

UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nenad T. Fric

TEORIJSKO I EKSPERIMENTALNO
ISTRAŽIVANJE GUBITAKA SILE
PREDNAPREZANJA U VISOKOVREDNIM
ZAVRTNJEVIMA

doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Nenad T. Fric

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL
RESEARCH OF LOSSES OF
PRETENSION FORCE IN HIGH
STRENGTH BOLTS

doctoral thesis

Belgrade, 2015.

Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet

Doktorska disertacija:

TEORIJSKO I EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE
GUBITAKA SILE PREDNAPREZANJA U VISOKOVREDNIM
ZAVRTNJEVIMA

Kandidat:

Nenad T. Fric

Mentori:

Prof. dr Dragan Buđevac,
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet
V. prof. dr Zoran Mišković,
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Članovi komisije za ocenu i odbranu:

Prof. dr Dragan Buđevac,
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Zlatko Marković,
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Duško Lučić
Univerzitet Crne Gore, Građevinski Fakultet

V. prof. dr Zoran Mišković
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Beograd, 2015.

Zahvalnica

Sopstvena eksperimentalna istraživanja, opisana u ovoj disertaciji, iziskivala su velika materijalne sredstva i logističku podršku. Bez pomoći velikog broja ljudi i kompanija, ovakvo istraživanje svakako ne bi bilo moguće. Zahvaljujem se na finansijskoj podršci, doniranju neophodnog materijala, ustupanju laboratorija i drugih resursa kompanijama, institutima i laboratorijama (abecednim redom):

- firmi „*Alcoa Fastening Systems*“ iz Telforda u Engleskoj,
- firmi „*Amiga d.o.o.*“ iz Kraljeva,
- firmi „*Armont SP d.o.o.*“ iz Beograda,
- firmi „*BATA-MAT*“ iz Beograda,
- firmi „*Euris d.o.o.*“ iz Beograda,
- „*Institutu za materijale i konstrukcije*“ Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- firmi „*INM d.o.o.*“ iz Arilja,
- firmi „*Johannes Steiner GmbH & Co.*“ iz Weningena u Nemačkoj,
- firmi „*Jotun*“ iz Norveške,
- „*Laboratoriji za ispitivanje konstrukcija*“ Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- „*Laboratoriji za materijale*“ Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- „*Laboratoriji za mehanička ispitivanja*“ Tehnološko metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- „*Laboratoriji za ispitivanje neorganskih prevlaka*“ Tehnološko metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- „*Laboratoriji za ispitivanje*“ građevinskog preduzeća „*Mostogradnja*“ iz Beograda,
- „*Laboratoriji za eksperimentalnu čvrstoću*“ Vojnotehničkog instituta Univerziteta odbrane Republike Srbije,
- firmi „*Lim inženjering d.o.o.*“ iz Beograda,
- firmi „*Mašinoprojekt KOPRING a.d.*“ iz Beograda,
- firmi „*Modipack d.o.o.*“ iz Požege,
- firmi „*Montprojekt d.o.o.*“ iz Beograda,
- firmi „*Mostogradnja a.d.*“ iz Beograda,

- firmi „*NB Čelik*“ iz Batajnice,
- firmi „*PERI oplata d.o.o.*“ iz Šimanovaca,
- firmi „*RT Trans*“ iz Beograda,
- firmi „*Xella Srbija a.d.*“ iz Vreoca.

Ovo istraživanje pomognuto je od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kroz projekat „*TR-36048*“.

Posebnu zahvalnost dugujem svojim profesorima i mentorima, Draganu Buđevcu i Zoranu Miškoviću, koji su mi pružali kontinuiranu stručnu, moralnu, logističku i materijalnu podršku, a u trenucima kolebanja i dilema pomagali da nađem rešenja, motiv i inspiraciju da nastavim sa istraživanjem.

