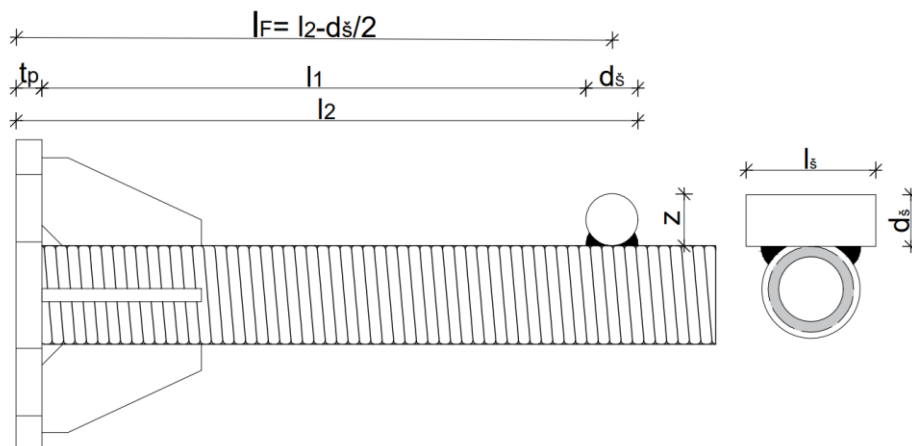
Za ispravno provođenje ispitivanja je, među ostalim, nužno osigurati prikladan unos opterećenja. Opterećenje se s glave preše mora unositi na ravnu i očišćenu površinu kako prilikom ispitivanja ne bi dolazilo do neželjenih proklizavanja ili koncentracija naprezanja. Geometrija vretena onemogućava ispravan unos opterećenja direktno s glave preše na vreteno jer bi neravna površina vretena uzrokovala neželjene skokove u dijagramu opterećenje-pomak. Iz tog razloga su na uzorcima na prethodno pripremljenu površinu naknadno zavarene čelične šipke promjera 20 mm i dužine 50 mm koje omogućuju ravnomjeran unos opterećenja s preše na uzorke. Šipke su zavarene na visini 230 mm, mjereno od donjeg lica podložne ploče. Na slikama 5.3. i 5.4. prikaz je položaja šipke na vretenu za standardni i nestandardni uzorak, a izmjerene dimenzije su dane u tablici 5.1. i 5.2.



Slika 5.3 Nacrt standardne stope prilagođene ispitivanju

Tablica 5.1 Izmjerene vrijednosti za unos opterećenja standardnog detalja

UZORAK	ŠIPKA ZA PRIJENOS OPTEREĆENJA				
	l_2	d_s	z	l_s	l_F
S1	241,90	20,13	20,94	50,61	231,84
S2	241,80	20,10	20,87	50,80	231,75
S3	242,95	20,32	20,47	50,39	232,79
Srednja vrijednost mjerenja	242,22	20,18	20,76	50,60	232,13

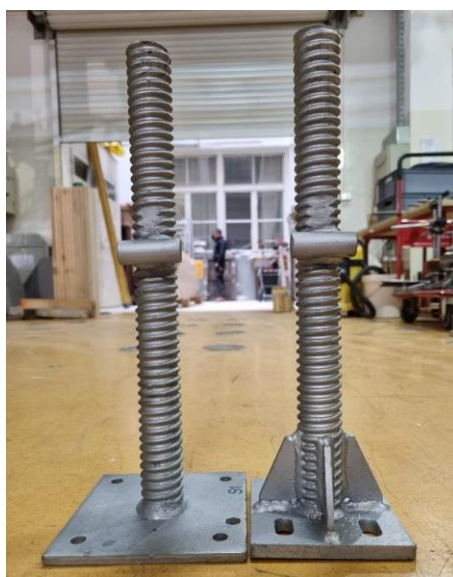


Slika 5.4 Nacrt nestandardne stope prilagođene ispitivanju

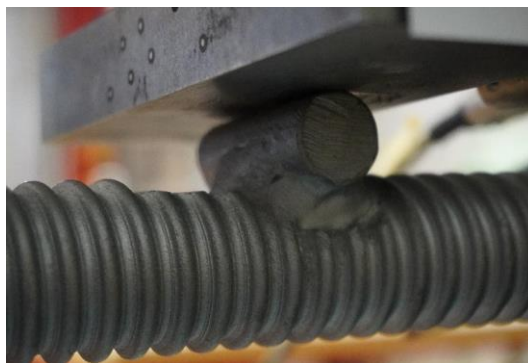
Tablica 5.2 Izmjerene vrijednosti za unos opterećenja nestandardnog detalja

UZORAK	ŠIPKA ZA PRIJENOS OPTEREĆENJA				
	l_2	d_s	z	l_s	l_F
Nestandardni					
NS1	240,78	19,96	20,27	49,97	230,81
NS2	241,48	20,07	19,33	50,51	231,45
NS3	240,38	20,04	20,27	51,09	230,36
Srednja vrijednost mjerenja	240,88	20,02	19,95	50,52	230,87

Detalji standardne (lijevo) i nestandardne (desno) stope s izvedenom šipkom za prijenos opterećenja prikazani na slici 5.5. dok je mjesto unosa opterećenja prikazano je na slici 5.6.

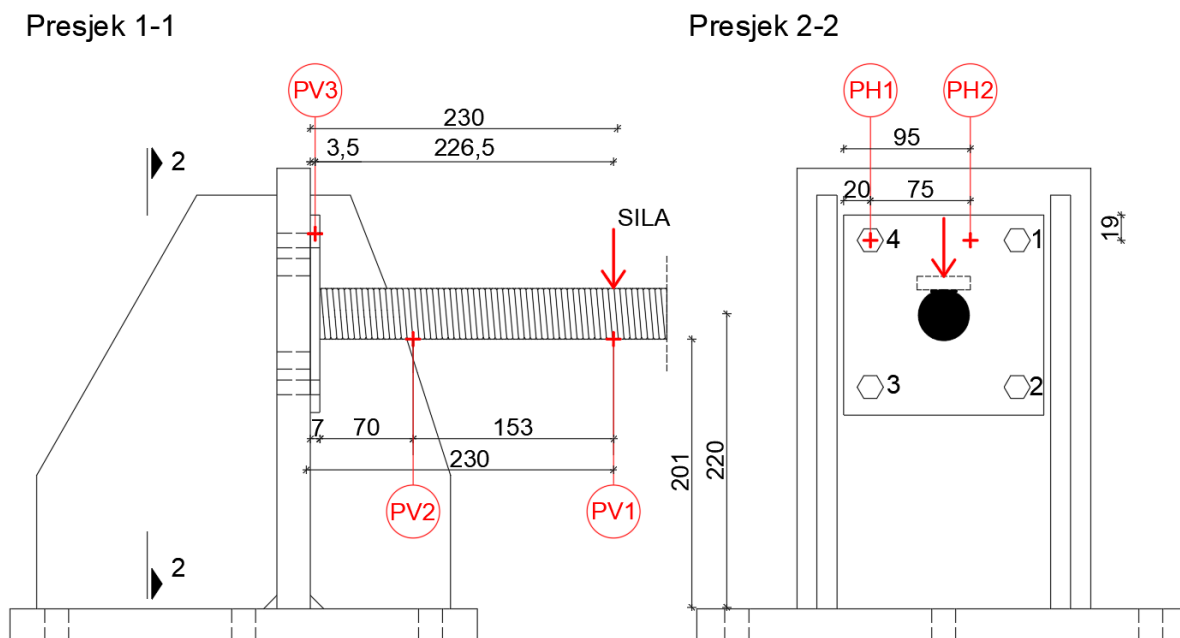


Slika 5.5 Uzorak detalja S (lijevo) i NS (desno) stope skele

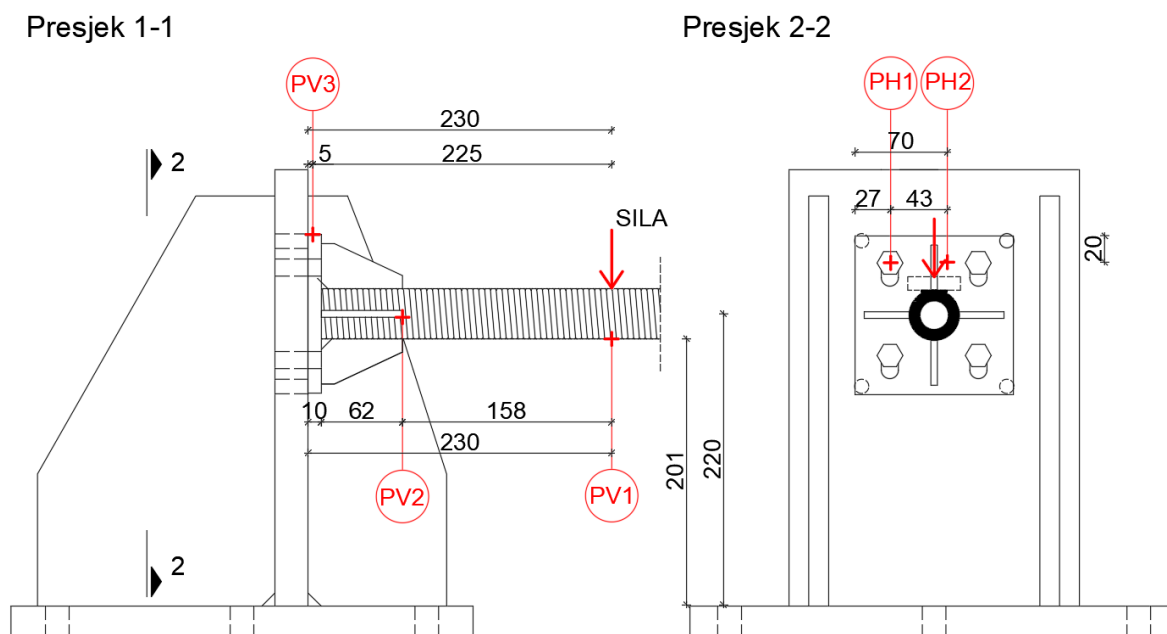


Slika 5.6 Mjesto unosa opterećenja

Za mjerenje pomaka prilikom ispitivanja uzoraka korišteno je pet linearno promjenjivih diferencijalnih transformatora (LVDT uređaja). Navedeni uređaji oslanjaju se na mjesta gdje se planira mjeriti pomak, a tijelo im se fiksira na odgovarajući stalak. Pomaci se mogu mjeriti u rasponu od nekoliko nanometara do nekoliko centimetara, granice pogreške iznose $\pm 0,5\%$, a linearnost uređaja iznosi $\pm 0,5\%$ [19]. LVDT uređaji su postavljeni na uzorke stope prema shemi prikazanoj na slici 5.7.a) za standardni uzorak i 5.7.b) za nestandardni uzorak detalja stope skele



a) Shema LVDT uređaja za ispitivanje standardne stope



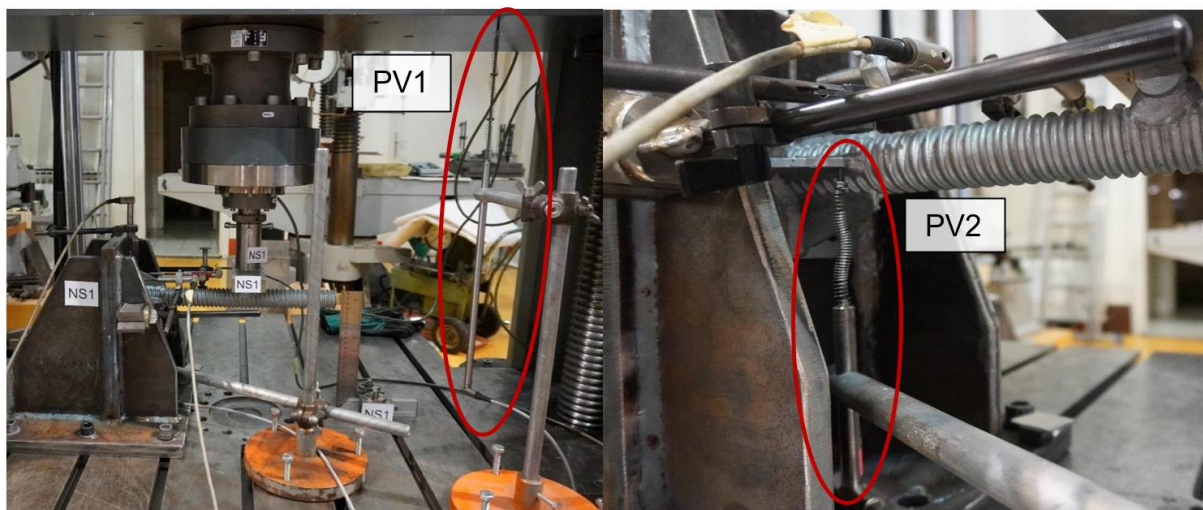
b) Shema LVDT uređaja za ispitivanje nestandardne stope

Slika 5.7 Shema položaja postavljenih mjernih uređaja

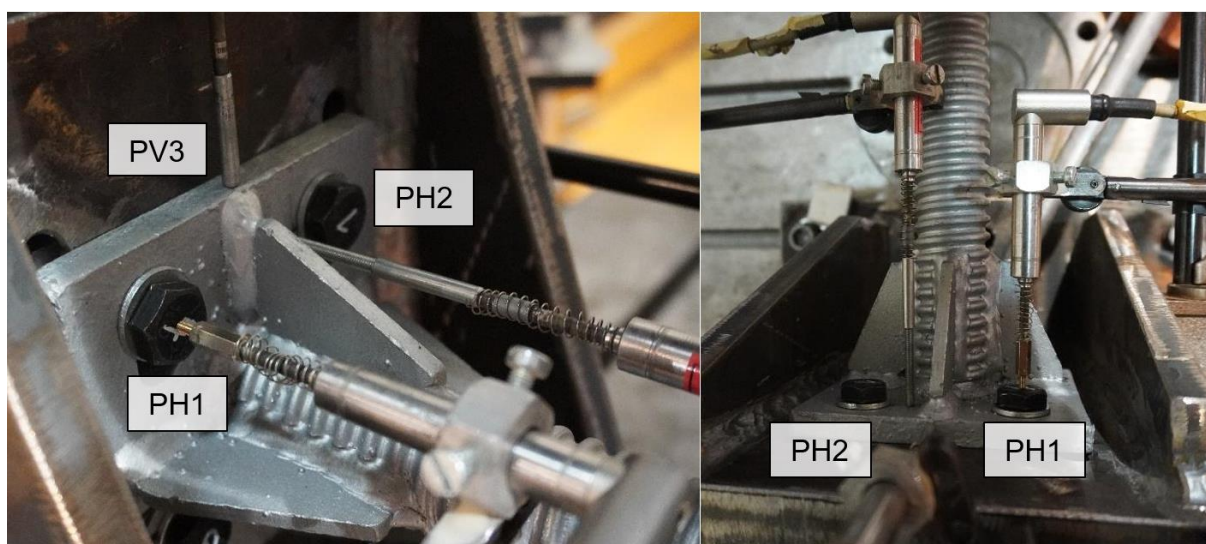
Tri LVDT uređaja s oznakama PV1, PV2 i PV3 mjere vertikalne pomake. Uređaj s oznakom PV1 mjeri pomak preše koji je jednak pomaku vretena direktno ispod mjesta unosa opterećenja, PV2 mjeri pomak punog vretena na udaljenosti od 70 mm od gornjeg ruba pločice za standardni uzorak detalja stope skele, odnosno pomak vrha ukrute za nestandardni uzorak detalja stope skele, a PV3 mjeri vertikalni pomak same pločice na polovici njene širine. Horizontalne pomake mjere dva LVDT uređaja s oznakama PH1 i PH2. Uređaj PH1 je postavljena na sredinu glave vijka na poziciji 4, a bilježi deformaciju vijka prilikom nanošenja opterećenja. Uređaj PH2 je postavljen na gornju plohu podložnog lima iznad vretena, a bilježi deformacije lima prilikom provođenja ispitivanja. Pojedini LVDT uređaji postavljeni na uzorke prikazani su u nastavku na slikama 5.8. i 5.9., a u tablici 5.3. popis je svih LVDT uređaja s pripadnim pozicijama.

Tablica 5.3 Popis mjernih LVDT uređaja s pripadnom pozicijom

MJERNI UREĐAJ	POZICIJA
LVDT1	PV1
LVDT2	PV2
LVDT3	PV3
LVDT4	PH1
LVDT5	PH2



Slika 5.8 Postavke ispitivanja



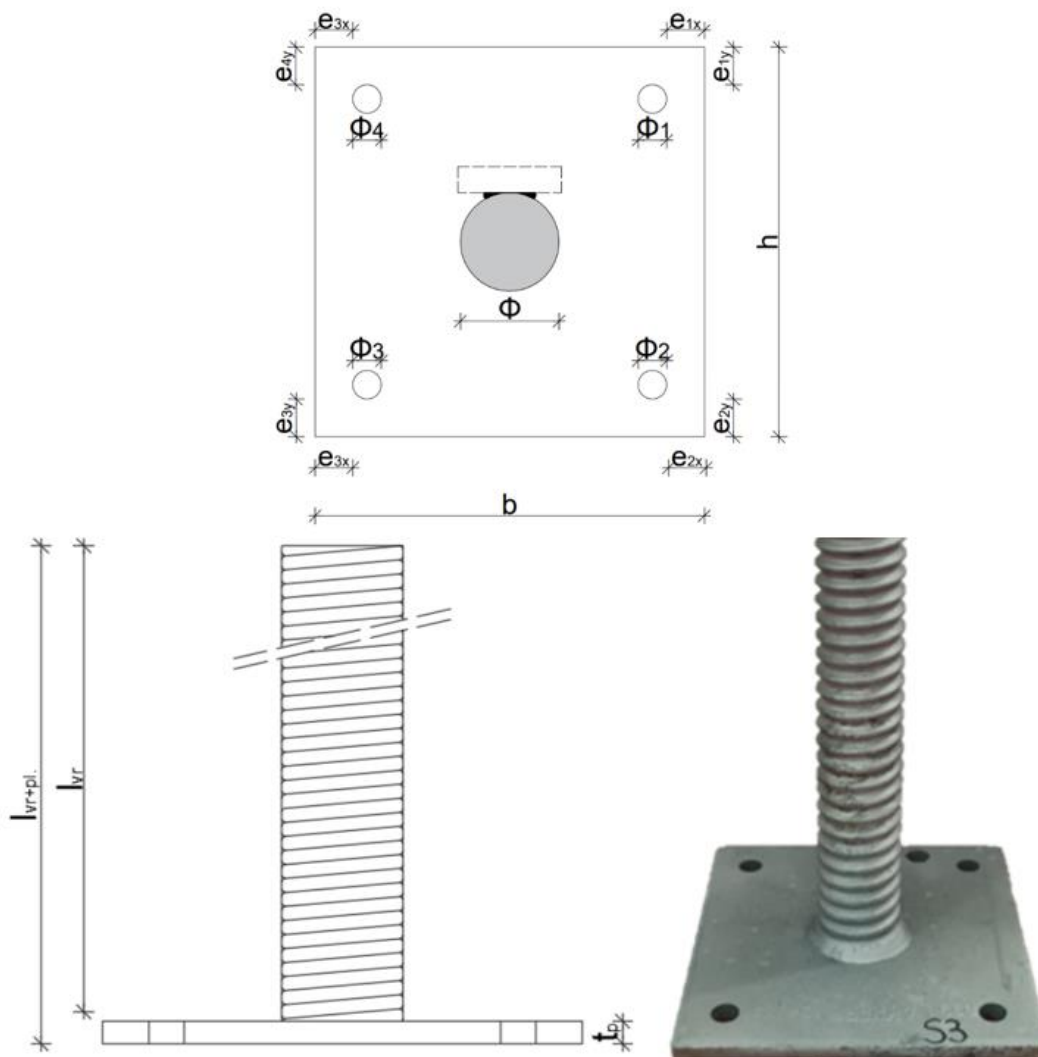
Slika 5.9 Prikaz LVDT uređaja na mjestima PV3, PH1 i PH2

5.2.2. Geometrijske karakteristike uzoraka

Sva mjerenja geometrijskih karakteristika uzoraka koja se spominju u radu izvršena su pomoću digitalnog pomičnog mjerila Mitutoyo CD-20DCX za dimenzije do 20 cm, a one dimenzije veće od 20 cm s mehaničkim pomičnim mjerilom.

Uzorci standardnih detalja stope S ukupne su visine 400 mm te se sastoje od punog vretena promjera 38 mm te kvadratne ploče dimenzija 150x150 i debljine 8 mm. Navoji na vretenu su izvedeni pod kutom od 6,6 stupnjeva. Najveći promjer vretena iznosi 38 mm, dok je najmanji 32 mm. Navedene dimenzije označavaju nominalne vrijednosti te je prilikom mjerenja utvrđeno da se javljaju određena odstupanja. Dobivene srednje vrijednosti triju mjerenja pojedinačnih uzoraka standardnog detalja

stope skele s izračunom srednje vrijednosti svih mjerenja prikazane su u tablici 5.4. i 5.5. dok je na slici 5.10. prikaz korištenih oznaka Materijal korišten za izradu S uzoraka je čelik kvalitete S355.