Zahvaljujem se profesoru Milanu Veljkoviću sa Građevinskog fakulteta Tehničkog Univerziteta Luleå u Švedskoj na nesebičnoj pomoći i podršci od faze osmišljavanja teme disertacije, preko definisanja i realizacije eksperimentalnog istraživanja, pa do publikovanja ostvarenih rezultata.

Profesorima Zlatku Markoviću i Dušku Lučiću zahvalan sam na recenzijama disertacije, korisnim savetima i sugestijama koje su ovaj rad podigle na viši nivo.

Najveći deo posla na realizaciji eksperimentalnog istraživanja uradili su Mladen Jović i Jovan Veljić. Njihova želja za sticanjem novih znanja, kreativnost, energija i dobra volja, rezultovali su eksperimentalnim istraživanjem na koje sam ponosan.

Posebnu zahvalnost dugujem Draganu Vučićeviću na nesebičnoj pomoći oko prikupljanja finansijskih sredstava, ali pre svega na pomoći oko pripreme eksperimentalnog istraživanja koju je svojom inženjerskom logikom i operativnošću u mnogome olakšao, a sam eksperiment unapredio.

Pri izradi numeričkih modela, ali i kroz duge i konstruktivne razgovore i sučeljavanje mišljenja, veliku pomoć mi je pružio kolega Marko Pavlović. Svojim angažovanjem približio mi je određene fenomene i pomogao da dođem do ispravnih zaključaka.

Moje drage kolege, Jelena, Milan i Nina pokazale su veliko razumevanje za moju potrebu da se u određenim fazama potpuno posvetim ovom istraživanju. U tim trenucima pružili su mi nesebičnu pomoć premuzimajući na sebe i deo mojih obaveza u radu sa studentima. Na tome sam im neizmerno zahvalan.

Sanji, Zorki i Tomislavu

In experimento veritas est.

TEORIJSKO I EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE GUBITAKA SILE PREDNAPREZANJA U VISOKOVREDNIM ZAVRTNJEVIMA

REZIME

Tarni spojevi sa prednapregnutim zavrtnjevima imaju veliki značaj u oblasti čeličnih konstrukcija, posebno u slučajevima konstrukcija izloženih dejstvu dinamičkog opterećenja, kao što su mostovi, kranski nosači, stubovi vetro generatora, itd. Dva parametra koji imaju najveći uticaj na nosivost ovakvih spojeva su koeficijent trenja na tarnim površima i ostvarena sila prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima.

Potreba da se prate savremeni trendovi u građevinarstvu, posebno sa aspekta novih materijala, rezultovala je ispitivanjem spojeva, u okviru ovog istraživanja, koji su antikorozijski zaštićeni savremenim cink-silikatnim premazima. Korišćen je komercijalni premaz „Resist 86“, proizvođača „Jotun“ iz Norveške. Veze su ostvarene uz pomoć klasičnih HV visokovrednih zavrtnjeva, ali i uz pomoć, u građevinarstvu sve češće primenjenih, zavrtnjeva sa zaključavanjem tipa „Huck BobTail (HBT)“, proizvođača „Alcoa Fastening Systems“ iz Engleske. Na ovaj način, klasičan postupak zaštite tarnih površina metalizacijom zamenjuje se jeftinijim, jednostavnijim i bržim postupkom nanošenja premaza. Takođe, ispitivana je i opravdanost primene zavrtnjeva sa zaključavanjem u poređenju sa klasičnim prednapregnutim zavrtnjevima. Međutim, primena novog materijala kao antikorozijske zaštite tarnih površina otvara pitanje gubitaka sile prednaprezanja u zavrtnjevima jer je opšte poznato da dominantan deo ovih gubitaka potiče od promene debljine sloja antikorozijske zaštite kroz vreme.

Sprovedeno istraživanje ima dva osnovna cilja: da proveriti opravdanost primene predmetnog premaza u tarnim spojevima, sa stanovišta ostvarenog koeficijenta trenja i sa stanovišta gubitaka sile prednaprezanja.

Sprovedena su sopstvena eksperimentalna istraživanja i ispitano je 126 zavrtnjeva u okviru 42 uzorka spojeva sa dvostrukim preklopom. Eksperimentalno istraživanje je zbog svog obima i raznolikosti podeljeno u nekoliko faza:

- Određivanje fizičko-mehaničkih svojstava primenjenih materijala. Ova faza podrazumeva određivanje koeficijenta trenja koji se ostvaruje primenom predmetnog cink silikatnog premaza kao i fizičko mehaničkih svojstava (granice

- razvlačenja i zatezne čvrstoće) materijala od kog su izrađeni primenjeni HV i HBT zavrtnjevi;
- Određivanje debljine nanetog premaza na svaku od čeličnih ploča od kojih su formirani uzorci;
 - Kalibracija sile u zavrtnjeva. Kao najracionalniji ali i najefikasniji način za merenje sile u zavrtnju izabran je postupak ugradnje mernih traka u telo zavrtnjeva. Nakon ugradnje mernih traka, a pre ugradnje zavrtnjeva u uzorke, izvršena je njihova kalibracija i tako uspostavljena veza između promene dužine zavrtnja (merne trake) i sile u zavrtnju. Neki dragoceni zaključci o raspodeli sile unutar zavrtnjeva su izvedeni na bazi ovih rezultata.
 - Centralni deo istraživanja u kojem je izvršeno kontinuirano praćenje promene sile u zavrtnjevima i to 60 nedelja za prvo ugrađenih 36 zavrtnjeva, odnosno 24 nedelje za preostalih 72 zavrtnja i
 - Ispitivanje 6 uzoraka (18 zavrtnjeva) na dejstvo dinamičkog opterećenja tokom 2×10^6 ciklusa.

Uzorci su formirani na način da se obezbedi variranje: vrste zavrtnja (HV i HBT), dužine zavrtnja preko različite debljine steznog paketa (18 mm, 35 mm i 55 mm), debljine premaza (uzorci sa i bez premaza) i vrste opterećenja uzorka (bez spoljašnjeg opterećenja na uzorke i uzorci izloženi dejstvu dinamičkog opterećenja).

Dobijeni rezultati potvrđuju opravdanost primene predmetnog premaza u tarnim spojevima, sa obzirom da su određeni koeficijenti trenja u intervalu 0,40-0,50. Takođe, za svaku grupu zavrtnjeva određeni su inicijalni, kratkoročni i dugoročni gubici sile prednaprezanja. Ekstrapolacijom rezultata sakupljenih u prve 24 nedelje na period od 20 godina, za svaki tip i dužinu zavrtnja, definisana je kriva koja opisuje promenu sile prednaprezanja u zavrtnju u posmatranom periodu. Od svih ispitivanih zavrtnjeva jedino kod najkraćih HBT zavrtnjeva (dužine 55 mm) uočen je problem ostvarivanja proračunske sile prednaprezanja. Kod zavrtnjeva ugrađenih u uzorke sa antikorozijskom zaštitom gubici sile prednaprezanja značajno su veći od onih koji su ugrađeni u uzorke bez antikorozijske zaštite. Uticaj dinamičkog opterećenja, definisanog tako da ne dovede do proklizavanja veze niti plastifikacije bilo kog njenog dela, može se zanemariti sa aspekta gubitaka sile prednaprezanja. Takođe, može se zaključiti da je gubitak sile prednaprezanja najveći kod najkraćih zavrtnjeva i da opada sa povećanjem dužine

zavrtnjeva. Primenom metode konačnih elemenata (MKE) modifikovani su postojeći izrazi za fleksibilnost HV zavrtnjeva i definisani novi za HBT zavrtnjeve. Takođe, primenom rezultata MKE i sopstvenog eksperimentalnog istraživanja, određena su reološka svojstva primenjenog cink-silikatnog premaza.