Slika 5.10 Standardni detalj stope skele

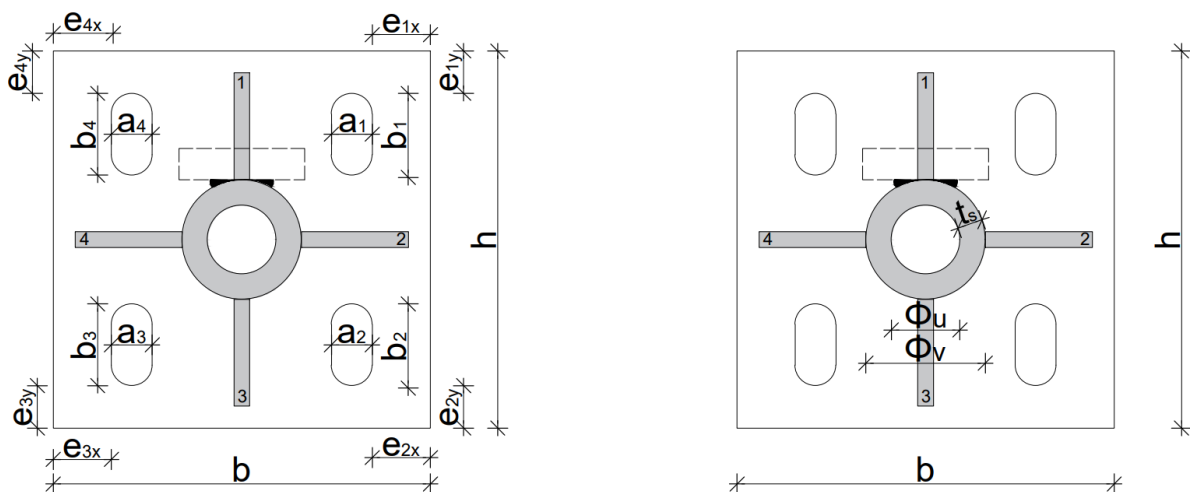
Tablica 5.4 Izmjerene vrijednosti dimenzija standardnog detalja

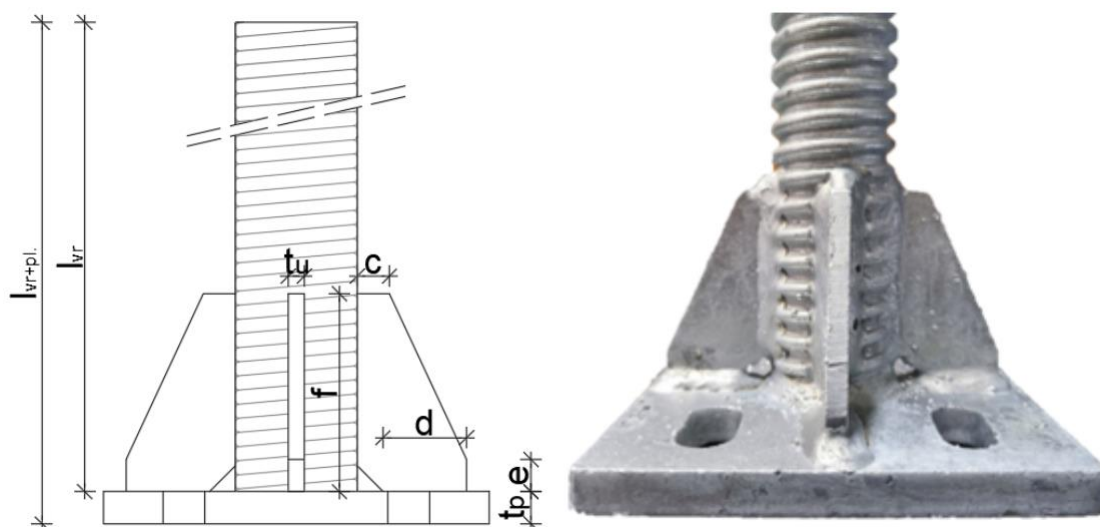
UZORAK	PLOČICA			RUPE ZA VIJKE		
	b	h	t_p	Φ_r	e_x	e_y
Standardni						
S1	150,19	150,42	8,2367	11,354	14,3	14,374
S2	150,36	150,32	8,2467	11,539	14,451	14,412
S3	150,31	150,34	8,28	11,581	14,418	14,539
Srednja vrijednost	150,29	150,36	8,2544	11,491	14,389	14,442

Tablica 5.5 Izmjerene vrijednosti dimenzija standardnog detalja

UZORAK	PUNO VRETENO		
	Φ_s	l_{vr+pl}	l_{vr}
S1	37,883	402,19	393,96
S2	38,043	401,72	393,47
S3	38,06	402,49	394,21
Srednja vrijednost	37,996	402,14	393,88

Uzorci nestandardnih detalja stope NS ukupne su visine 400 mm te se sastoje od šupljeg vretena vanjskog promjera 38 mm i stijenke debljine 8 mm te kvadratne pločice dimenzija 120x120 i debljine 10 mm. Dodatna modifikacija u odnosu na standardnu stopu su četiri ukrute, visine 62 mm i debljine 5 mm koje su zavarene duž kontakta s vretenom i podložnom pločom. Na uzorcima koji su ispitani nije prije zavarivanja izvedena priprema površine, odnosno brušenje navoja te su ukrute direktno zavarene na vreteno. Geometrija uzoraka je prikazana na slici 5.11. te su izmjerene dimenzije navedene u tablicama 5.6.-5.8. Mjerenjem su također utvrđena određena odstupanja od nominalnih vrijednosti. Materijal korišten za izradu podložne ploče i ukruta je čelik kvalitete S355, dok je vreteno izvedena od čelika kvalitete S235.





Slika 5.11 Nestandardni detalj stope skele

Tablica 5.6 Izmjerene vrijednosti dimenzija nestandardnog detalja a)

UZORAK	ŠUPLJE VRETENO				
Nestandardni	Φ_v	Φ_u	t_s	l_{vr+pl}	l_{vr}
NS1	37,69	21,25	8,90	401,42	390,88
NS2	37,79	21,34	9,14	400,66	390,24
NS3	37,65	21,11	8,52	400,41	389,94
Srednja vrijednost	37,71	21,23	8,85	400,83	390,35

Tablica 5.7 Izmjerene vrijednosti dimenzija nestandardnog detalja b)

UZORAK	UKRUTE				
Nestandardni	t_u	c	d	e	f
NS1	5,52	10,67	27,26	10,72	61,60
NS2	5,38	10,44	26,85	10,53	61,61
NS3	5,48	10,34	26,88	10,58	61,75
Srednja vrijednost	5,46	10,48	27,00	10,61	61,65

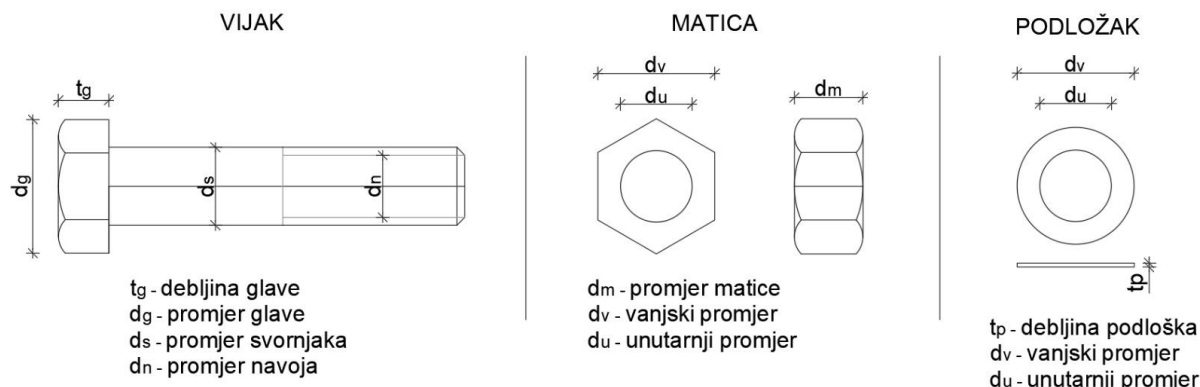
Tablica 5.8 Izmjerene vrijednosti dimenzija nestandardnog detalja c)

UZORAK	PLOČICA			RUPE ZA VIJKE			
	b	h	t _p	a	b	e _x	e _y
NS1	120,51	120,48	10,54	13,78	26,55	19,79	13,73
NS2	120,30	120,48	10,42	13,49	26,22	20,03	13,76
NS3	120,16	120,65	10,47	13,53	26,29	19,87	13,69
Srednja vrijednost	120,32	120,54	10,48	13,60	26,36	19,90	13,73

Za pričvršćivanje standardnih uzoraka detalja stope skele na adapter su korišteni vijci M10 koji su zategnuti momentom od 55 Nm, a za pričvršćivanje nestandardnih uzoraka detalja stope skele su korišteni vijci M12 koji su zategnuti momentom od 95 Nm. Na slici 5.12. prikazani su vijci M10 i M12 s dodijeljenim oznakama pozicija na kojima će se nalaziti za vrijeme ispitivanja. Na vijcima i maticama su izvršena mjerenja svih dimenzija čije su srednje vrijednosti od ukupno 9 mjerenja za standardnu i 9 mjerenja za nestandardnu skupinu vijčanih sklopova (3 mjerenja za svaki uzorak) prikazane u tablicama 5.9. i 5.10., a pripadne oznake mjerenja su prikazane na slici 5.13. Mjerenjem je potvrđeno da nema odstupanja od nominalnih vrijednosti dimenzija.



Slika 5.12 Vijci s pripadajućim oznakama



Slika 5.13 Oznake za mjerenje vijčanog sklopa

Tablica 5.9 Izmjerene vrijednosti vijčanog sklopa za S skupinu

UZORAK	PODLOŽAK			MATICA			VIJAK			
	du	dv	t	du	dv	tm	tg	dg	ds	dn
Srednja vrijednost	10,58	19,85	1,84	8,5	16,86	7,81	6,46	16,86	9,89	8,01

Tablica 5.10 Izmjerene vrijednosti vijčanog sklopa za NS skupinu

UZORAK	PODLOŽAK			MATICA			VIJAK			
	du	dv	t	du	dv	tm	tg	dg	ds	dn
Srednja vrijednost	13,06	23,88	2,31	10,28	14,56	9,81	7,45	18,81	11,88	9,65

5.3. Ispitivanje uzoraka

5.3.1. Općenito

Ispitivanje je provedeno 9. ožujka 2023. godine u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Uzorci detalja stope skele ispitivani su na univerzalnoj statičkoj preši za ispitivanje Z600 proizvođača Zwick Roell kapaciteta 600 kN. Uzorci su ispitivani u donjem ispitnom prostoru, prikazanom na slici 5.14., koji je namijenjen za ispitivanja na tlak. Unos opterećenja je kontroliran pomakom.



Slika 5.14 Statička preša Zwick Roell

5.3.2. Tijek ispitivanja

Ispitivanje je započelo na standardnim uzorcima detalja stope skele (uzorci S1, S2 i S3). Na uzorke je prvo nanoseno opterećenje silom od 3 kN brzinom od 2 mm/min radi „uigravanja“ uzoraka. Nakon „uigravanja“ su uzorci rasterećeni i vraćeni u početni položaj bez opterećenja.

Opterećenje uzoraka S1, S2 i S3 je nakon uigravanja nanošeno brzinom od 2 mm/min do vrijednosti sile od 15 kN nakon čega se brzina opterećenja postupno povećavala do 6 mm/min. Uzorak S1 je otkazao pri vrijednosti vertikalnog pomaka od 120 mm, a uzorci S2 i S3 su ispitivani do vrijednosti vertikalnog pomaka od 133 mm nakon čega je nanošenje opterećenja prekinuto jer nije došlo do otkazivanja uzoraka.

Ispitivanje na nestandardnim uzorcima detalja stope skele započinje „uigravanjem“ uzoraka nanošenjem sile od 3,0 kN brzinom od 2,7 mm/min nakon čega se uzorak rasterećuje. Ispitivanje se zatim nastavlja opterećenjem uzoraka brzinom od 1 mm/min do vrijednosti sile od 15,6 kN nakon čega se postepeno povećava do 4 mm/min i nanosi do otkazivanja uzorka. Do otkazivanja je došlo na sva tri

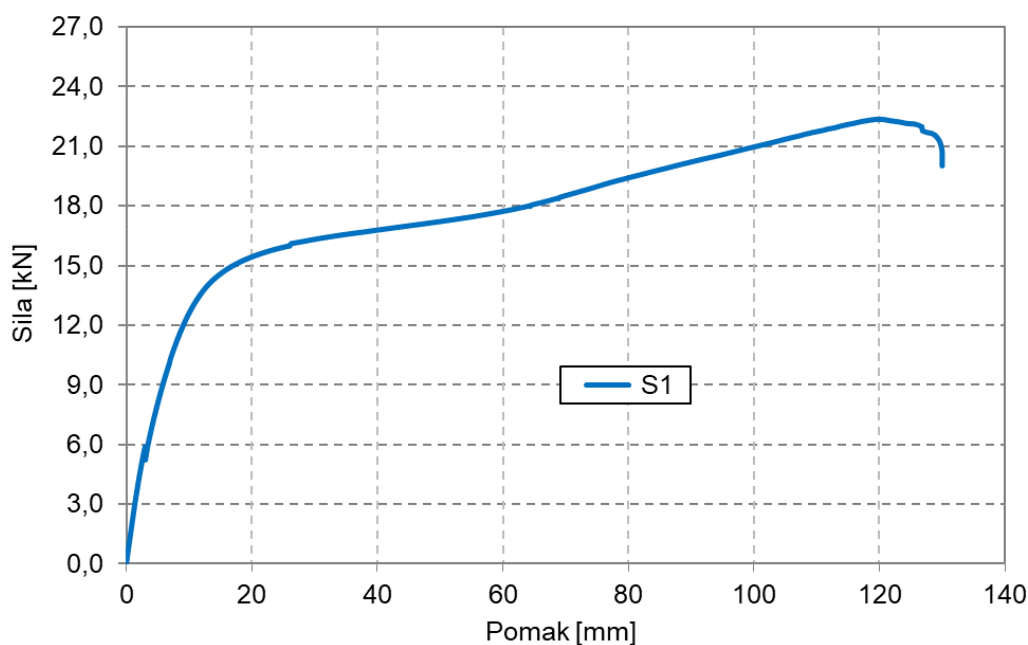
nestandardna uzorka (NS1, NS2 i NS3). Uzorci NS1 i NS2 su otkazali pri vrijednosti vertikalnog pomaka od oko 28,5 mm, dok je do otkazivanja uzorka NS3 došlo pri vertikalnom pomaku preše od 36,5 mm. Nakon otkazivanja uzoraka ispitivanje je prekinuto.

5.4. Rezultati ispitivanja

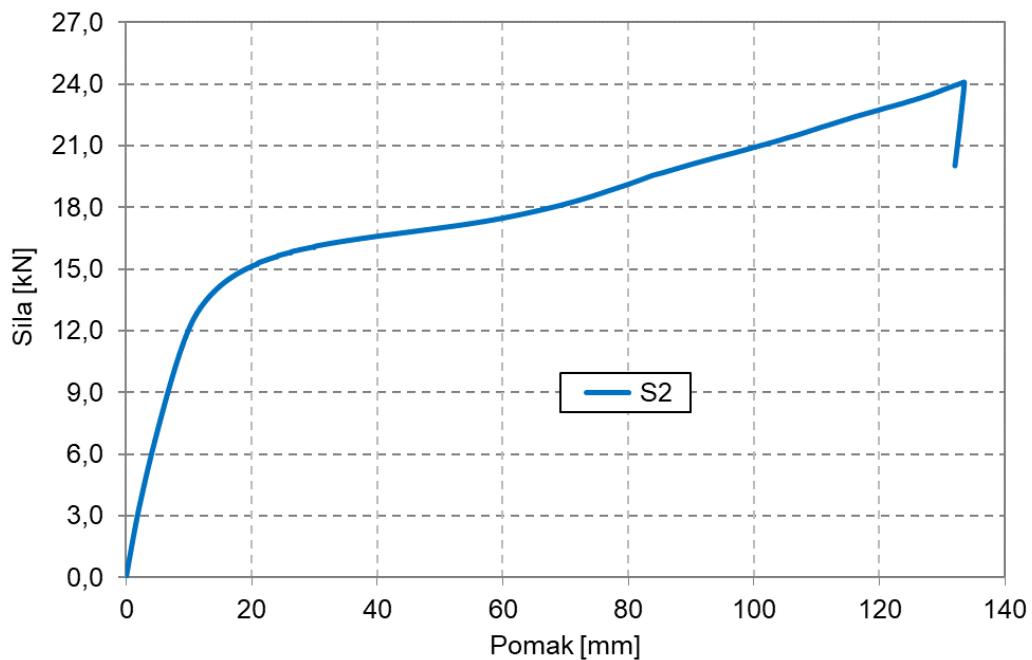
Rezultati ispitivanja prikazani su u obliku dijagrama sile i pomaka izmjerenih na mjestima mjernih uređaja LVDT te dijagrama sile i pomaka sa zapisa preše.

5.4.1. Odnos sile i pomaka preše

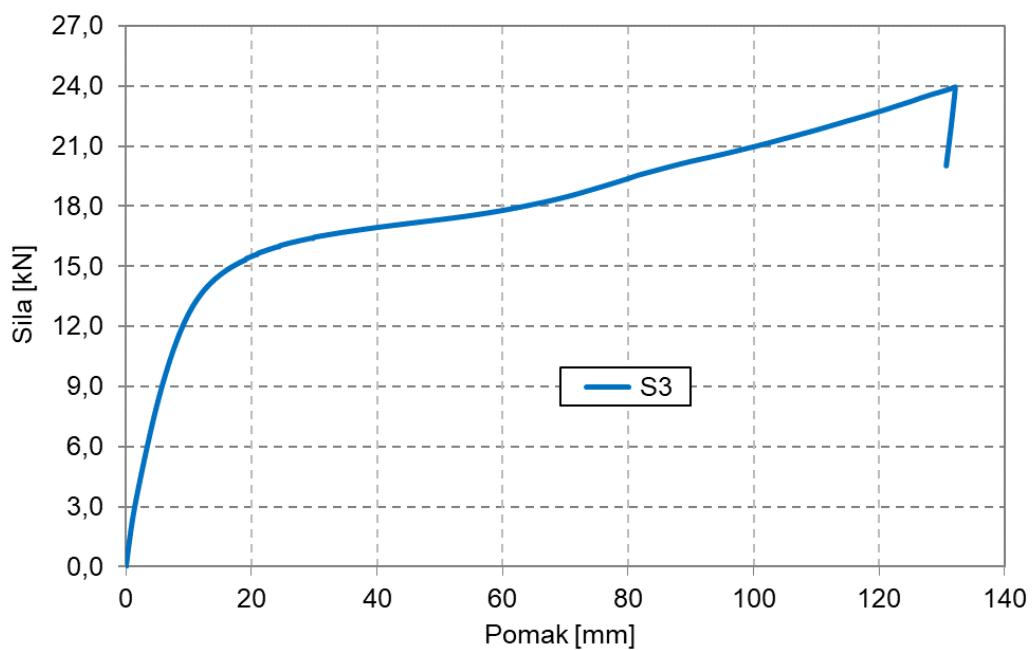
Na slici 5.15. prikazani su dijagrami sila-pomak, dobiveni iz zapisa preše za pojedine standardne uzorke detalja stope skele, a na slici 5.16. prikazana je usporedba ponašanja svih uzoraka standardnih detalja stope skele.



a) uzorak S1

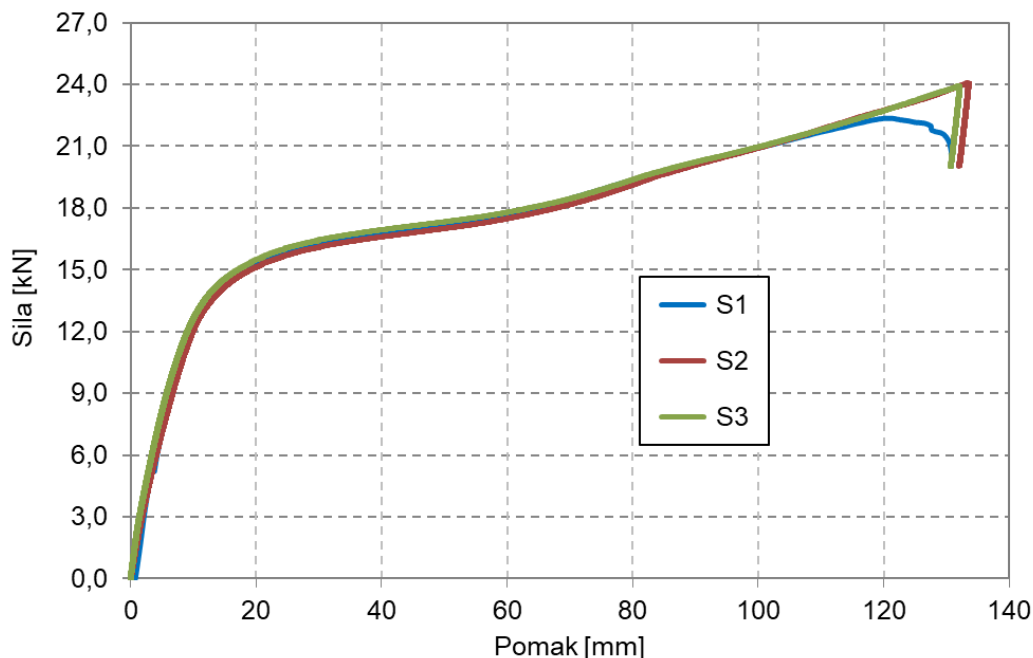


b) uzorak S2



c) uzorak S3

Slika 5.15 Dijagram sila-pomak



Slika 5.16 Dijagram sila-pomak za uzorke S1-S3

Na dijagramu je vidljivo gotovo identično ponašanje svih standardnih uzoraka detalja stope skele. Ipak je kod uzorka S1 došlo do pojave loma pri pomaku traverze od približno 120 mm pri čemu je izmjerena vrijednost nanesenog opterećenja na pistonu preše od 22,4 kN. Iako se prilikom ispitivanja uzorka S2 i S3 lom nije pojavio, ispitivanje je prekinuto pri pomacima od približno 130 mm pri kojem je izmjerena vrijednost opterećenja na pistonu preše od 24,1 kN za uzorak S2, odnosno 23,9 kN za uzorak S3. Stoga je na dijagramu pri pomaku većem od 120 mm primjetna razlika u ponašanju uzorka S1 u odnosu na S2 i S3 kod kojih se lom nije dogodio. Na slikama 5.17. i 5.18. su prikazani deformirani oblici standardnih uzoraka stopa nakon završetka ispitivanja.

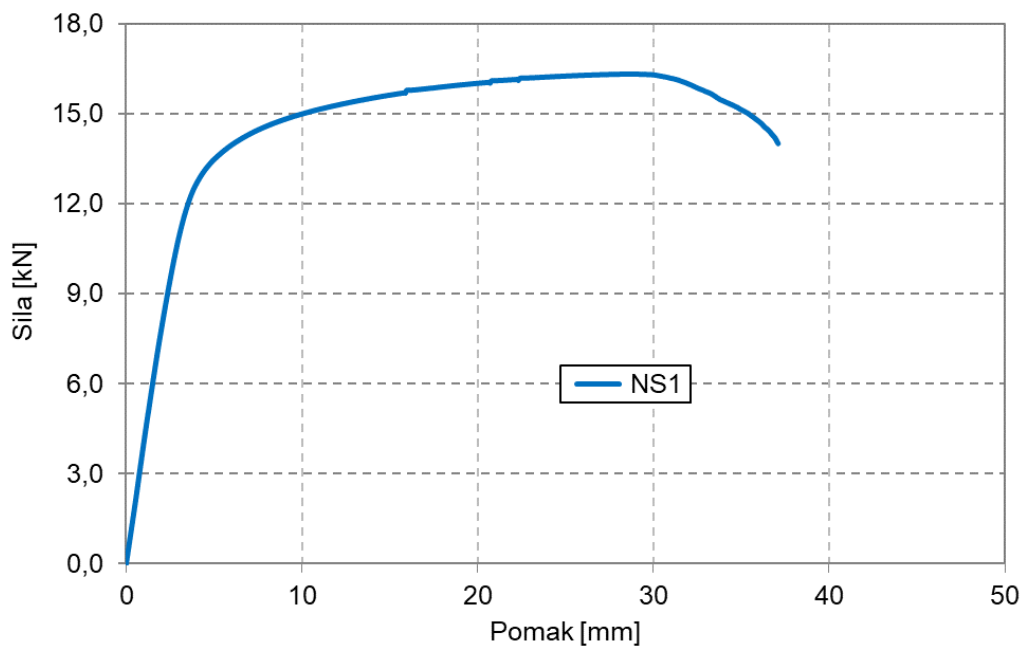


Slika 5.17 Standardni uzorci stope nakon ispitivanja

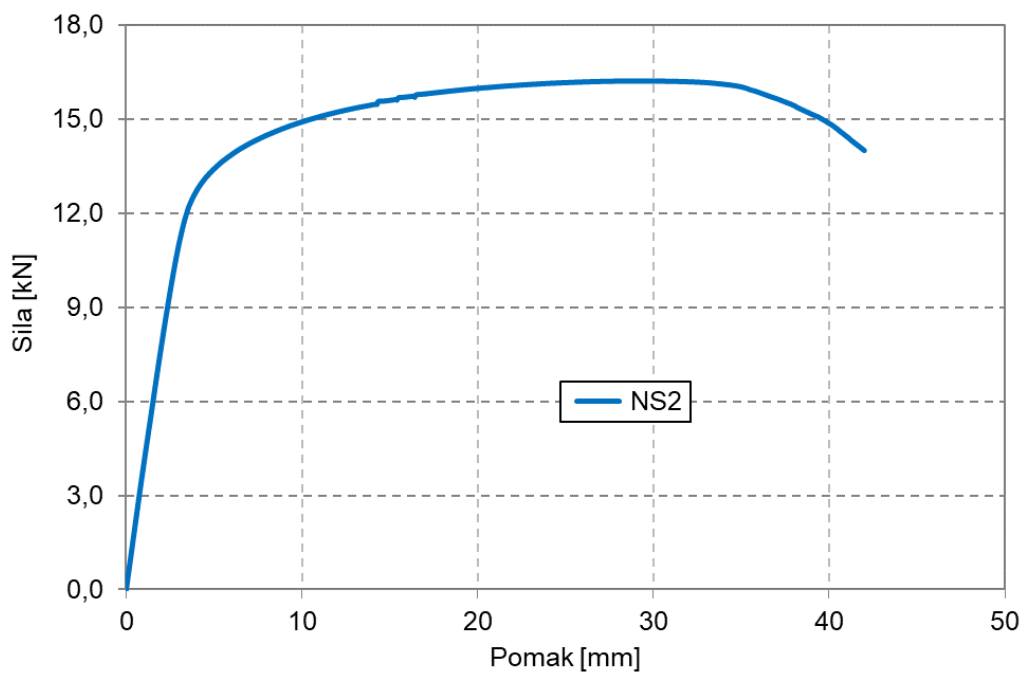


Slika 5.18 Uzorci S1-S3 nakon ispitivanja

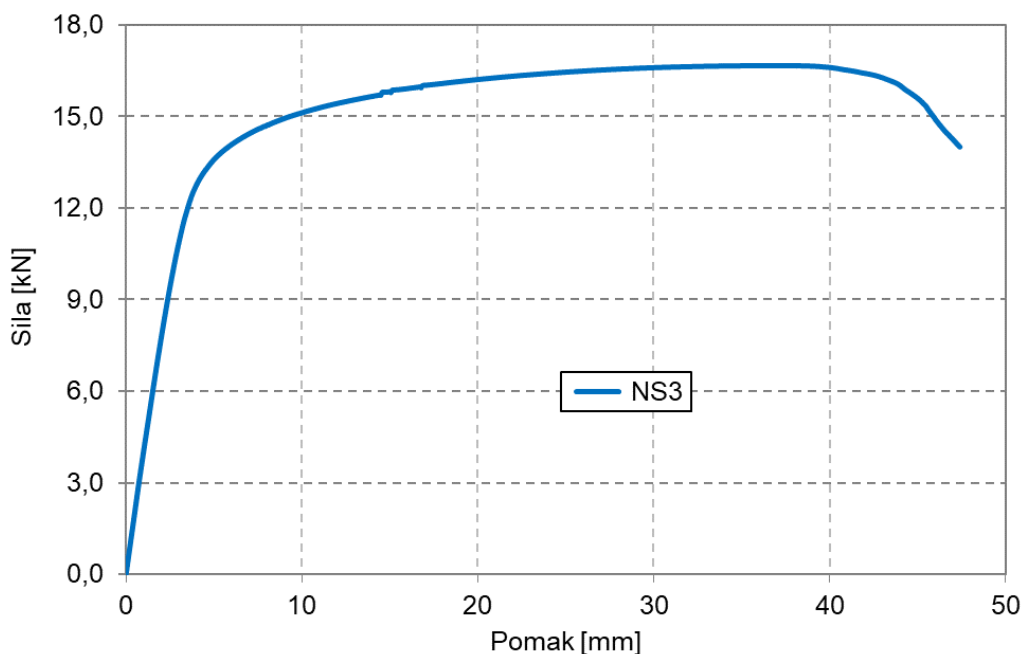
Na slici 5.19. prikazani su dijagrami sila-pomak, dobiveni iz zapisa preše, za pojedine nestandardne uzorke detalja stope skele, dok je na slici 5.20. prikazana usporedba ponašanja svih uzoraka nestandardnih detalja stope skele.



a) NS1

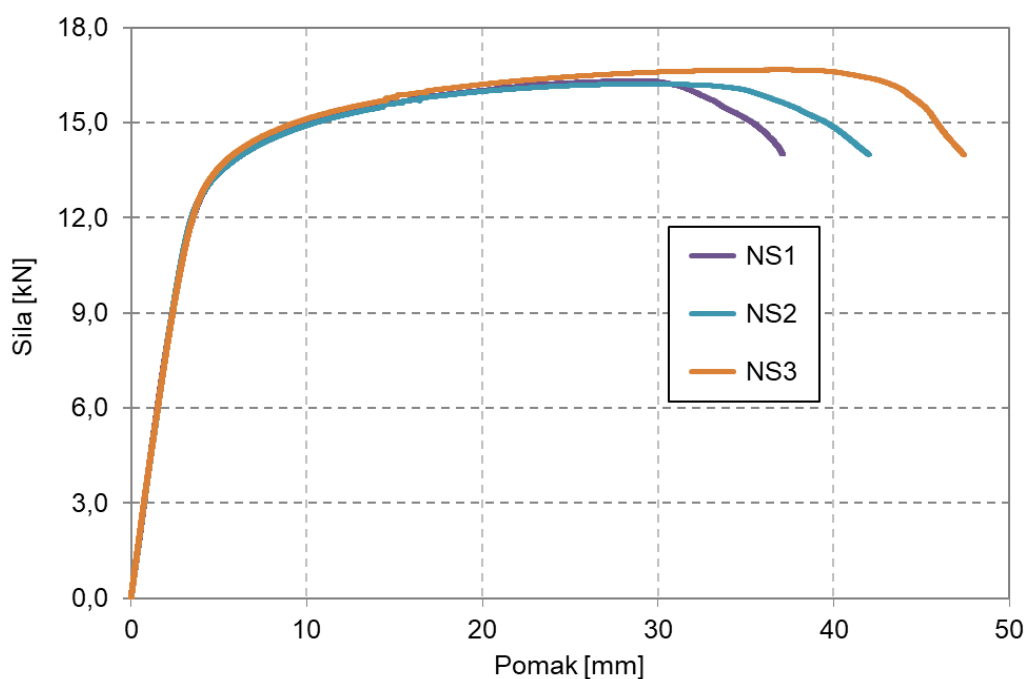


b) NS2



c) NS3

Slika 5.19 Dijagram sila-pomak preše



Slika 5.20 Dijagram sila-pomak za uzorke NS1-NS3

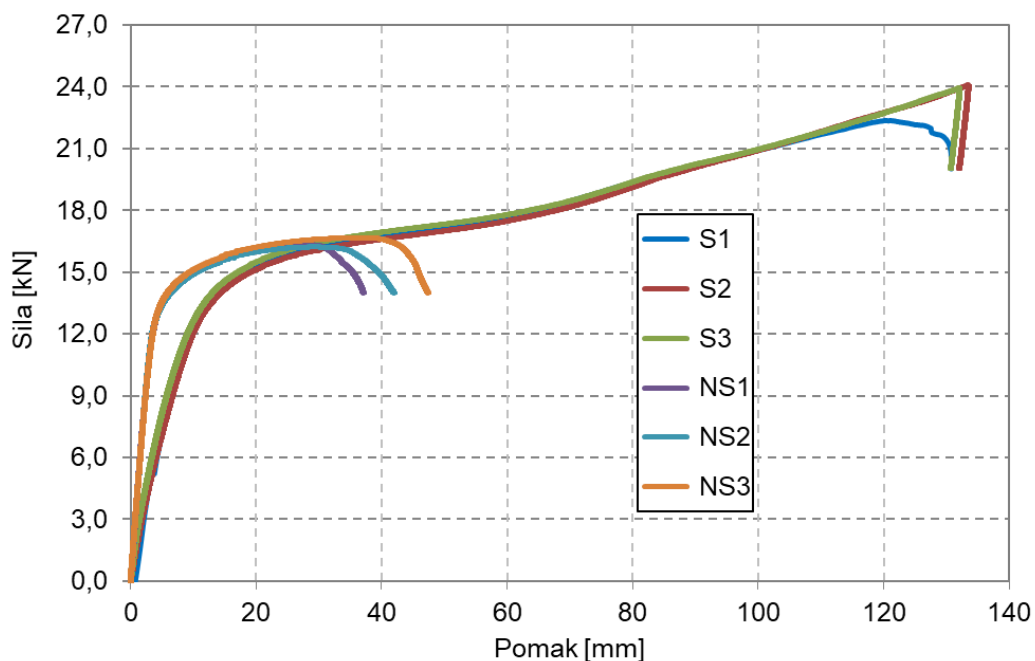
Na dijagramu je vidljivo slično ponašanje svih nestandardnih uzoraka detalja stope skele. Najveća sila od 16,7 kN je ostvarena na uzorku NS3 pri izmjenom pomaku od 37,0 mm, dok je najmanja sila od 16,3 kN zabilježena pri ispitivanju uzorka NS1 pri izmjenom pomaku od 28,6 mm. Uzorak NS2 je otkazao pri iznosu

opterećenja od 16,2 kN za ostvareni pomak od 29,4 mm. Kod svih uzoraka je nakon dosezanja maksimalne sile došlo do naglog pada sile u dijagramu uslijed loma poprečnog presjeka šupljeg vretena. Ispitivanje je nedugo nakon otkazivanja uzoraka prekinuto. Deformirani oblici nestandardnih uzoraka stopa nakon završetka ispitivanja su prikazani na slici 5.21.



Slika 5.21 Nestandardni uzorci stopa nakon ispitivanja

Na slici 5.22. prikazana je usporedba dijagrama sila-pomak za obje grupe ispitanih uzoraka. Na dijagramu je vidljiva razlika u ponašanju standardnih i nestandardnih uzoraka detalja stopa skele. Iz ponašanja uzoraka u elastičnom području na dijagramu se uočava veća krutost u skupini NS uzoraka u odnosu na skupinu S, unatoč punom poprečnom presjeku vretena i većoj kvaliteti čelika korištenog za izradu S uzoraka. Razlog tomu je ojačanje šupljeg vretena NS uzoraka s ukрутama iz čega proizlazi i višestruko manji pomak zabilježen pri ispitivanju. Sukladno navedenom slijedi i primjetno veća duktilnost standardnih uzoraka stopa skele. Na slici 5.23. su prikazani uzorci detalja stopa nakon provedenih ispitivanja.



Slika 5.22 Dijagram sila-pomak za sve ispitane uzorke

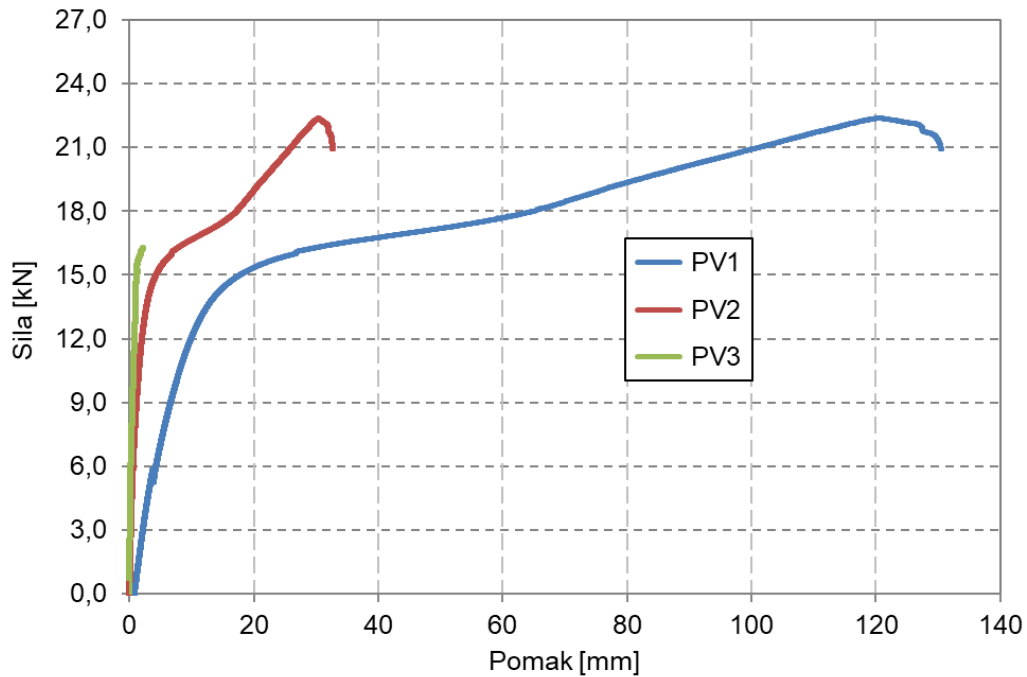


Slika 5.23 Uzorci stope nakon ispitivanja

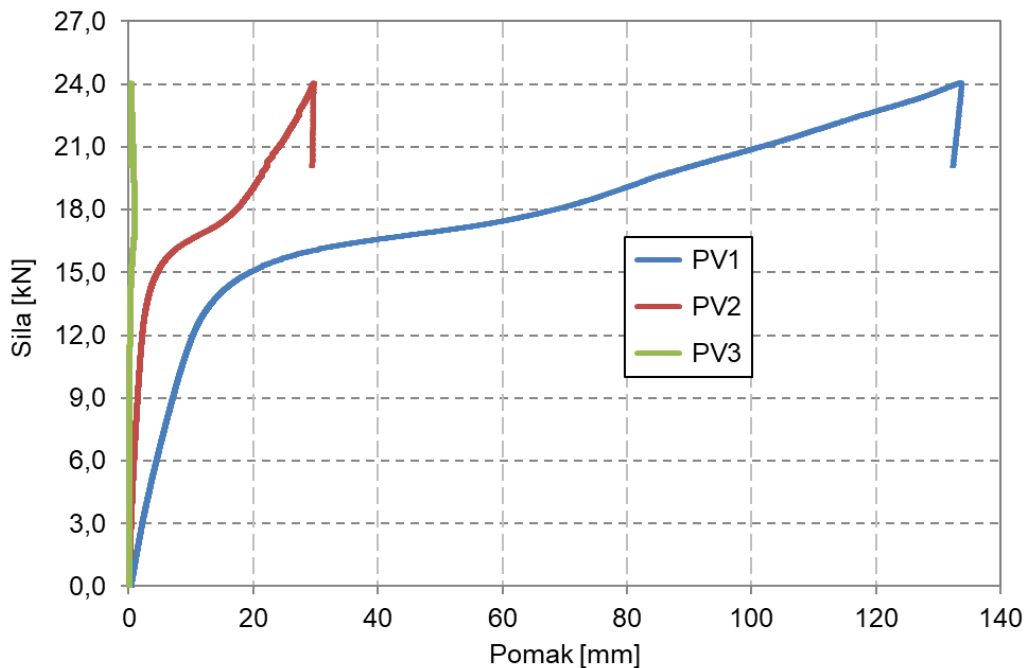
5.4.2. Odnos sile i pomaka na mjestu PV1, PV2 i PV3

Na slikama 5.24. - 5.29. je prikazan odnos izmjerene sile na pistonu preše te izmjerenog pomaka na mjestu mjernih uređaja PV1, PV2 i PV3. Odnosi sile i pomaka izmjerenih na mjestima PV1 za svih šest uzorka odgovaraju dijagramu sile i pomaka sa zapisa traverze. Razlog tomu je što se LVDT uređaj s oznakom PV1 za vrijeme

ispitivanja nalazio direktno ispod mjesta unosa opterećenja, odnosno ispod traverze preše te je služio kao kontrola pomaka pistona zabilježenog na preši.



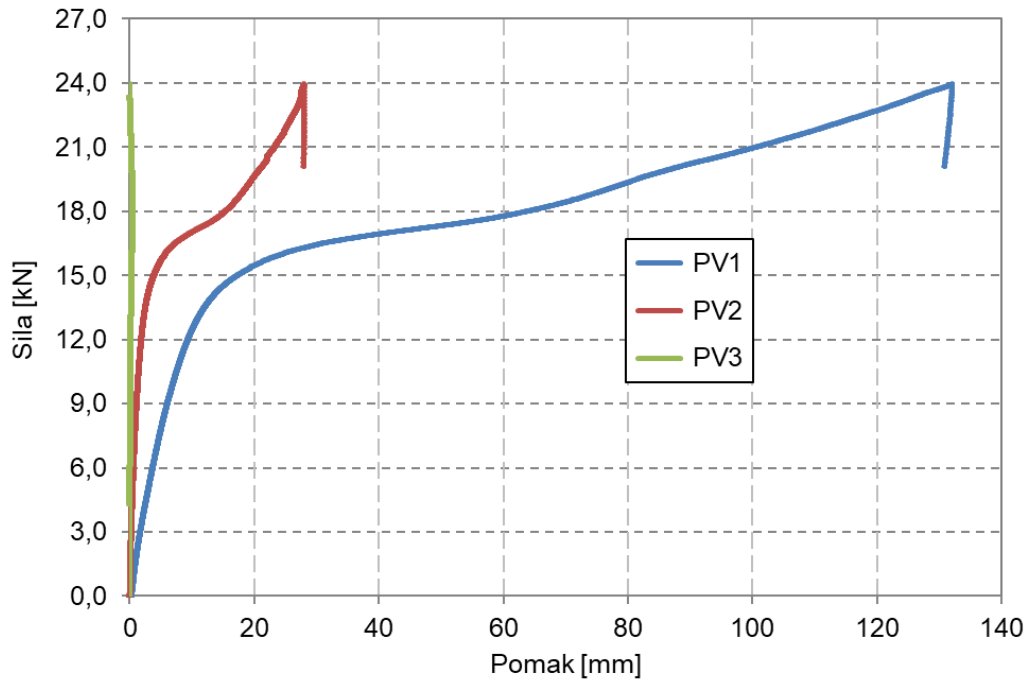
Slika 5.24 Dijagram sila pomak za uzorak S1 na mjestima PV1- PV3



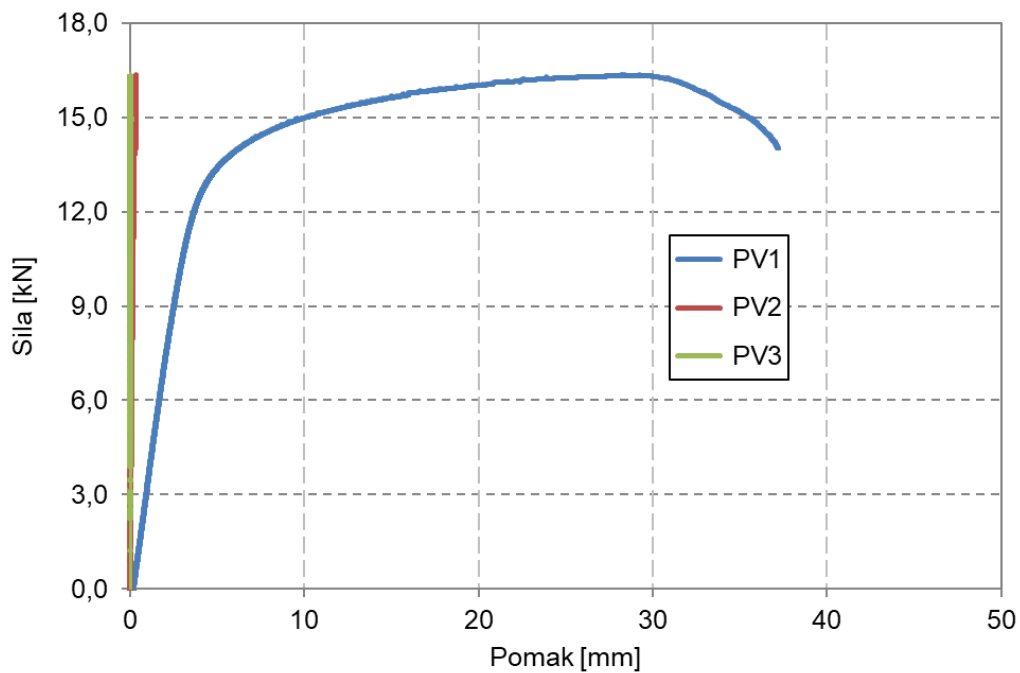
Slika 5.25 Dijagram sila pomak za uzorak S2 na mjestima PV1-PV3

Pomak na mjernom mjestu PV2 je kod svih standardnih uzoraka sličan. Za uzorak S1 je zabilježen maksimalni pomak od 30,5 mm pri lomu uzorka, a za uzorke

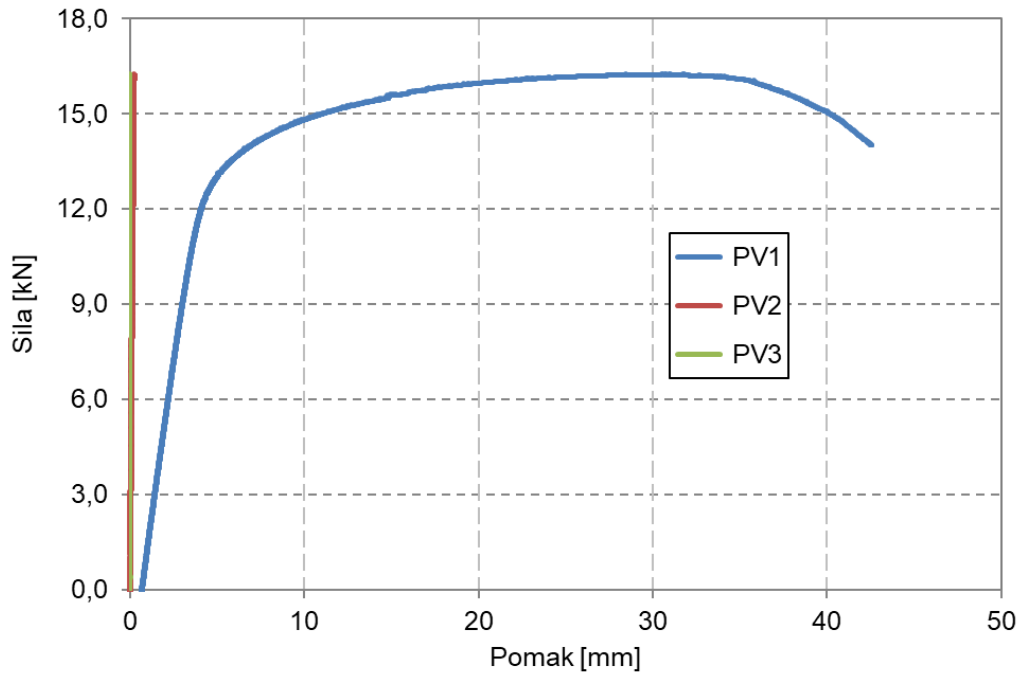
S2 i S3 je zabilježen maksimalni pomak od 29,7, odnosno 28,0 mm pri završetku ispitivanja. Na mjernom mjestu PV3 zabilježeni pomaci su zanemarivi te potvrđuju da se za vrijeme ispitivanja nije dogodilo proklizavanje uzoraka u odnosu na postolje preše.



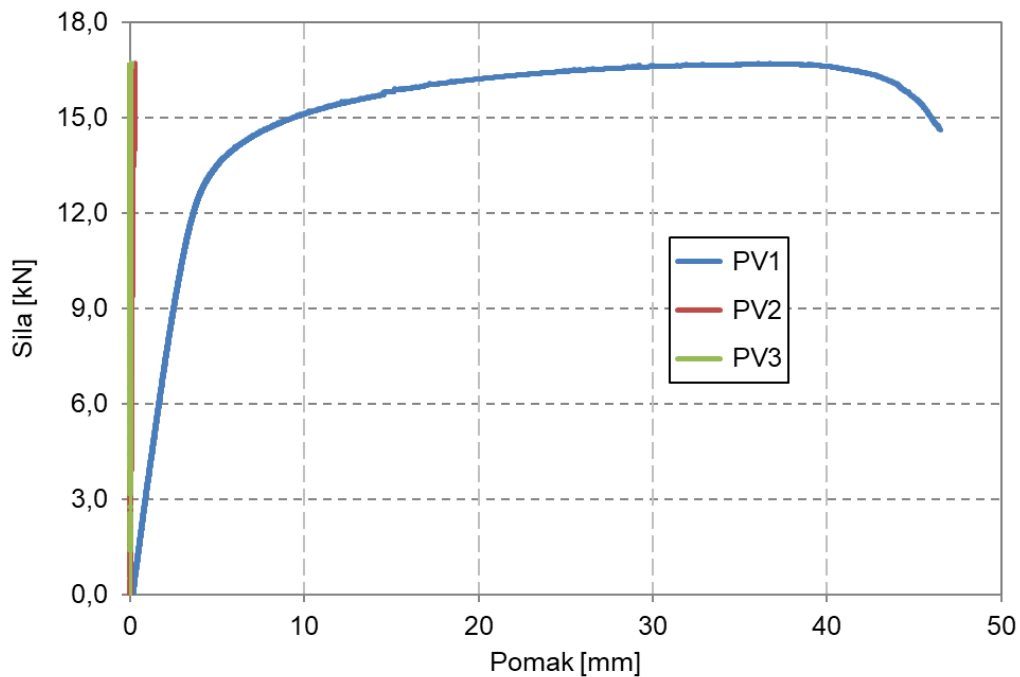
Slika 5.26 Dijagram sila pomak za uzorak S3 na mjestima PV1-PV3



Slika 5.27 Dijagram sila pomak za uzorak NS1 na mjestima PV1-PV3



Slika 5.28 Dijagram sila pomak za uzorak NS2 na mjestima PV1-PV3

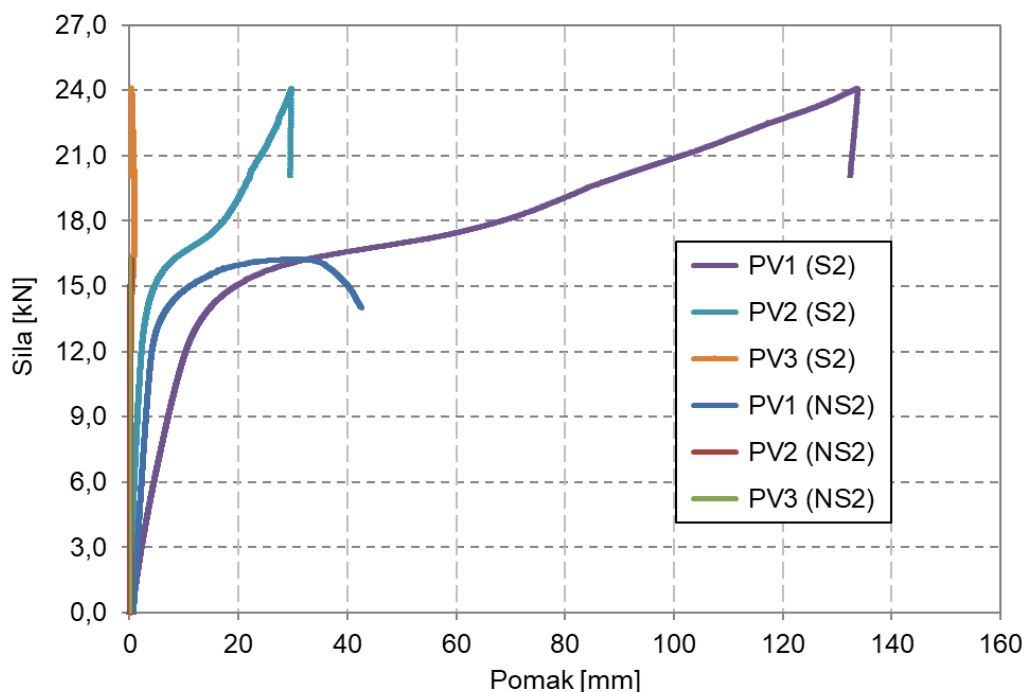


Slika 5.29 Dijagram sila pomak za uzorak NS3 na mjestima PV1-PV3

Kod skupine nestandardnih uzoraka na mjernim mjestima PV2 i PV3 izmjereni pomak je višestruko manji u odnosu na skupinu standardnih uzoraka te se može zanemariti. Obzirom da mjerni uređaj PV2 mjeri pomak vrha ukrute potvrđuje se djelotvornost ukrućenja šupljeg vretena te je vidljivo da se deformacije izazvane savijanjem ne pojavljuju na ojačanom dijelu vretena. Analogno zapisima standardnih

uzoraka, na mjernom mjestu PV3 u skupini nestandardnih uzoraka se za vrijeme ispitivanja nije dogodilo proklizavanje u odnosu na postolje preše.

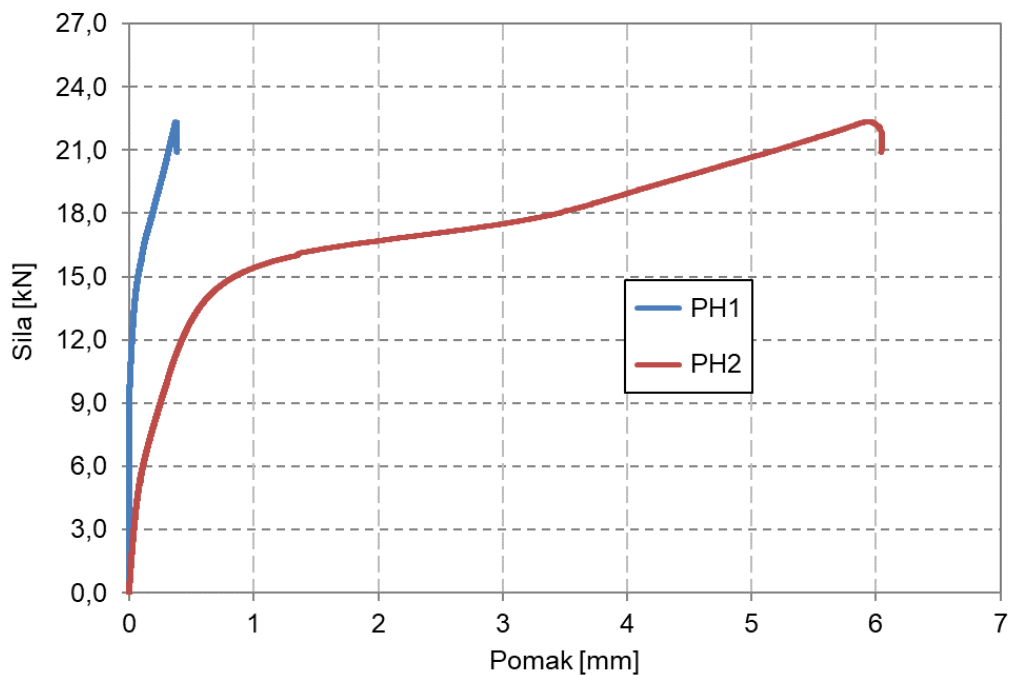
Na slici 5.30. je prikazana usporedba izmjerenih vertikalnih pomaka na mjernim mjestima PV1, PV2 i PV3 za obje skupine uzoraka.



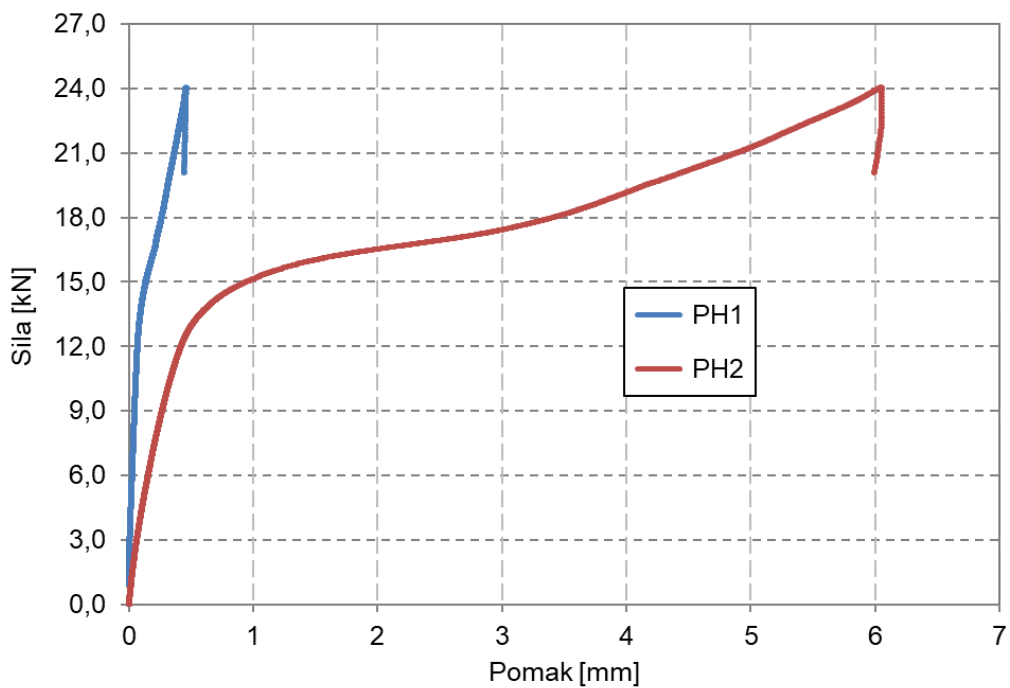
Slika 5.30 Dijagram sila pomak na mjestima PV1-PV3 na S i NS uzorcima

5.4.3. Odnos sile i pomaka na mjestima PH1 i PH2

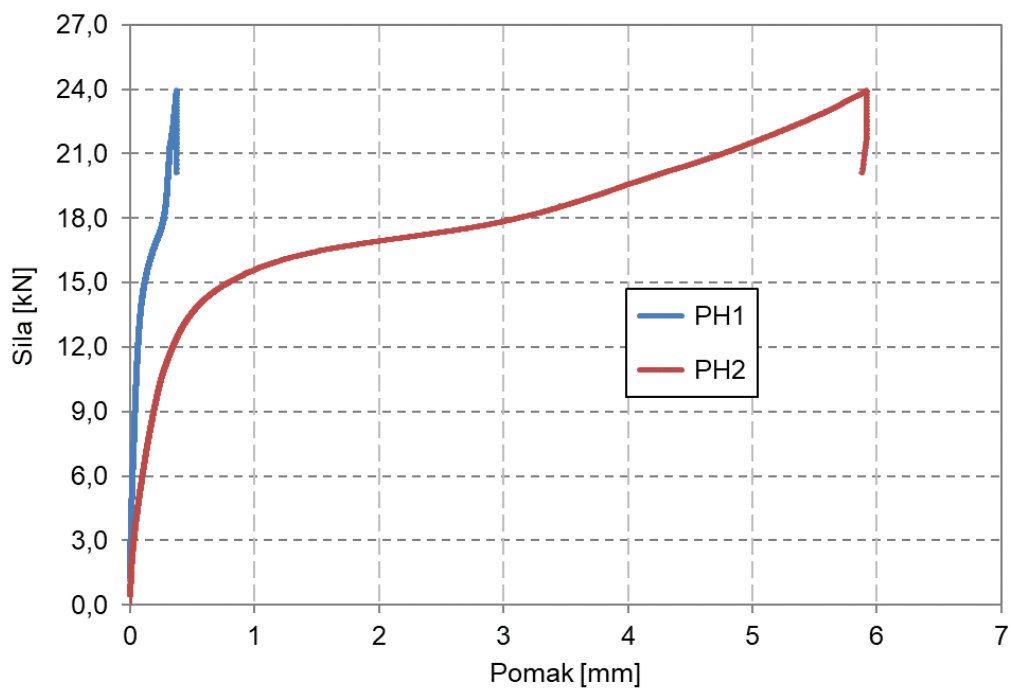
Na slikama 5.31. - 5.36. je prikazan odnos izmjerene sile na pistonu preše i horizontalnih pomaka na mjernim mjestima PH1 i PH2. Pomaci zabilježeni na mjernom mjestu PH1 u skupini standardnih uzoraka ukazuju na vlačno izduljenje vijaka i slični su kod svih standardnih uzoraka. Za uzorak S1 je zabilježen maksimalni pomak od 0,37 mm na mjernom mjestu PH1 pri lomu dok su na uzorcima S2 i S3 zabilježeni redom pomaci od 0,44 mm i 0,37 mm pri završetku ispitivanja. Iz zapisa LVDT uređaja na mjernom mjestu PH2 se može uočiti značajniji pomak podložne ploče koji je uzrokovan savijanjem. Pri lomu uzorka S1 zabilježen je maksimalni pomak od 5,95 mm, a pri završetku ispitivanja uzorka S2 i S3 pomaci od 5,99 mm i 5,88 mm.



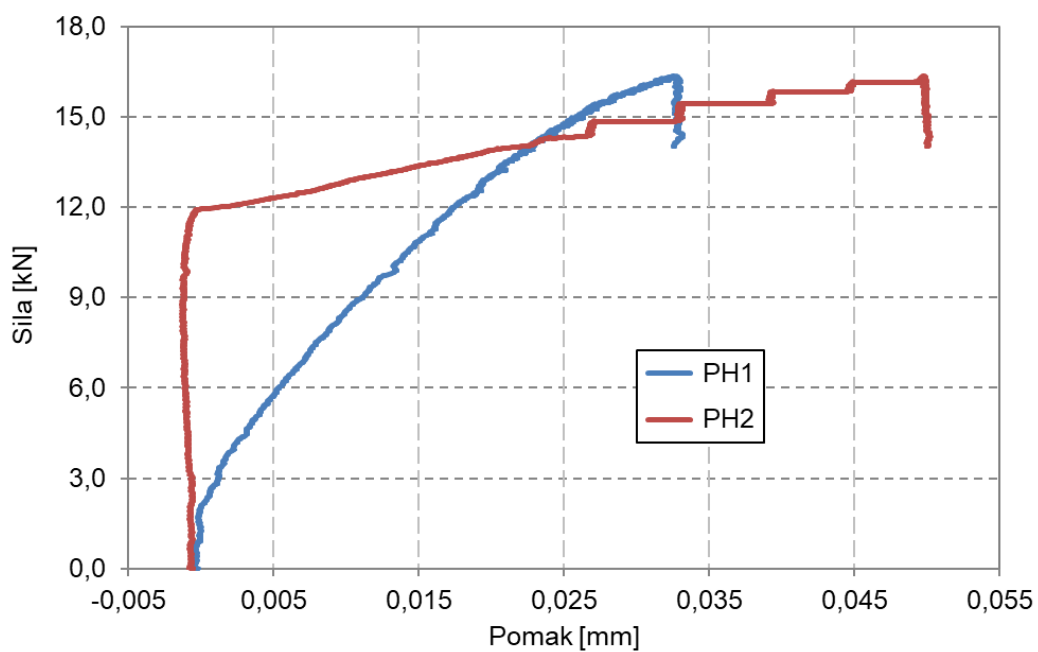
Slika 5.31 Dijagram sila pomak za uzorak S1 na mjestima PH1 i PH2



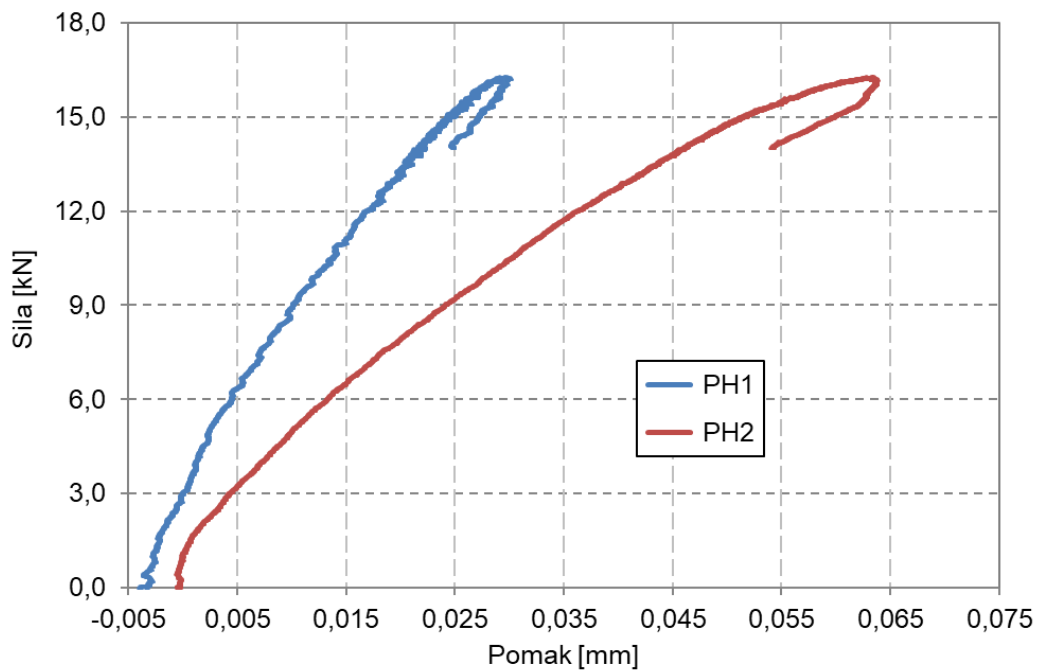
Slika 5.32 Dijagram sila pomak za uzorak S2 na mjestima PH1 i PH2



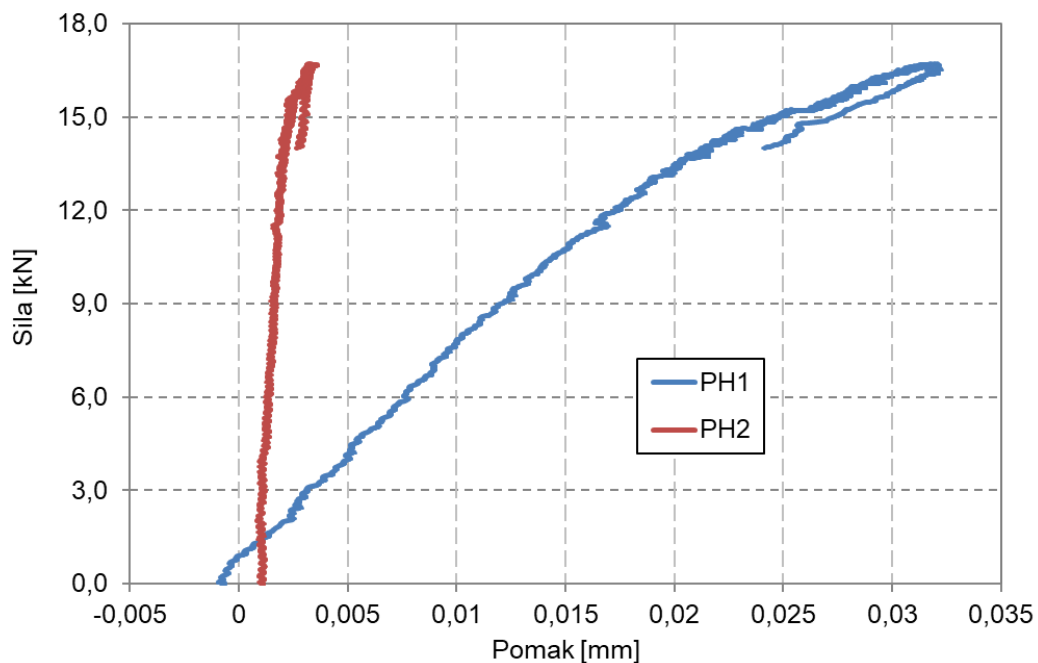
Slika 5.33 Dijagram sila pomak za uzorak S3 na mjestima PH1 i PH2



Slika 5.34 Dijagram sila pomak za uzorak S3 na mjestima PH1 i PH2



Slika 5.35 Dijagram sila pomak za uzorak NS2 na mjestima PH1 i PH2

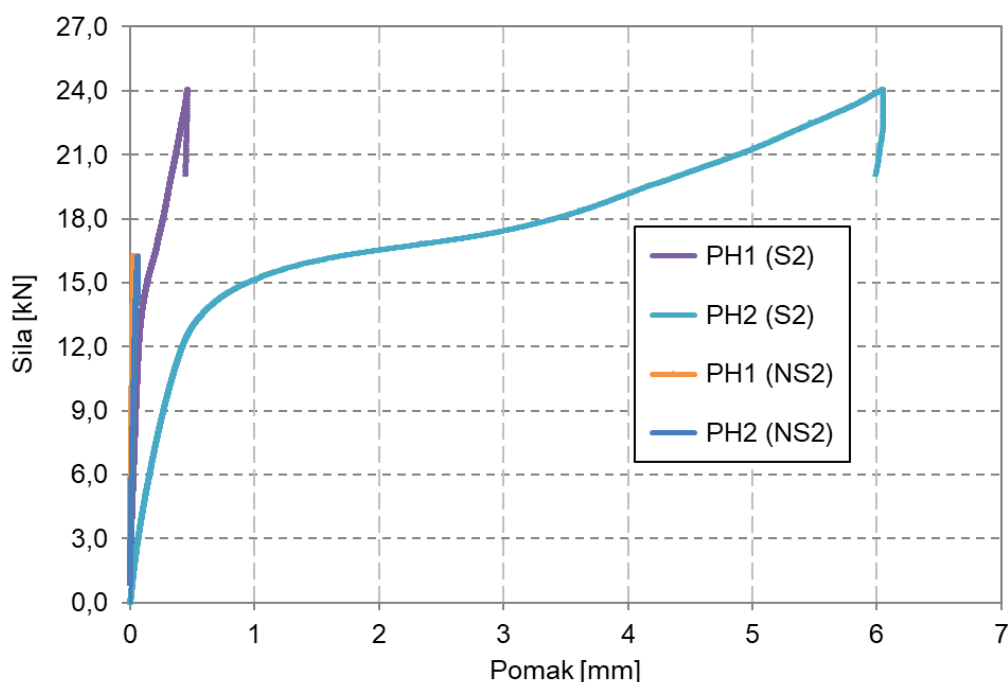


Slika 5.36 Dijagram sila pomak za uzorak NS3 na mjestima PH1 i PH2

Iz usporedbe zapisa na mjernom mjestu PH1 vidi se razlika u ponašanju vijaka za vrijeme ispitivanja. Kod vijaka nestandardne skupine nije došlo do izduljenja vijaka zbog ukrućenja ploče sa rebrima (ukrutama stope) zbog čega se linije tečenja moraju formirati na većim duljinama, odnosno glava vijka ne doživljava rotaciju kao kod

standardne skupine, Također, vijci korišteni pri ispitivanju NS skupine su M12 koji su većeg promjera, za razliku od M10 vijaka korištenih kod S skupine koji su ipak doživjeli vlačne deformacije. Analizom zapisa pomaka s mjernog mjesta PH2 vidne su razlike u deformaciji podložnih ploča dviju skupina uzoraka. Skupina standardnih uzoraka (S) doživjela je značajne deformacije podložne ploče uslijed savijanja zbog manje debljine dok se iste nisu ostvarile kod nestandardnih uzoraka zbog veće debljine podložne ploče te dodatnih ukrućenja.

Na slici 5.37. vidljiva je značajna razlika u ostvarenim horizontalnim pomacima između S i NS skupine, dok je unutar skupina ponašanje uzoraka slično. U skupini nestandardnih uzoraka oba horizontalna pomaka su neznatna.

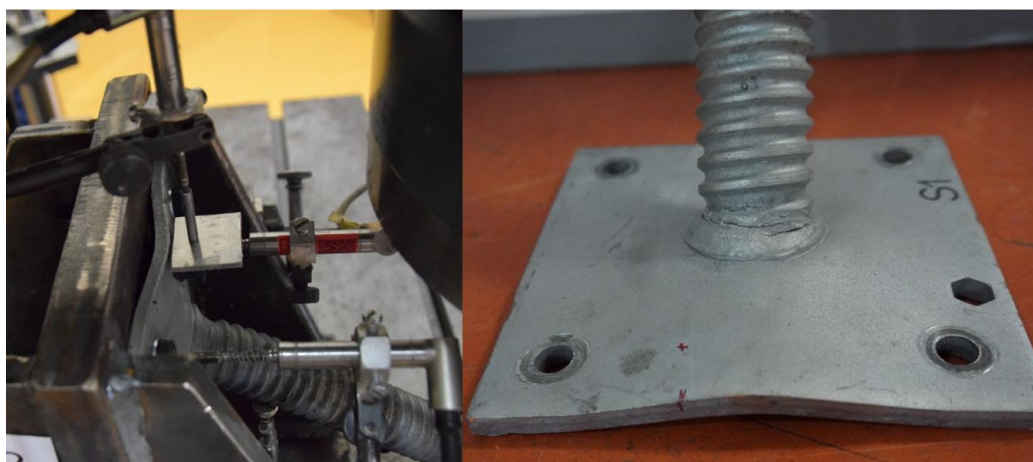


Slika 5.37 Dijagram sila pomak na mjestima PH1 i PH2 na S i NS uzorcima

5.5. Ponašanje uzoraka i načini otkazivanja

Standardni uzorci su za vrijeme ispitivanja imali slično ponašanje. Za vrijeme prve faze ispitivanja u kojoj su sila i pomak u linearnom odnosu, deformacije koje se javljaju na uzorcima su elastične. Do popuštanja uzoraka je došlo pri pomaku traverze od približno 12,5 mm i sili od 13,6 kN. Nakon dosezanja plastične otpornosti uzorci se ponašaju duktilno te je vidljiva značajna plastična deformacija punog vretena iznad zavora s podložnom pločom. Velika deformacija se uočava i na podložnoj ploči koja

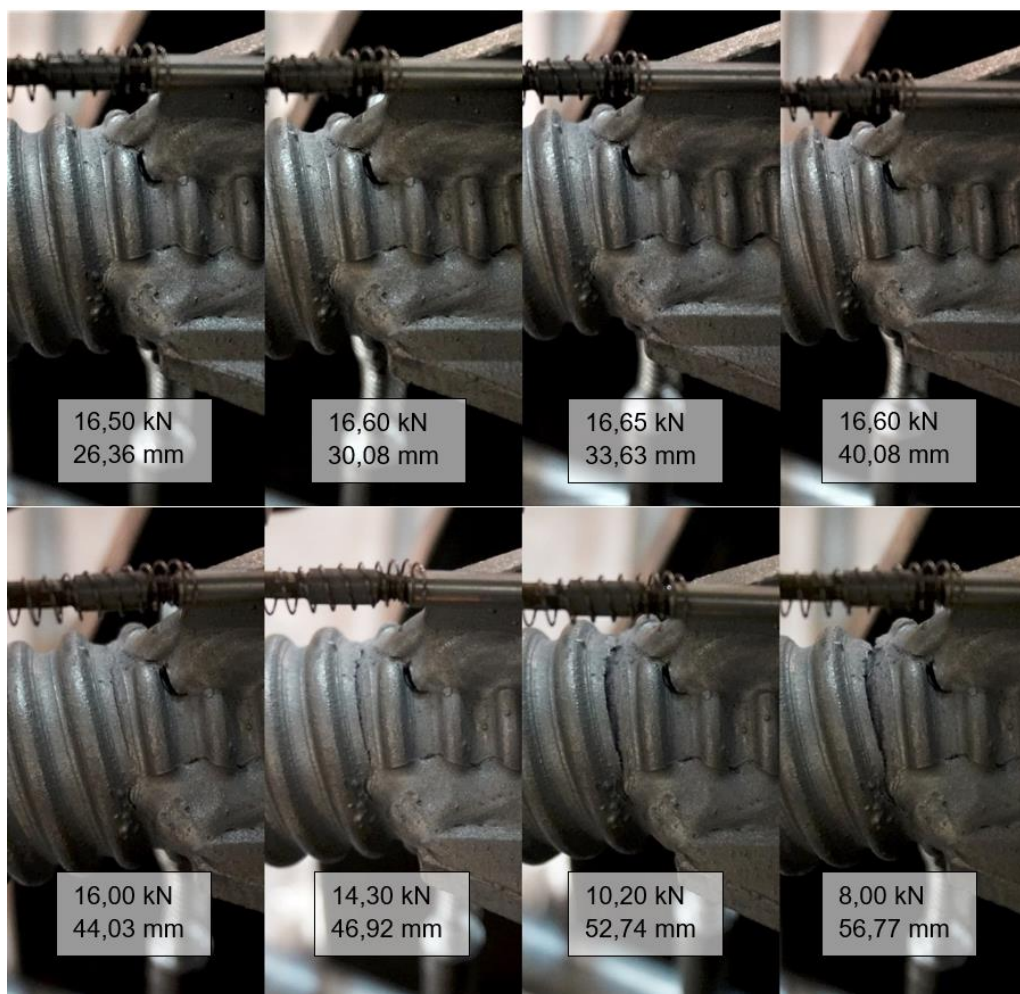
pri opterećenju od približno 13,0 kN ima horizontalni pomak od oko 0,50 mm za sva tri standardna uzorka. Tada kreće plastifikacija uslijed koje deformacije značajno rastu s pomakom traverze. Vlačne deformacije vijaka kreću pri opterećenju od 15,0 kN pri kojem gornji vijci imaju pomak od približno 0,10 mm. Daljnjim povećanjem opterećenja dolazi do rasta vlačne deformacije vijaka te je vidljivo da uslijed savijanja i odizanja gornjeg ruba podložne ploče dolazi do utiskivanja glave vijka u podložnu ploču. Maksimalni horizontalni pomak ostvaren na vlačno opterećenim vijcima je kod svih uzoraka približan 0,40 mm. Pri ispitivanju uzorka S1 došlo je do loma punog vretena pri već prethodno opisanim uvjetima (vidi točku 5.4.1.). Kod uzoraka S2 i S3 nije došlo do loma za vrijeme ispitivanja, ali se pretpostavlja da bi uzorci na isti način otkazali da se ispitivanje nastavilo. Deformacija uzorka neposredno prije loma prikazana je na slici 5.38. lijevo, dok je deformirani oblik nakon loma prikazan na 5.38. desno.



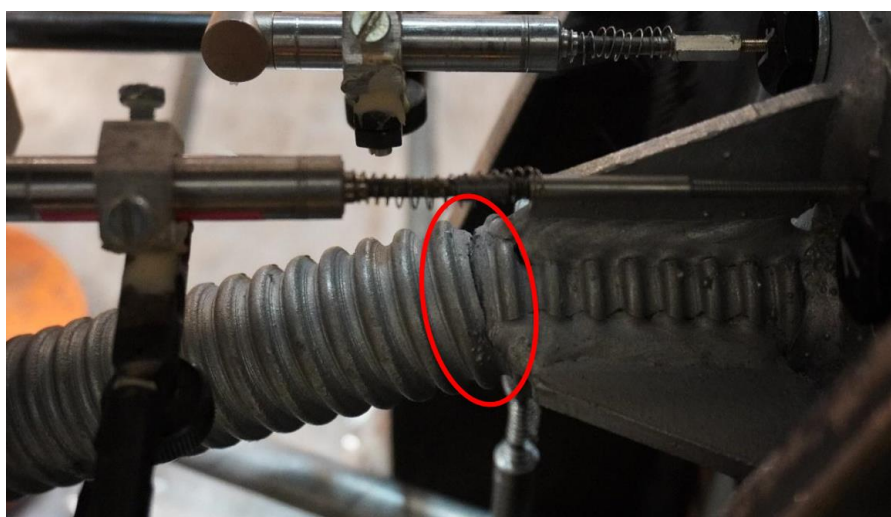
Slika 5.38 Deformacija podložne ploče i punog vretena S uzorka

Sva tri nestandardna uzorka su pokazala slično ponašanje te su otkazali istim načinom otkazivanja. U prvoj fazi nanošenja opterećenja uzorci se ponašaju linearno elastično, odnosno sila i pomak su u linearnom odnosu te nema naznake otkazivanja uzoraka. Nakon doseganja pomaka od približno 5 mm započinje tečenje materijala te je vidljiva plastična deformacija vretena neposredno iznad gornje vertikalne ukrute. Postupnim povećanjem pomaka traverze vidljiv je i rast plastične deformacije do trenutka formiranja loma poprečnog presjeka koji se manifestira pojavom pukotina na vlačnoj strani poprečnog presjeka vretena. Prve okom vidljive pukotine su one koje su nastale pucanjem pocinčanog zaštitnog sloja na mjestu plastifikacije. Nakon loma poprečnog presjeka, sila u preši pada, a pukotina na vlačnoj strani poprečnog presjeka vretena propagira. Na slici 5.39. je prikazano deformirano stanje uzorka NS3 na

mjestu iznad gornje vertikalne ukrute gdje dolazi do plastifikacije zajedno sa silama očitanim na preši pri odgovarajućem pomaku, dok je na slici 5.40. prikazana pukotina nakon završetka ispitivanja.



Slika 5.39 Propagacija pukotina na NS uzorku



Slika 5.40 Mjesto loma uzorka

6. NUMERIČKA SIMULACIJA PONAŠANJA DETALJA STOPE SKELE

6.1. Općenito

Numerička analiza detalja stopa skele provedena je u računalnom paketu ABAQUS [20]. Analiza obuhvaća obje grupe ispitanih uzoraka stopa skele, standardnu i nestandardnu, čija je geometrija modelirana prema nominalnim dimenzijama uzoraka. Ipak, geometrija vretena je u numeričkim modelima aproksimirana zamjenskim cijevnim elementom jednolike debljine stijenke kod nestandardnog detalja, odnosno punim kružnim elementom kod standardnog. Na dijelu vretena iznad zavarene šipke za prijenos opterećenja se ne očekuje otkazivanje niti značajnije deformacije vretena zbog čega je u modelu usvojena smanjena visina vretena do točke unosa opterećenja prema laboratorijskim postavkama.

Mnoge inženjerske zadaće je gotovo nemoguće riješiti analitičkim metodama zbog složene geometrije i rubnih uvjeta. U takvim slučajevima primjenjuju se numeričke metode, od kojih je najprimjenjenija i najrasprostranjenija metoda konačnih elemenata (engl. FEM – finite element method). Sastavni je dio većine komercijalnih programskih paketa u području inženjerske analize, pa tako i računalnog paketa ABAQUS. Metoda konačnih elemenata je metoda za rješavanje skupa povezanih diferencijalnih jednadžbi koje su dobivene aproksimiranjem nepoznatih varijabli nekog kontinuiranog područja skupom nepoznatih varijabli u konačnom broju diskretnih točaka, odnosno čvorova, toga polja. [21] Temelji se na konceptu diskretizacije kontinuuma mrežom konačnih elemenata koji se mogu matematički modelirati. Početna jednadžba se rješava neizravno, svođenjem na konačni sustav algebarskih jednadžbi. Točnost rješenja ovisi o vrsti konačnog elementa, odnosno o broju čvorova u kojima se daje rješenje matematičkog problema. Problem nastaje pri odabiru konačnog elementa koji će osigurati dovoljnu točnost rezultata uz što manji utrošak memorije računala.

Kako bi se ponašanje materijala prikazalo što točnije, potrebno je definirati elastoplastična svojstva čelika od kojeg su izrađeni pojedini elementi stopa. U elastičnom području su deformacije povratne, dok je plastično područje definirano s

trajnim deformacijama nakon dosezanja određene razine napona. Deformacije nastale u plastičnom području su vremenski neovisne, odnosno nepovratne. U plastičnom području je potrebno dodatno definirati očvršćivanje materijala, tj. daljnji rast napona s deformacijom uz reducirani modul elastičnosti. [22] Zbog nedostupnosti podataka o vlačnim ispitivanjima za osnovni materijal vretena i podložne ploče uzoraka stope, u kalibraciji modela korištena je funkcija raspodjele mehaničkih svojstava čelika dana u normi FprEN1993-1-8:2022 [23]

Kontakt između elemenata (podložna ploča i HEA profil na koji je montirana) je nelinearan. Područja u vlaku su mekana, dok su područja koja su u tlaku, odnosno kontaktu, kruta. Uneseno opterećenje aktivira sile međudjelovanja na kontaktu elemenata koje djeluju okomito na smjer međudjelovanja, dok se sile trenja na kontaktu dvaju elemenata razvijaju u tangencijalnom smjeru. [22] Zbog složenosti modela, nije moguće unaprijed odrediti točnu raspodjelu naprezanja, koja će se utvrditi nakon numeričke analize modela. Zavare je potrebno definirati adekvatnim vezama koje sprječavaju odvajanje dviju površina pod utjecajem vanjskih sila bez pojave proklizavanja.

6.2. Opis modela konačnih elemenata

Pri modeliranju standardnog i nestandardnog detalja stope skele uzete su u obzir nominalne geometrijske karakteristike prikazane u točki 5.2.2. za sve elemente, osim za puno i šuplje vreteno iz prethodno objašnjenih razloga. Visina vretena za oba uzorka je 130 mm, gledano od donjeg ruba podložne ploče do mjesta unosa opterećenja. Vreteno s navojima je aproksimirano ravnim šipkom u standardnom, odnosno ravnim cijevi u nestandardnom modelu, radi kraćeg trajanja simulacija. Utjecaj navoja uzet je u obzir efektivnim poprečnim presjekom koji pruža jednak moment otpora savijanju kao i vreteno s navojima, a jednak je 35 mm za standardnu stopu i 38x3,78 mm za nestandardnu stopu. Vijci nisu modelirani zbog pretpostavljenog načina otkazivanja uzoraka plastifikacijom vretena, pri čemu ne dolazi do otkazivanja vijaka. Dovoljno dobra aproksimacija je zadavanje upetih rubnih uvjeta (*Boundary condition - encastre*) po omotaču rupa za vijke na pločici. HEA profil na koji se u stvarnosti montira stopa skele je modeliran kao dvodimenzionalna ploha definirana kao *discrete rigid*, odnosno kruta, nedeformabilna ploha na čiju su donju površinu zadani upeti rubni uvjeti (*encastre*). Budući da je u cilju ispitati i modelirati

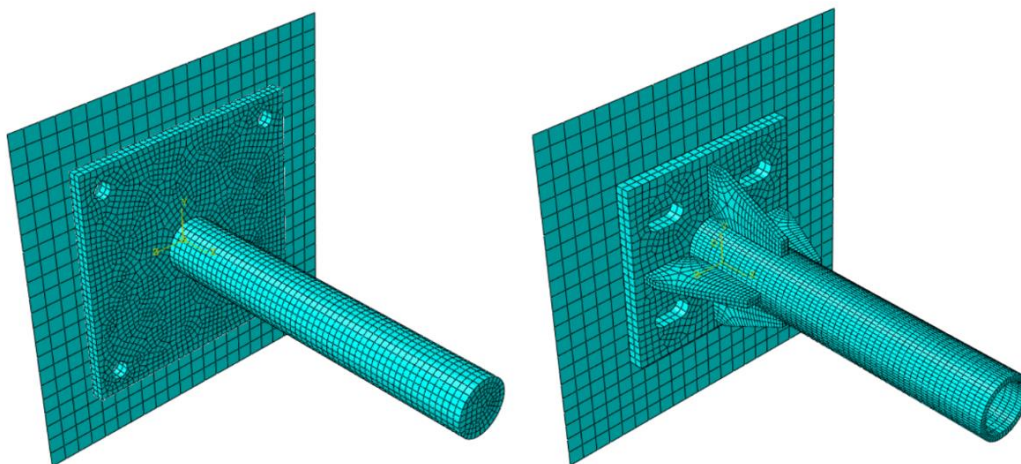
izolirano ponašanje same stope, kontakt između donje površine stope i *rigid* elementa bilo je potrebno modelirati tako da se omogući odvajanje elemenata u vlak u istovremeno sprječavanje penetracije jednog elementa u drugi pri pojavi tlačnog naprezanja. Navedena interakcija je ostvarena definiranjem svojstava normalne i tangencijalne komponente. Normalna komponenta interakcije je definirana kao „hard“ (*pressure overclosure* – kontakt na tlak) uz dopušteno odvajanje nakon kontakta (engl. *allowed separation after contact*), a tangencijalna komponenta kao *penalty* uz definiran koeficijent trenja 0,3. U ovom slučaju je *rigid* element definiran kao *master*, dok je pločica definirana kao *slave* element. *Master-slave* veza funkcionira na način da *master* element postavlja ograničenja *slave* elementu te podređuje njegovo ponašanje na površini definiranoj vezom.

Također, zbog pretpostavke o otkazivanju uzorka, zavare između vretena i podložne ploče te vretena i ukruta je bilo dovoljno aproksimirati s *tie* vezama. *Tie* veza spaja dvije odvojene površine tako da među njima nema relativnih pomaka, a spajanje je neovisno o različitosti mreže konačnih elemenata na pojedinim površinama [20]. Kako bi se takva kruta veza definirala na površini spoja vretena i podložne ploče modelu su dodijeljene particije na mjestu spojeva navedenih elemenata. Dodatno su na modelu nestandardnog uzorka stope definirane i particije na vretenu i podložnoj ploči na površini spoja s ukrutama. Pri definiranju krute veze ukrutama je dodijeljena *master* uloga dok su vreteno i podložna ploča *slave* elementi.

Na vrhu vretena definirana je referentna točka u središtu poprečnog presjeka koja služi kao mjesto unosa opterećenja. Površini poprečnog presjeka zadano je kinematsko ograničenje (*constraint*) čime je njeno ponašanje svedeno na ponašanje referentne točke. Navedeno je ostvareno naredbom *coupling*. Opterećenje je zadano u posebno definiranom koraku, različitom od inicijalnog, preko pomaka referentne točke na vrhu vretena. Pomak je zadan linearno do vrijednosti od 50 mm za nestandardnu stopu i 130 mm za standardnu stopu.

Za definiranje mreže konačnih modela su korišteni prostorni konačni elementi C3D20R. Takvi konačni elementi imaju kvadratni oblik s 20 točaka integracije u kojima se provodi reducirana integracija. Maksimalna veličina konačnih elemenata varira ovisno o području koje je od većeg interesa za proučavanje. Na vretenu standardnog i nestandardnog uzorka definirana je mreža konačnih elemenata

maksimalne veličine od 4 mm jer se na njemu očekuje plastifikacija i otkazivanje uzorka. Nedeformirani modeli standardnog i nestandardnog uzorka stope skele s mrežom konačnih elemenata prikazani su na slici 6.1.



Slika 6.1 FEM modeli detalja stope skele

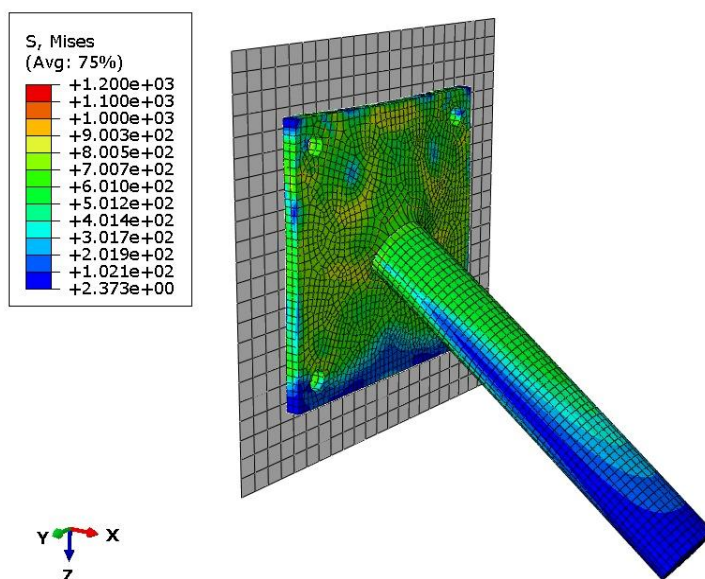
6.3. Numerički rezultati i diskusija

6.3.1. Ponašanje uzorka stope skele opterećenog na savijanje uslijed poprečne sile

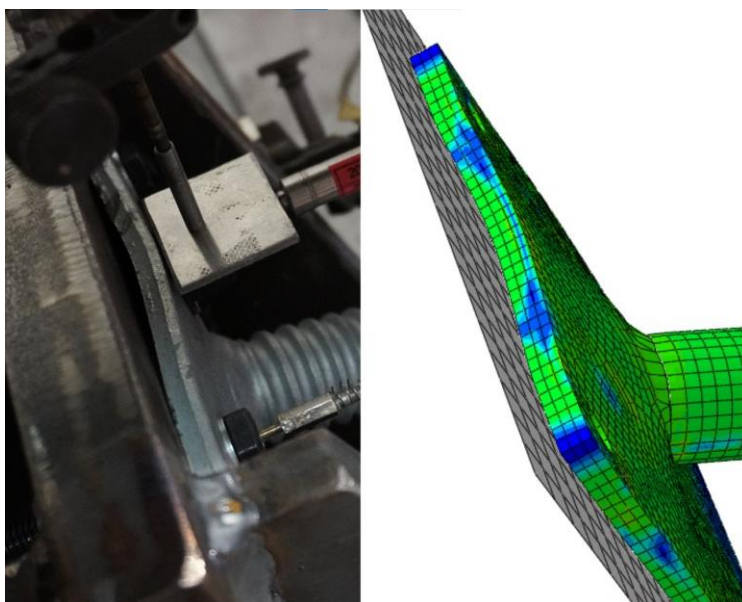
Numeričkim simulacijama savijanja standardnog i nestandardnog uzorka stope skele dobivene su krivulje odnosa sile i pomaka ($F-\Delta$ krivulje). Referentna točka u kojoj se promatraju navedene krivulje u oba slučaja je vrh vretena u kojem se nanosi opterećenje, što je u laboratorijskom ispitivanju analogno očitavanju sile i pomaka s traverze preše, odnosno mjernog mjesta PV1 (vidi točku 5.4.2.).

Način deformiranja numeričkog modela standardnog detalja stope skele je gotovo istovjetan načinu deformiranja standardnih uzoraka u laboratorijskom ispitivanju. Deformirani oblik standardnog modela stope skele je prikazan na slici 6.2. Primjetna je značajna deformacija podložne ploče uslijed savijanja te otkazivanje vretena plastifikacijom iznad spoja s podložnom pločom, što je vidljivo na slici 6.3.

Udaljavanjem vretena od spoja s pločom deformacije vretena su sve manje, a pomaci sve veći.

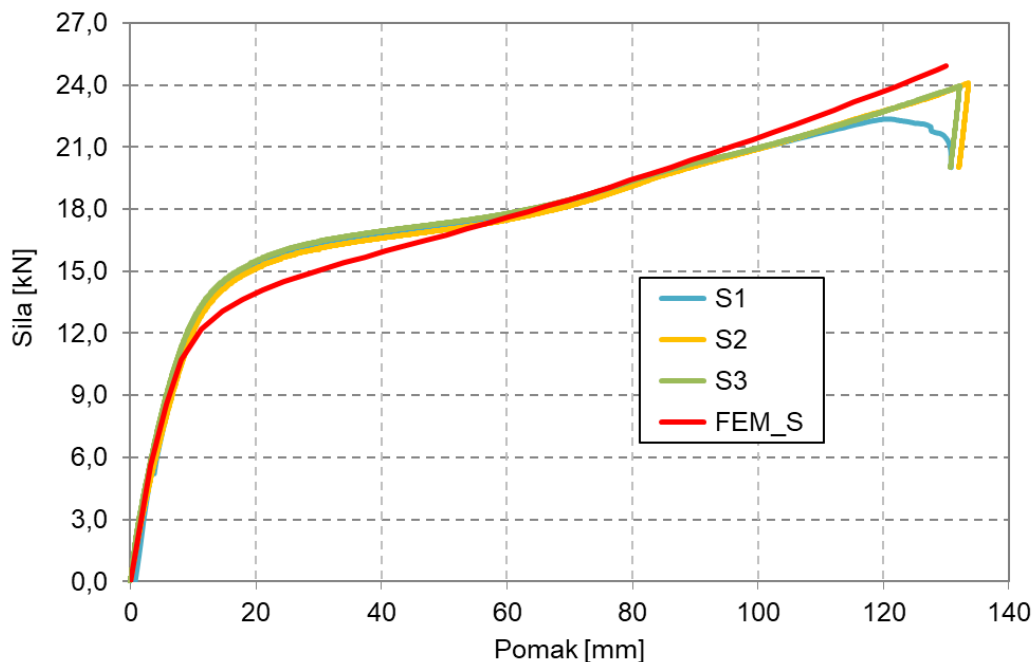


Slika 6.2 Prikaz deformiranog numeričkog modela S skupine



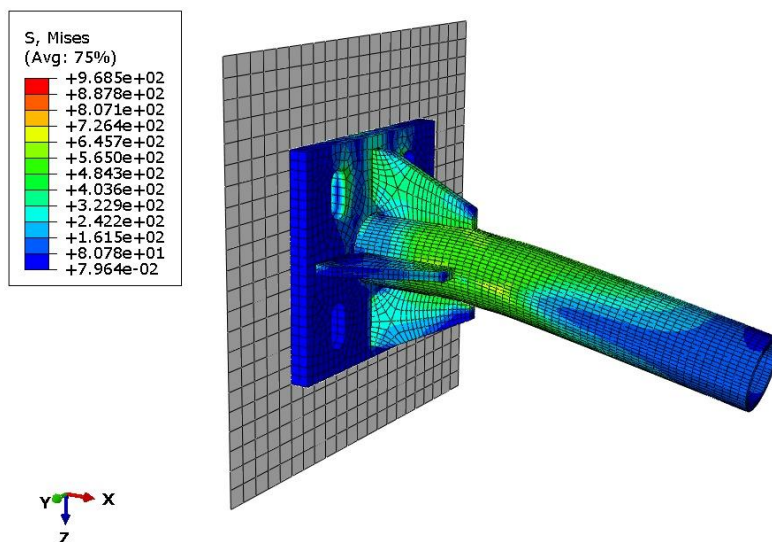
Slika 6.3 Usporedba deformirane podložne ploče S uzorka

Usporedba krivulja sila-pomak numeričkog modela s laboratorijski dobivenim rezultatima prikazana je na slici 6.4. Na dijagramu usporedbe može se primijetiti identičan nagib krivulje u elastičnom području za sva tri standardna laboratorijska uzorka i standardni numerički model što znači da je krutost numeričkog modela zadovoljavajuća. Do nepodudaranja rezultata dolazi u postkritičnom području, međutim u okvirima ove analize navedena odstupanja nisu od velike važnosti za donošenje zaključaka o ponašanju detalja stope skele.

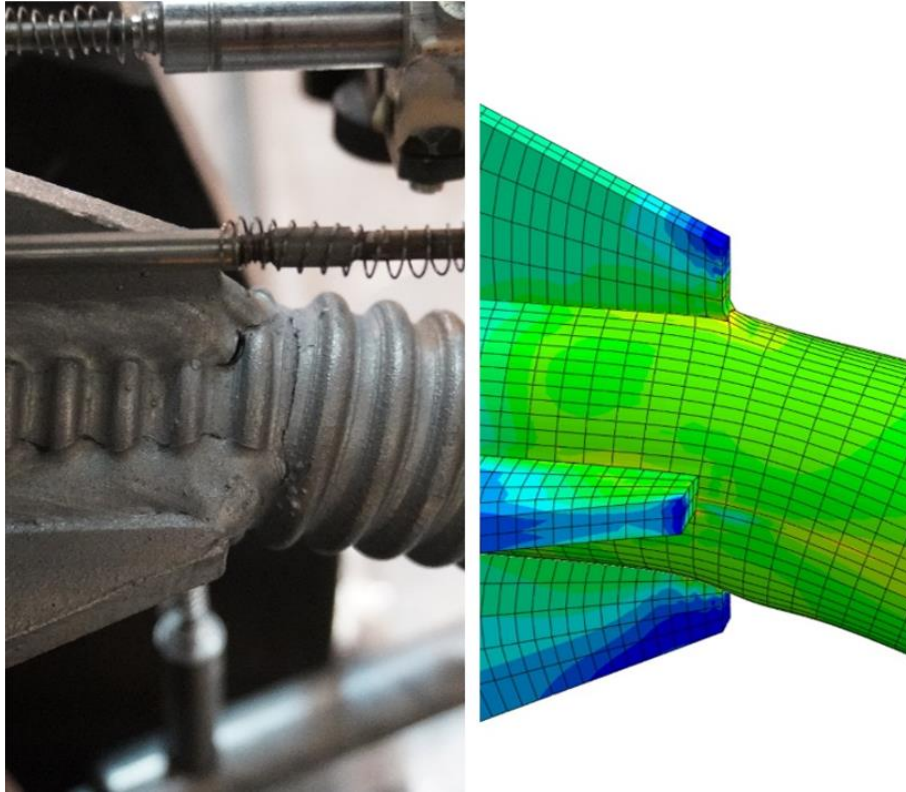


Slika 6.4 Usporedba dijagrama sila-pomak FE analize i ispitivanja S skupine

Nestandardni numerički model pokazuje oblik otkazivanje vretena iznad ukrućenja, slika 6.5. koji je analogan obliku otkazivanja laboratorijskih uzoraka, slika 6.6. Podložna ploča i ukrute nisu doživjeli značajnije deformacije, što je u skladu s prethodno navedenim.

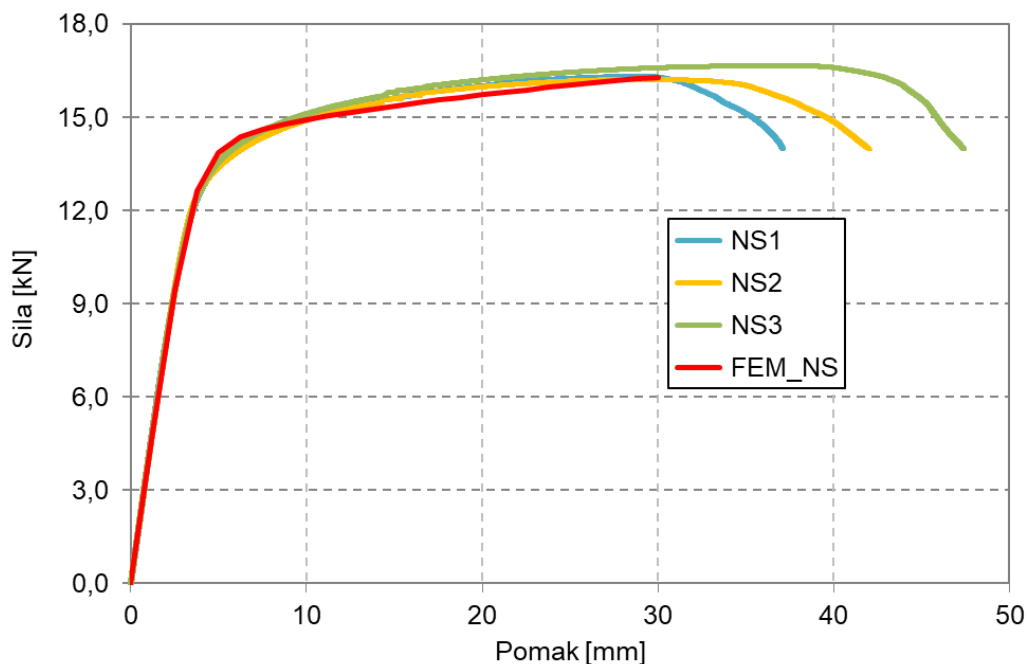


Slika 6.5 Prikaz deformiranog numeričkog modela NS skupine



Slika 6.6 Usporedba deformirane podložne ploče NS uzorka

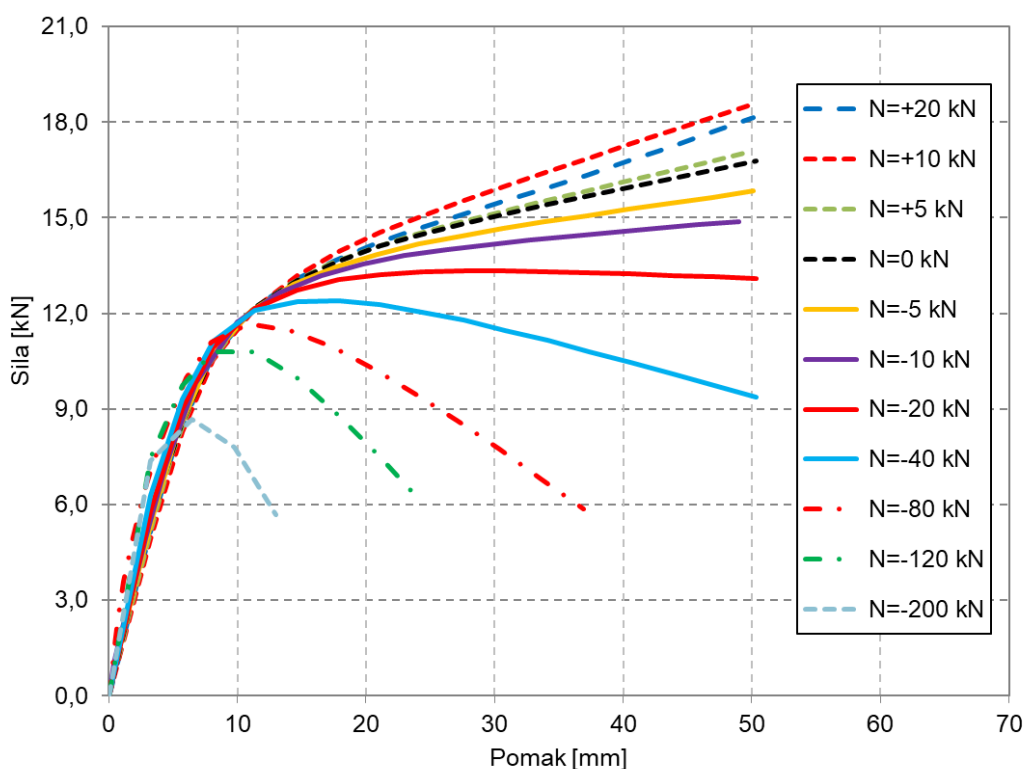
Simulacija nestandardnog numeričkog modela je prekinuta nakon nanesenog pomaka od 30 mm pri kojem je došlo do otkazivanja uzorka u laboratorijskim ispitivanjima. Sila dobivena pri tom pomaku u numeričkom modelu jednaka je 16,3 kN. Usporedba krivulje sila-pomak numeričkog modela s krivuljama dobivenim eksperimentalnim ispitivanjem prikazana je na slici 6.7. Vidljivo je da nestandardni numerički model stope dobro aproksimira stvarno ponašanje uzoraka ispitanih u laboratoriju s obzirom da se krivulje sila-pomak gotovo potpuno preklapaju, kako u elastičnom, tako i u postkritičnom području.



Slika 6.7 Usporedba dijagrama sila-pomak FE analize i ispitivanja S skupine

Zbog ograničenja postava ispitivanja, u laboratorijskim uvjetima nije bilo moguće ispitati utjecaj uzdužne sile na ponašanje uzoraka stopa. Ispitivanjem uzoraka u preši je nanošeno smo horizontalno opterećenje bez uzdužne sile. Utjecaj uzdužne sile na standardnom i nestandardnom detalju stope skele su dobiveni numeričkom analizom nakon kalibracije oba modela, a rezultati su prikazani u obliku krivulja odnosa sile i pomaka. Rezultati na slici 6.8. i 6.9. prikazuju simulaciju ponašanja pojedinog detalja standardne i nestandardne stope skele uslijed savijanja i uzdužne sile. Prije same analize bilo je potrebno odrediti opseg simulacija, a obrađene su vrijednosti uzdužnih sila koje se mogu pojaviti u stupovima modularne skele prilikom njezine uporabe. Time je opseg analize dovoljno opširan da se mogu donijeti valjani i vjerodostojni zaključci.

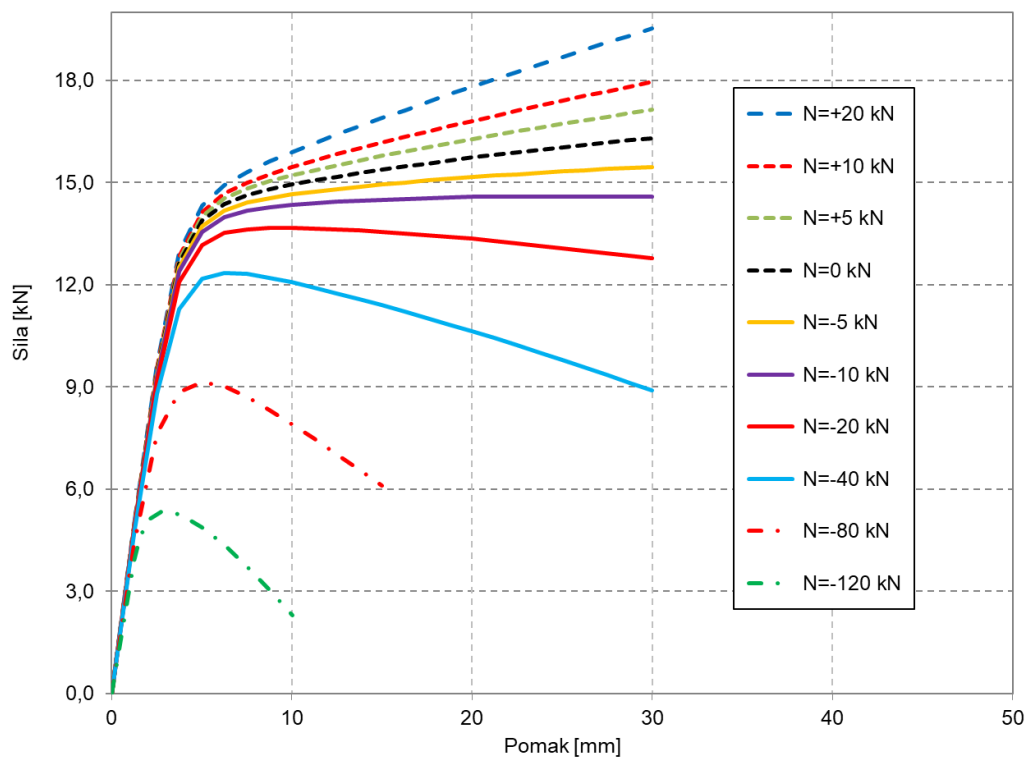
6.3.2. Numerička analiza utjecaja uzdužne sile na ponašanje detalja stope



Slika 6.8 Utjecaj uzdužne sile na standardnom detalju stope skele

Kod standardnog detalja stope skele pri opterećenju uzdužnom vlačnom silom je vidljiv porast otpornosti, a pri opterećenju uzdužnom tlačnom silom pad otpornosti. Uzdužna vlačna sila nije imala velik utjecaj na ponašanje uzoraka u elastičnom području, ali je utjecala na ponašanje uzoraka u postkritičnom području. Za vrijednosti uzdužne tlačne sile do -20 kN također nije primijećen značajan utjecaj na ponašanje uzorka u elastičnom području. Za vrijednost sile od -40 kN otpornost uzorka počinje padati. Pri sili od -80 kN i -120 kN zadržana je značajna otpornost, dok mu je pri sili od -200 kN upitna mogućnost primjene zbog značajnog pada otpornosti.

Utjecaj vlačne sile je i kod nestandardnog detalja stope skele vidljiv u porastu otpornosti. Kod nestandardnog detalja tlačna sila od -20 kN ne reducira uvelike otpornost dok se pri sili od -80 kN ona gotovo prepolovi. Za vrijednost sile od -120 kN upitna je mogućnost primjene stope za oslanjanje skele.



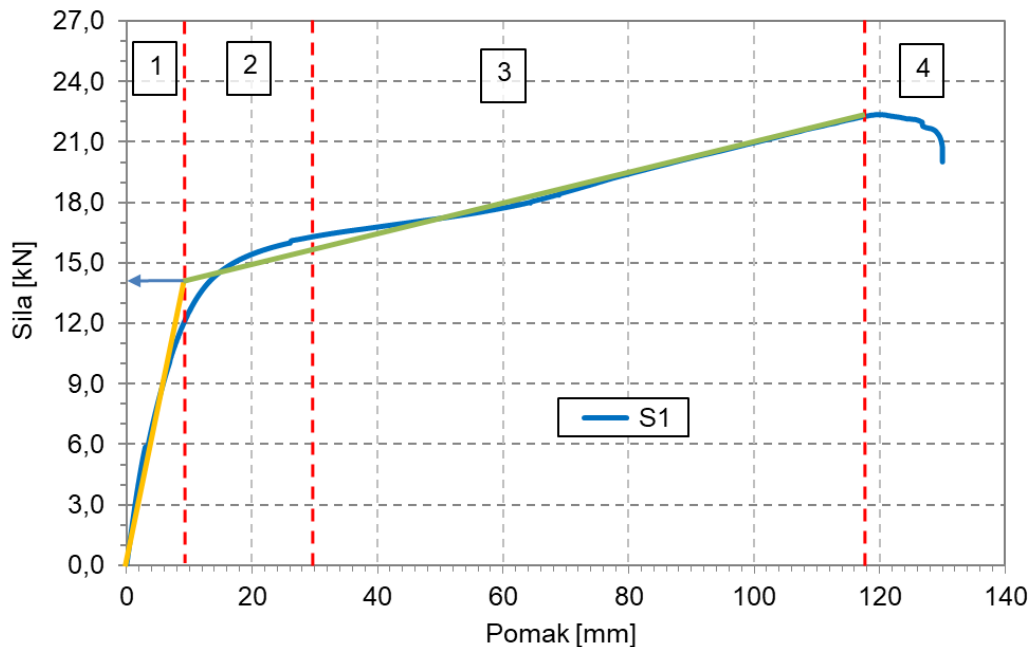
Slika 6.9 Utjecaj uzdužne sile na standardnom detalju stope skele

Kod obje skupine uzoraka vidljivo je da uzdužna vlačna sila uz djelovanje poprečne sile, odnosno momenta savijanja povećava otpornost priključka, a tlačna smanjuje. Poznato je da ukoliko na poprečnom presjeku istodobno djeluju moment savijanja i uzdužna tlačna sila, smanjuje se mogućnost ostvarivanja plastičnog momenta M_{pl} [24] što dodatno potvrđuje vjerodostojnost numeričke analize. Iz usporedbe dijagrama je vidljivo da se za obje skupine detalja stope skele za manje vrijednosti uzdužnih sila (od -20 kN do 20 kN) utjecaj uzdužne sile više očituje u postkritičnom dijelu dijagrama, odnosno nakon popuštanja. Standardna je stopa tek pri sili od -200 kN pokazala značajan pad otpornosti gdje joj je primjena upitna, dok se isti problem kod nestandardne stope javlja već pri sili od -120 kN. Zaključujemo da je kod S uzoraka utjecaj tlačne sile manji nego kod NS uzoraka zbog veće površine poprečnog presjeka vretena.

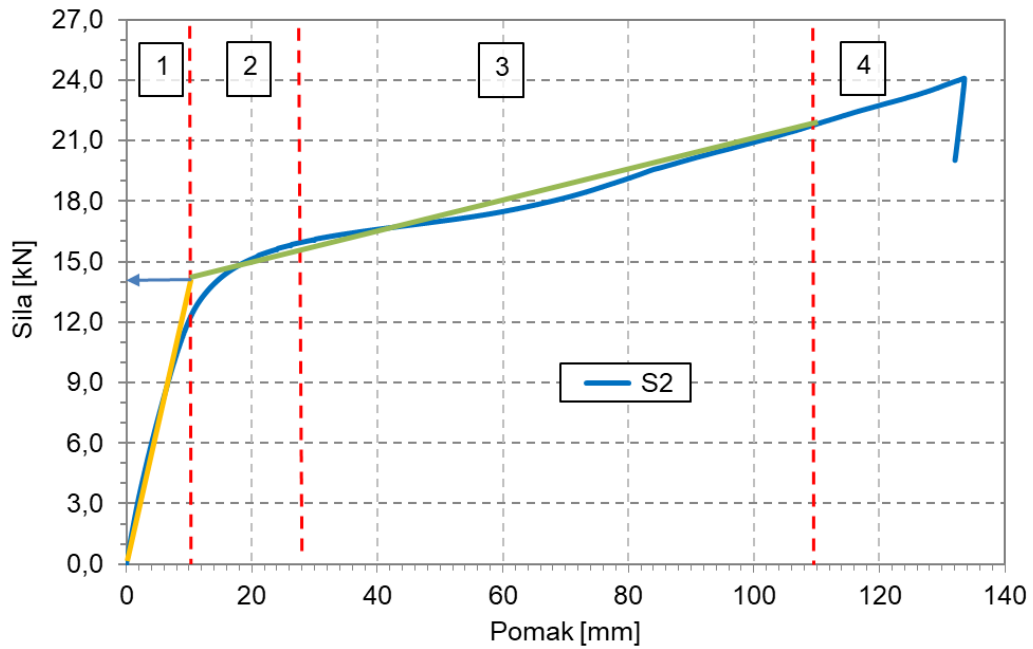
7. DISKUSIJA REZULTATA

7.1. Usporedba rezimiranih rezultata otpornosti

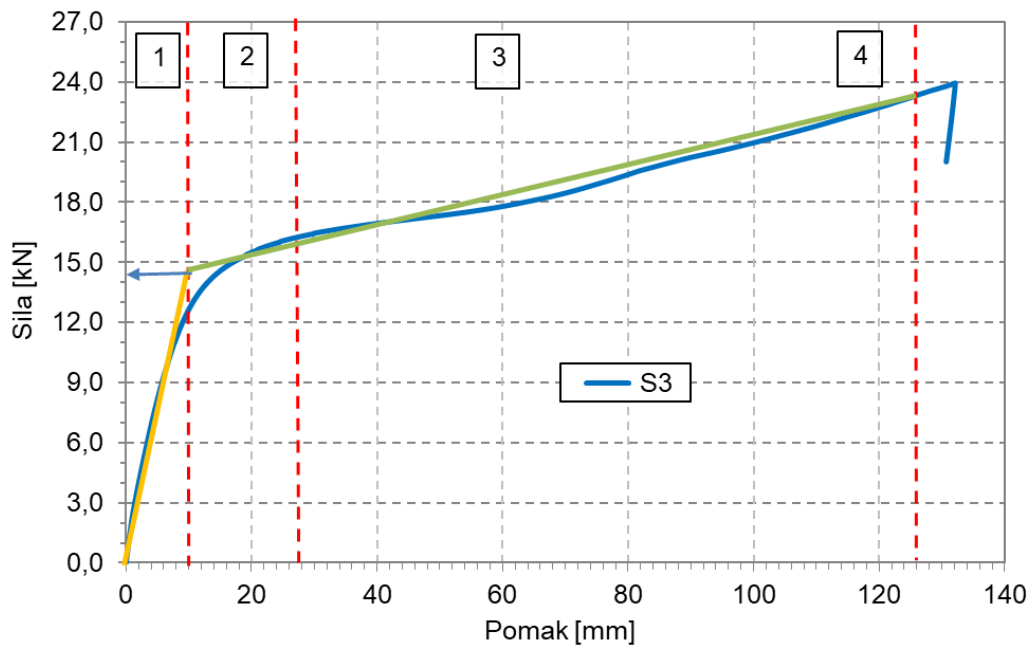
U nastavku je prikazan pregled rezultata dobivenih trima metodama korištenim u radu: analitički, eksperimentalno i numerički. Napravljena je usporedba otpornosti dviju skupina uzoraka elementa stope skele opterećene poprečnom silom. Otpornost standardnih i nestandardnih uzoraka pri laboratorijskom ispitivanju i numeričkoj simulaciji dobivena je aproksimacijom dijagrama sila-pomak bilinearnim dijagramom. Prikaz dobivenih otpornosti dan je na slikama od 7.1. do 7.8. sa srednjim vrijednostima prikazanim u tablici 7.1. U tablici 7.2. su prikazani rezimirani rezultati otpornosti. Vrijedi napomena da je analitička otpornost standardnih uzoraka određena preko plastične otpornost punog vretena na savijanje za granicu popuštanja od 355 MPa.



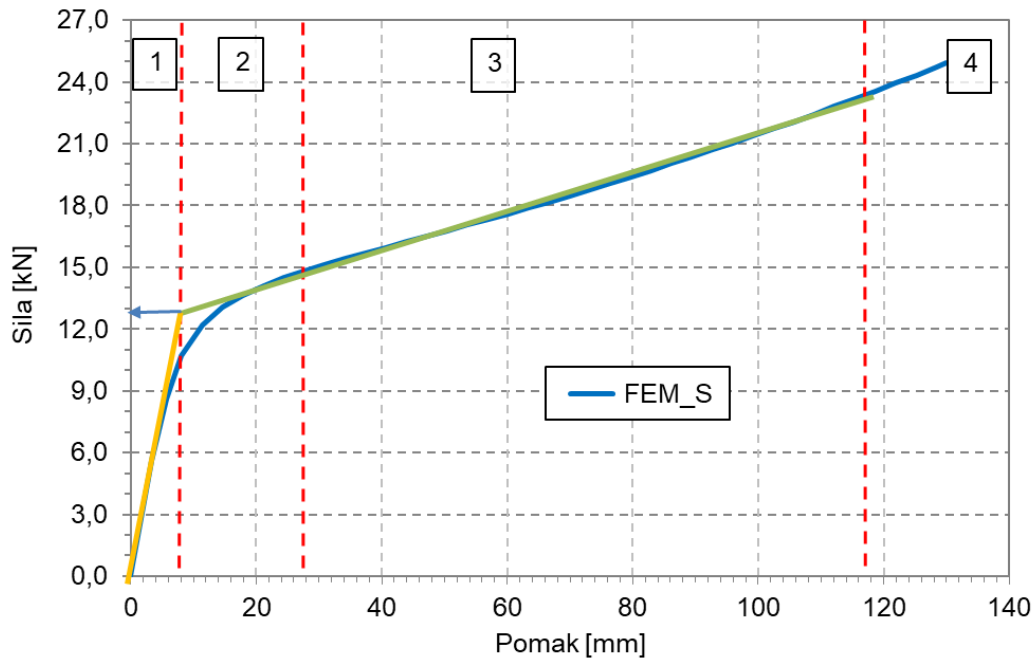
Slika 7.1 Određivanje otpornosti uzorka S1



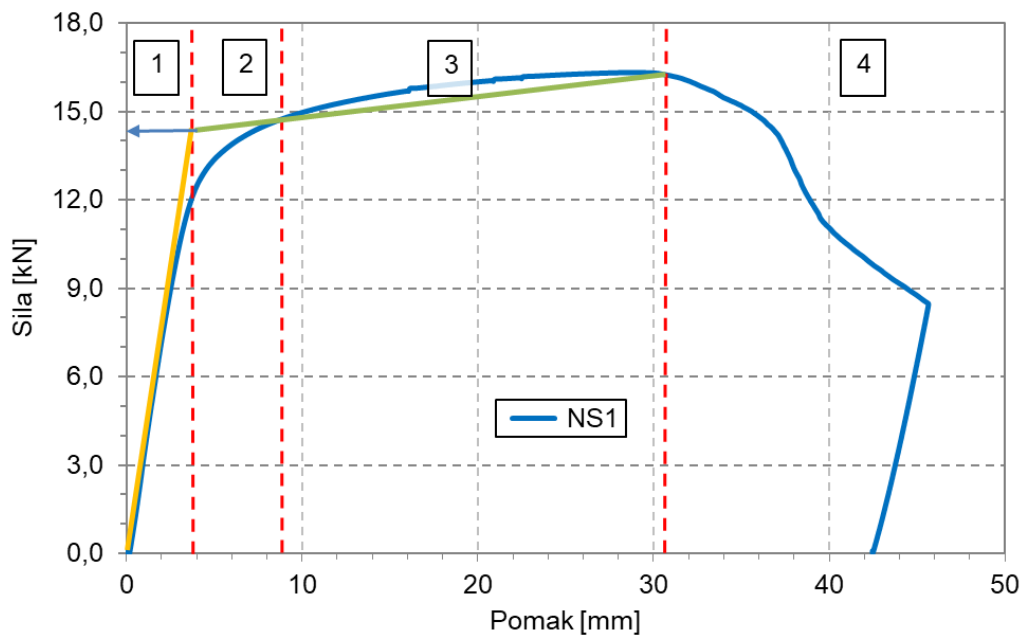
Slika 7.2 Određivanje otpornosti uzorka S2



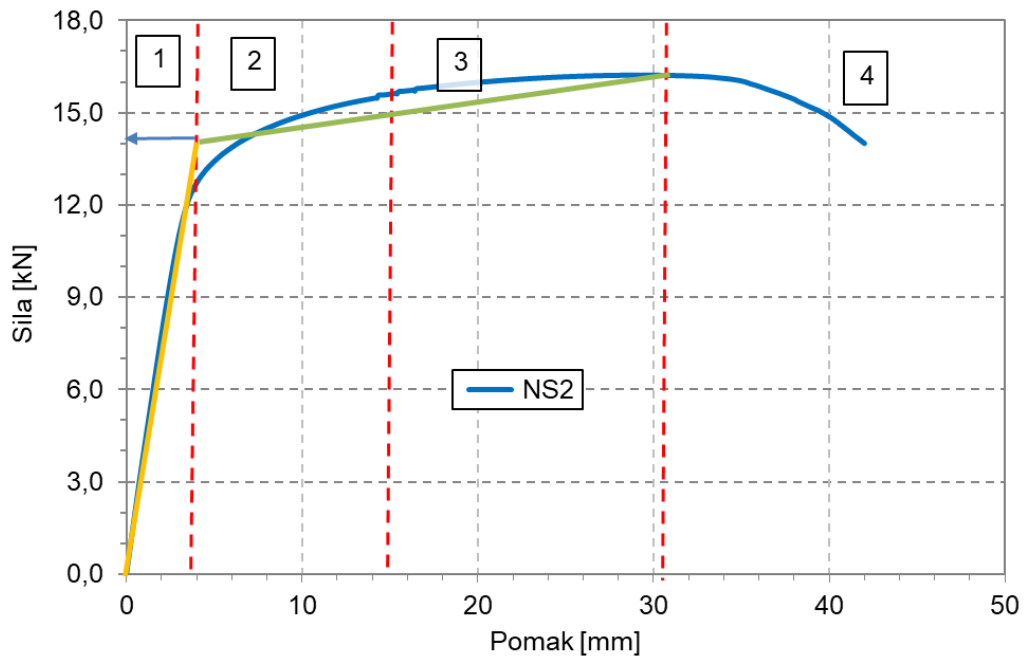
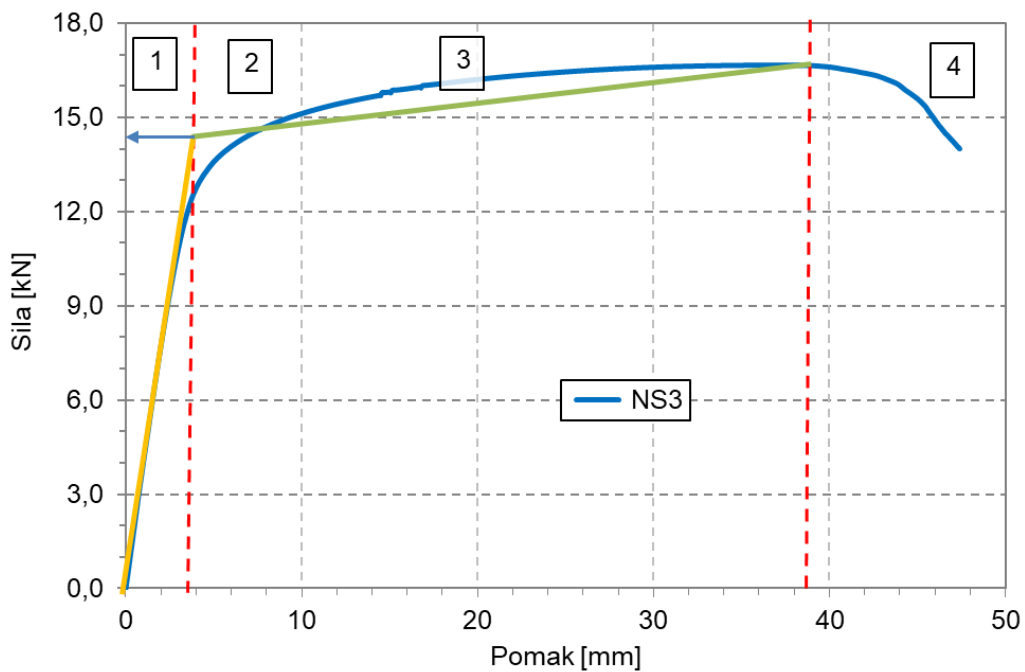
Slika 7.3 Određivanje otpornosti uzorka S3

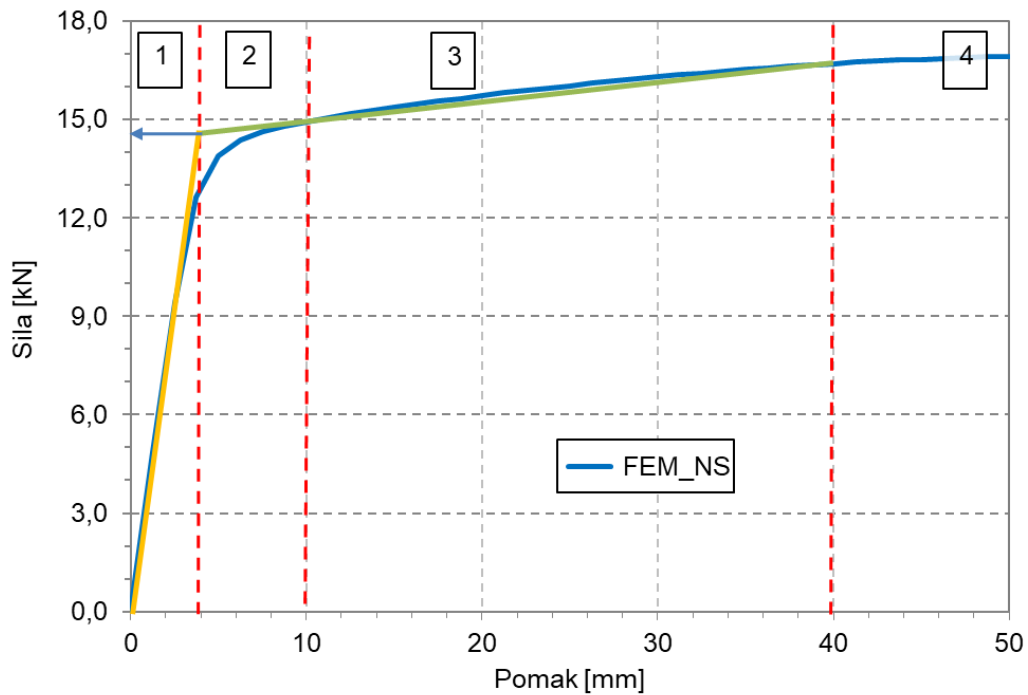


Slika 7.4 Određivanje otpornosti modela FEM_S



Slika 7.5 Određivanje otpornosti uzorka NS1

**Slika 7.6** Određivanje otpornosti uzorka NS2**Slika 7.7** Određivanje otpornosti uzorka NS3



Slika 7.8 Određivanje otpornosti modela FEM_NS

Tablica 7.1 Srednje vrijednosti otpornosti iz laboratorijskih ispitivanja

Standardni uzorak	Otpornost [kN]	Nestandardni uzorak	Otpornost [kN]
S1	14,2	NS1	14,4
S2	14,1	NS2	14,2
S3	14,2	NS3	14,5
Srednja vrijednost	14,2	Srednja vrijednost	14,4

Tablica 7.2 Rezime otpornosti detalja stope skele

Uzorak/Otpornost	Analitička procjena [kN]	Laboratorijsko ispitivanje [kN]	Numerička simulacija - Abaqus [kN]
Standardna stopa	7,63	14,2	12,9
Nestandardna stopa	6,55	14,4	14,7

Usporedbom rezultata svih triju metoda vidljivo je znatno odstupanje analitičkih rezultata od laboratorijskih i numeričkih rezultata. Analitičkim metodama su dobivene vrijednosti otpornosti uzoraka manje od onih dobivenih laboratorijski i numerički. Analitička otpornost standardnog detalja stope iznosi 7,63 kN, dok je analitička otpornost nestandardnog detalja stope svega 6,55 kN što je približno dvaput manje od otpornosti dobivenih laboratorijskim ispitivanjima. Navedeno odstupanje može se objasniti činjenicom da se kod analitičkih proračuna uzimaju nazivne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala koje predstavljaju donje (nepovoljne) vrijednosti svojstava materijala.

Numeričkim modelom je ponašanje obje skupine uzoraka stope skele vjerodostojno simulirano te se numerički dobivena otpornost razlikuje od laboratorijski dobivene otpornosti za 9,23 % u slučaju standardne i 0,69 % u slučaju nestandardne stope skele. Srednja vrijednost otpornosti, zanemarujući analitički rezultat, može se uzeti kao 14,6 kN.

8. ZAKLJUČAK

8.1. Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja

Cilj ovog rada je karakterizacija ponašanja nestandardnog detalja oslanjanja stope skele primijenjenog kod izvedbe skela za osiguranje od urušavanja i obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale. Provedena su laboratorijska ispitivanja i numeričke analize kako bi se potvrdile pretpostavke korištene pri projektiranju skele, ali i omogućila primjena takvih detalja u budućim projektima. Također, napravljena je usporedba ponašanja primijenjenog nestandardnog (NS) i standardnog (S) detalja stope koji predstavlja tipski detalj oslanjanja modularne skele.

Nakon provedbe laboratorijskih ispitivanja i složenih numeričkih simulacija, može se dati ocjena hipoteza iznesenih na početku rada. Potvrđena je pretpostavka o načinu otkazivanja obje grupe uzoraka plastifikacijom poprečnog presjeka vretena pri čemu nije došlo do otkazivanja vijaka ni zavara iako je otkazivanje nastupilo na drugim mjestima. Naime, standardni detalj je otkazao na mjestu spoja vretena i ploče, dok je nestandardni detalj otkazao na presjeku gdje počinju ukrućenja. Standardni detalj stope pokazao je veću duktilnost, ali i manju krutost, pri savijanju od nestandardnog. Nestandardni detalj stope pokazuje znatno kruće ponašanje, ali mu je pomak pri otkazivanju, odnosno duktilnost manja. Oba uzorka pokazala su dovoljnu rotacijsku sposobnost prilikom ispitivanja.

U laboratorijskim ispitivanjima dodatno je utvrđeno različito ponašanje podložne ploče i vijaka standardnog (S) i nestandardnog (NS) detalja. Kod standardnih uzoraka došlo je do produljenja vijaka u vlak u te značajnih deformacija podložne ploče uslijed savijanja. Kod nestandardnih uzoraka deformacije navedenih komponenti su zanemarive. Razlog tomu je veća debljina podložne ploče nestandardnog detalja te formiranje duljih linija tečenja zbog učinka ukrućenja.

Budući da analitički postupci za procjenu otpornosti standardnog i nestandardnog detalja stope na djelovanje horizontalne sile znatno podcjenjuju laboratorijski dobivene otpornosti, provedene su detaljnije numeričke simulacije. Numerički modeli izrađeni u programskom paketu ABAQUS su kalibrirani obzirom na eksperimentalne zapise. Tako dobivene krivulje sila-pomak omogućuju adekvatno

karakteriziranje ponašanja standardnog i nestandardnog detalja stope skele čak i za druge kombinacije opterećenja od onih na koje su ispitani. Nadalje, budući da utjecaj uzdužne sile nije uzet u obzir prilikom laboratorijskih ispitivanja, provedena je parametarska numerička analiza dodavanjem uzdužnog vlačnog i tlačnog opterećenja vretena u numerički model koji je savijan poprečnom silom. Rezultati su u skladu s pretpostavkom o povećanju otpornosti na savijanje pri djelovanju uzdužne vlačne sile i redukciji otpornosti pri djelovanju tlačne sile.

Provedenim istraživanjem je dokazano da je primijenjeni nestandardni detalj stope skele pouzdan za oslanjanje 70 metarskih skela oko tornjeva Zagrebačke katedrale koje su izložene složenim kombinacija djelovanja. Štoviše, potvrđena je opravdanost korištenja primijenjenog nestandardnog detalja stope skele u građevinskoj praksi u slučajevima gdje se skela ne oslanja direktno na tlo niti ima česta pridržanja po visini.

8.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Na temelju provedenih ispitivanja i analiza mogu se preporučiti sljedeće smjernice za daljnja istraživanja:

- Provođenje laboratorijskih ispitivanja drugih konfiguracija stopa koje nisu tipizirane od strane proizvođača, a zadovoljavaju specifične zahtjeve nametnute projektantskim rješenjima.
- Provođenje opsežnijih parametarskih numeričkih analiza za nestandardne detalje stope kojim bi se obuhvatile različite pozicije djelovanja horizontalne sile po visini vretena, varijacije debljina podložne ploče, dimenzije ukruta i korištenje punog vretena.

9. ZAHVALE

Zahvaljujemo se Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na korištenju Laboratorija za ispitivanje konstrukcija i Katedri za metalne konstrukcije pri Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Sveučilišta u Zagrebu koja nam je omogućila istraživanje provedeno u okviru izrade ovog rada.

Najveću zahvalu upućujemo mentoru prof. dr. sc. Davoru Skejiću na predanom vodstvu kroz stvaranje ovog rada, ukazanom povjerenju, idejama te svim korisnim savjetima koje je nesebično dijelio sa nama.

Također se želimo zahvaliti izv. prof. dr. sc. Marku Bartolcu na pruženoj pomoći prilikom laboratorijskog ispitivanja i mjerenjima koja su prethodila ispitivanju.

Posebno se zahvaljujemo asistentu Ivanu Čudini, mag.ing.aedif. na uloženom vremenu, strpljenju i volji koju je ukazao da nas uputi u istraživanje i nova saznanja.

Također, hvala svim djelatnicima laboratorija koji su nam uz ugodnu radnu atmosferu omogućili jedno od posljednjih ispitivanja prije selidbe fakulteta!

POPIS LITERATURE

- [1] Preuzeto s web stranice: <https://katedrala.hr/hr/povijest-zagrebacke-katedrale/753> (Pristup: 5.1.2023.)
- [2] Preuzeto s web stranice: <https://www.hkv.hr/reportae/lj-krinjar/3425-avlova-glava-u-zagrebakoj-katedrali-35.html> (Pristup: 6.1.2023.)
- [3] Preuzeto s web stranice: <https://www.zg-nadbiskupija.hr/dokumenti/crkve-i-crkveni-objekti-osteceni-u-potresima/zagrebacka-katedrala-zatvorena-zbog-teskih-ostecenja-u-potresima> (Pristup: 6.1.2023.)
- [4] Fototeka Ministarstva kulture RH, inv. br.10658
- [5] Aničić, D. (2000). 'Zagrebačka katedrala u potresu 1880. i njezina današnja obnova', *Građevinar*, 52(11.), str. 655-661. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/13069> (Pristup: 18.04.2023.)
- [6] Preuzeto s web stranice: <https://katedrala.hr/hr/izvjesce-o-ostecenjima-obavljenim-radovima-i-planovima-obnove-zagrebacke-katedrale/749> (Pristup: 6.1.2023.)
- [7] Preuzeto s web stranice: https://www.grad.unizg.hr/download/repository/10_TGV_skele.pdf (Pristup: 5.1.2023.)
- [8] Rokvić, N.(2020.) *Zaštita na radu pri uporabi skela u građevinarstvu*. Završni rad. Mjesto izdavanja: Karlovac
- [9] Preuzeto s web stranice: <http://uznr.mrms.hr/uporaba-i-siguran-rad-sa-skelama/> (Pristup: 5.1.2023.)
- [10] Preuzeto s web stranice: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/en/index.cfm/search/?trisaction=search.detail&year=2020&num=514&dLang=HR> (Pristup:15.03.23.)
- [11] Preuzeto s web stranice: <https://www.linkedin.com/pulse/comparison-tubular-scaffolding-modular-sarah-fly> (Pristup: 26.03.23.)
- [12] Valerii, V. (2011.) *Comparison od Scaffolding Systems in Finland and in Russia*- Batchelor's theses. Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta.
- [13] Preuzeto s web stranice: <https://www.turboscaffolding.com.au/blog/the-basic-accessories-used-in-scaffolding/> (Pristup: 6.1.2023.)

-
- [14] Skejić, D. (ur.) (2015.) *Čelične konstrukcije* - priručnik. Zagreb. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- [15] Peng, J. L., Wang, S. H., Wang, C. S., & Yang, J. P. (2021). Stability study on scaffolds with inclined surfaces and extended jack bases in construction. *Advanced Steel Construction*, 17(1), 73–83.
<https://doi.org/10.18057/IJASC.2021.17.1.9>
- [16] Preuzeto s web stranice: https://files.solvecms.com/layher-no/b7e0e6a/EN_Allround%20Technical%20Brochure.pdf (pristup 8.1.2023.)
- [17] HRN EN 1993-1-1:2014, EC3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade
- [18] HRN EN 1993-1-8:2008/NA, EC 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-8: Proračun priključaka (Nacionalni dodatak)
- [19] Eksperimentalne metode 1- predavanje. Dostupno: https://www.grad.unizg.hr/download/repository/3_EM.pdf (Pristup: 10.2.2023.)
- [20] Dassault Systeme, ABAQUS, User's Manual, Version 6.12 2012
- [21] M. Meštrović, 2020. Skripta „Metoda konačnih elemenata“, Zagreb
- [22] Skejić, D., Dujmović, D., i Lukačević, I. (2011). 'Numerička analiza pojasnih kutnika pri savijanju', *Građevinar*, 63(04.), str. 323-334. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/67566> (Datum pristupa: 25.04.2023.)
- [23] European Committee for Standardization (CEN). FprEN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1–1: General rules and rules for buildings (FprEN 1993-1-1:2022); CEN: Brisel, Belgija, 2022.
- [24] B. Androić, D. Dujmović, and I. Džeba, *Metalne konstrukcije 1*. Zagreb: IGH, 1994.

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Zagrebačka katedrala prije potresa 1880. [1].....	1
Slika 1.2 Oštećenja na katedrali nakon potresa 1880.[2].....	2
Slika 1.3 Prikaz porozne strukture oštećenog kamena na tornjevima.....	3
Slika 1.4 Skela na južnom tornju za vrijeme sanacije 1938.-1940.[4]	3
Slika 1.5 Kamen na sjevernom tornju.....	4
Slika 1.6 Vlačne pukotine u svodu Zagrebačke katedrale	5
Slika 1.7 Propagacija pukotina uzrokovanih potresom [6]	6
Slika 1.8 Oštećenje skele tornja nakon potresa.....	6
Slika 1.9 Računalni modeli Zagrebačke katedrale [6].....	7
Slika 1.10 Zagrebačka katedrala u studenom 2022 (lijevo) i travnju 2023. (desno)	8
Slika 2.1 Skela na apsidi Zagrebačke katedrale	1
Slika 2.2 Drvena potporna skela u crkvi sv. Nikole i Vida u Žažini.....	2
Slika 2.3 Dijelovi lagane cijevne skele.....	5
Slika 2.4 Rozeta s klinovima	5
Slika 2.5 Stopa skele na drvenoj mosnici	6
Slika 2.6 Prikaz neovisnih konstrukcija skele	7
Slika 2.7 Faze izvedbe skela za zapadnoj strani katedrale.....	7
Slika 2.8 Platforma za oslanjanje skele na zapadnoj strani katedrale.....	8
Slika 2.9 Detalj spajanja skele.....	9
Slika 2.10 Primjeri vrsta stopa skele [16].....	10
Slika 2.11 Skica standardnog i nestandardnog detalja stope.....	11
Slika 4.1 Shematski prikaz opterećenja stope skele	17
Slika 4.2 Oznake za udaljenosti vijaka	18
Slika 4.3 Shematski prikaz opterećenja šupljeg vretena i poprečnog presjeka zamjenskog elementa.....	20
Slika 4.4 FEM model IDEA SatiCa	23
Slika 5.1 Nacrt adaptera za ispitivanje stopa skele.....	25
Slika 5.2 Adapter stope skele.....	25
Slika 5.3 Nacrt standardne stope prilagođene ispitivanju	26
Slika 5.4 Nacrt nestandardne stope prilagođene ispitivanju	27
Slika 5.5 Uzorak detalja S (lijevo) i NS (desno) stope skele	27
Slika 5.6 Mjesto unosa opterećenja.....	28
Slika 5.7 Shema položaja postavljenih mjernih uređaja.....	29
Slika 5.8 Postavke ispitivanja.....	30
Slika 5.9 Prikaz LVDT uređaja na mjestima PV3, PH1 i PH2	30
Slika 5.10 Standardni detalj stope skele.....	31
Slika 5.11 Nestandardni detalj stope skele.....	33
Slika 5.12 Vijci s pripadajućim oznakama.....	34
Slika 5.13 Oznake za mjerenje vijčanog sklopa.....	35
Slika 5.14 Statička preša Zwick Roell.....	36
Slika 5.15 Dijagram sila-pomak.....	38
Slika 5.16 Dijagram sila-pomak za uzorke S1-S3.....	39
Slika 5.17 Standardni uzorci stope nakon ispitivanja.....	40
Slika 5.18 Uzorci S1-S3 nakon ispitivanja	40
Slika 5.19 Dijagram sila-pomak preše	42

Slika 5.20 Dijagram sila-pomak za uzorke NS1-NS3.....	42
Slika 5.21 Nestandardni uzorci stope nakon ispitivanja	43
Slika 5.22 Dijagram sila-pomak za sve ispitane uzorke	44
Slika 5.23 Uzorci stope nakon ispitivanja	44
Slika 5.24 Dijagram sila pomak za uzorak S1 na mjestima PV1- PV3.....	45
Slika 5.25 Dijagram sila pomak za uzorak S2 na mjestima PV1-PV3.....	45
Slika 5.26 Dijagram sila pomak za uzorak S3 na mjestima PV1-PV3.....	46
Slika 5.27 Dijagram sila pomak za uzorak NS1 na mjestima PV1-PV3	46
Slika 5.28 Dijagram sila pomak za uzorak NS2 na mjestima PV1-PV3	47
Slika 5.29 Dijagram sila pomak za uzorak NS3 na mjestima PV1-PV3	47
Slika 5.30 Dijagram sila pomak na mjestima PV1-PV3 na S i NS uzorcima	48
Slika 5.31 Dijagram sila pomak za uzorak S1 na mjestima PH1 i PH2	49
Slika 5.32 Dijagram sila pomak za uzorak S2 na mjestima PH1 i PH2	49
Slika 5.33 Dijagram sila pomak za uzorak S3 na mjestima PH1 i PH2	50
Slika 5.34 Dijagram sila pomak za uzorak S3 na mjestima PH1 i PH2	50
Slika 5.35 Dijagram sila pomak za uzorak NS2 na mjestima PH1 i PH2.....	51
Slika 5.36 Dijagram sila pomak za uzorak NS3 na mjestima PH1 i PH2.....	51
Slika 5.37 Dijagram sila pomak na mjestima PH1 i PH2 na S i NS uzorcima	52
Slika 5.38 Deformacija podložne ploče i punog vretena S uzorka	53
Slika 5.39 Propagacija pukotina na NS uzorku.....	54
Slika 5.40 Mjesto loma uzorka	54
Slika 6.1 FEM modeli detalja stope skele.....	58
Slika 6.2 Prikaz deformiranog numeričkog modela S skupine	59
Slika 6.3 Usporedba deformirane podložne ploče S uzorka	59
Slika 6.4 Usporedba dijagrama sila-pomak FE analize i ispitivanja S skupine	60
Slika 6.5 Prikaz deformiranog numeričkog modela NS skupine.....	60
Slika 6.6 Usporedba deformirane podložne ploče NS uzorka.....	61
Slika 6.7 Usporedba dijagrama sila-pomak FE analize i ispitivanja S skupine.....	62
Slika 6.8 Utjecaj uzdužne sile na standardnom detalju stope skele	63
Slika 6.9 Utjecaj uzdužne sile na standardnom detalju stope skele.....	64
Slika 7.1 Određivanje otpornosti uzorka S1.....	65
Slika 7.2 Određivanje otpornosti uzorka S2.....	66
Slika 7.3 Određivanje otpornosti uzorka S3.....	66
Slika 7.4 Određivanje otpornosti modela FEM_S	67
Slika 7.5 Određivanje otpornosti uzorka NS1	67
Slika 7.6 Određivanje otpornosti uzorka NS2	68
Slika 7.7 Određivanje otpornosti uzorka NS3	68
Slika 7.8 Određivanje otpornosti modela FEM_NS.....	69

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Izmjerene vrijednosti za unos opterećenja standardnog detalja	26
Tablica 5.2 Izmjerene vrijednosti za unos opterećenja nestandardnog detalja	27
Tablica 5.3 Popis mjernih LVDT uređaja s pripadnom pozicijom	29
Tablica 5.4 Izmjerene vrijednosti dimenzija standardnog detalja	31
Tablica 5.5 Izmjerene vrijednosti dimenzija standardnog detalja	32
Tablica 5.6 Izmjerene vrijednosti dimenzija nestandardnog detalja a)	33
Tablica 5.7 Izmjerene vrijednosti dimenzija nestandardnog detalja b)	33
Tablica 5.8 Izmjerene vrijednosti dimenzija nestandardnog detalja c)	34
Tablica 5.9 Izmjerene vrijednosti vijčanog sklopa za S skupinu.....	35
Tablica 5.10 Izmjerene vrijednosti vijčanog sklopa za NS skupinu	35
Tablica 7.1 Srednje vrijednosti otpornosti iz laboratorijskih ispitivanja	69
Tablica 7.2 Rezime otpornosti detalja stope skele.....	69

SAŽETAK

Analiza detalja stope skele za obnovu zagrebačke katedrale

Tihana Đukanović, Marcela Medić

Tijekom 2020. godine dogodila su se dva velika potresa koja su značajno oštetila Zagrebačku katedralu. Za osiguranje od urušavanja i obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale izrađen je urgentni građevinski projekt nosive čelične skele. Za to rješenje odabrana je višesmjerna modularna lagana cijevna skela. Zbog velikih oštećenja tornjeva nije bilo moguće sidrenje skele po čitavoj visini tornjeva već samo na donjem dijelu koji je pretrpio manja oštećenja. To je rezultiralo izuzetno nepovoljnim konzolnim statičkim sustavom te relativno velikim opterećenjem baze skele. Zbog iznimne složenosti koncepta skele i geometrije tornjeva, morala su se primijeniti brojna nestandardna rješenja. Nestandardno rješenje je primijenjeno i kod detalja oslanjanja skele na čeličnu platformu koja započinje od baze tornjeva, oko 37 m od tla. Posljedično je osmišljen detalj za oslanjanje čelične konstrukcije skele koji je geometrijski prilagođen sigurnom i jednostavnom spajanju na čeličnu platformu. Predmet istraživanja ovog rada je analiza ponašanja primijenjenog nestandardnog (NS) detalja stope skele. S tim ciljem provedena je i usporedba sa standardnim (S) detaljem stope skele koji nije prilagodljiv za spajanje na čeličnu platformu.

Laboratorijski su ispitana po tri uzorka obje skupine detalja stope na savijanje. Rezultati ispitivanja, u obliku dijagrama sila i pomak, ukazuju na vidljive razlike u ponašanju standardnih (S) i nestandardnih (NS) uzoraka detalja stope skele. Generalno, nestandardni detalj stope je krući, ali je i manje duktilan u odnosu na standardno rješenje. Takvo ponašanje je rezultat činjenice da nestandardni detalj ima ploču veće debljine s dodatnim ukrućenjima. Nadalje, u programskom paketu ABAQUS provedene su numeričke simulacije te su numerički modeli kalibrirani na rezultate laboratorijskih ispitivanja NS i S detalja. Obzirom da laboratorijskim ispitivanjem nije uzet u obzir utjecaj uzdužne sile koja se javlja u eksploataciji, provedena je parametarska numerička analiza. Analiza je pokazala da je primijenjeni nestandardni detalj stope skele pouzdan za oslanjanje 70 metarskih skela oko tornjeva Zagrebačke katedrale koje su izložene složenim kombinacijama djelovanja.

Ključne riječi: *sanacija tornjeva, modularna čelična skela, modificirana stopa skele, laboratorijsko ispitivanje, numerička analiza*

SUMMARY

Analysis of the scaffold base jack detail for the reconstruction of the Zagreb Cathedral

Tihana Đukanović, Marcela Medić

Two major earthquakes that occurred in 2020 have significantly damaged the Zagreb Cathedral. In order to prevent the collapse and rebuild the towers of the Zagreb Cathedral, an urgent structural project for a load-bearing scaffold was made. A multidirectional modular lightweight tubular scaffold was chosen for this solution. Due to the extensive damage to the towers, it was not possible to anchor the scaffold to the full height of the towers, but only to the lower part, which was only slightly damaged. This resulted in a particularly unfavourable cantilever static system and relatively large loads on the scaffolding base. Due to the complexity of the scaffold concept and the geometry of the towers, numerous non-standard solutions had to be implemented. A non-standard solution was also applied to the details of supporting the scaffold on the steel platform, which begins around the base of the towers, at a height of about 37 m from the ground. As a result, a detail for supporting the steel structure of the scaffold was designed, geometrically adapted for safe and easy connection to the steel platform. The aim of research in this work is the analysis of the behaviour of applied non-standard (NS) scaffold base jack detail. For this purpose, a comparison was made with the standard (S) scaffold base jack detail that is not adaptable for connection to the steel platform.

Three specimens of both groups of scaffold base jack details were subjected to bending tests in a laboratory. The test results, in the form of force-displacement diagrams, show visible differences in the behaviour of standard (S) and non-standard (NS) base jack details. Generally, non-standard base jack detail has higher stiffness, but is also less ductile compared to the standard solution. This behaviour is due to the fact that non-standard detail has a plate with greater thickness and additional stiffeners. In addition, numerical studies were performed in ABAQUS software package, and the numerical models were calibrated with the results of laboratory tests of NS and S details. Since the laboratory tests didn't take into account the influence of the axial force that occurs during exploitation, a parametric numerical study was conducted. Analysis has shown that the applied non-standard base jack detail is

reliable for supporting the 70-meter-high scaffolding around the towers of the Zagreb Cathedral, which are subjected to complex load combinations.

Key words: *restoration of towers, modular steel scaffolding, modified scaffolding base jack, laboratory tests, numerical analysis*