Na osnovu rezultata sprovedenog istraživanja zaključuje se da je primena predmetnih premaza kao i upotreba ispitivanih HBT zavrtnjeva u tarnim spojevima moguća. Takođe, izvršena kvantifikacija gubitaka sile prednaprezanja omogućava projektantima da ih u postupku projektovanja uzmu u obzir i tako spreče gubitak nosivosti usled proklizavanja.

Ključne reči: visokovredni zavrtnjevi, zavrtnjevi sa zaključavanjem, tarni spoj, kalibracija, nosivost na proklizavanje, sila prednaprezanja

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Metalne konstrukcije

UDK: 624.14 (043.3)

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF LOSSES OF PRETENSION FORCE IN HIGH STRENGTH BOLTS

ABSTRACT

Friction connections with high-strength pretension bolts are greatly important in the field of steel structures, especially in structures imposed to dynamic loads, such as bridges, cranes and wind turbine towers. Two parameters mostly influencing the load-bearing capacity of such connections are the friction coefficient on friction surfaces and the achieved pretension force in high-strength bolts.

In an effort to meet contemporary trends in the field of structural engineering, especially by usage of new materials, connections with state-of-the-art zinc-rich silicate based coating as an anti-corrosive primer have been investigated in the scope of this research. Such a commercial coating „Resist 86“, manufacturer by „Jotun“ in Norway, is used. Friction connections are formed using classical HV high-strength bolts but also the lock-bolts „Huck BobTail (HBT)“, manufactured by „Alcoa Fastening Systems“ in England, which are more and more frequently used in the field of structural engineering. In this way a classical procedure of providing metalized friction surfaces is replaced with much cheaper, more simple and quicker coating process. At the same time lock-bolts are analysed in terms of their applicability when compared to the classical pretension bolts in use. On the other hand, application of the new material, which acts as anti-corrosion protection over friction surfaces, stirs debate with regards to pretension force loss in bolts as it is a commonly known fact that the dominant portion of these losses stems from a change in anti-corrosion layer thickness which may emerge in time.

The research in question strives at two principle goals: whether usage the coating in question in tension connections is justified from the standpoint of achieved friction coefficient and from the standpoint of loss of the pretension force.

Related experimental research has been conducted in which 126 bolts were tested within 42 double-lap joint specimens. The experimental works are divided into several phases due to their large extent and variety:

- Determination of physical and mechanical properties of the applied materials.
This phase implies testing of friction coefficient which is achieved by applying

- the aforementioned zinc-based silicate coating, and the mechanical properties (yield strength and tensile strength) of the HV and HBT bolts materials;
- Measuring the thickness of the coating applied to all the steel plates used to form the specimens;
 - Bolt force calibration. Bolt force measurement procedure relating to insertion of strain gauges into the bolts has been selected as the most rational and efficient one. After the strain gauges are fitted, and prior to assembling the bolts into the specimens, bolt force is calibrated in means of determination of force-strain relation for each bolt. Some significant conclusions about distribution of the force in the bolt have been drawn relying on these results.
 - The focal point of the research - continuous monitoring the changes in bolt forces has been carried out over 60 weeks for the first batch of 36 bolts, and over 24 weeks for the remaining 72 bolts;
 - Testing of 6 specimens (18 bolts) for dynamic loads in 2×10^6 cycles.

Specimens have been formed in a way to allow variation of: bolt types (HV and HBT), bolt lengths for various clamping package thicknesses (18 mm, 35 mm and 55 mm), coating thickness (with and without coating) and loading conditions (with no external load sustained by samples and samples exposed to dynamic loads).

The obtained results justify the application of the investigated coating type in friction connections given that friction coefficients are in range of 0,40-0,50. In addition, initial short-term and long-term pretension force losses have been determined for each group of bolts. Results obtained within the first 24 weeks are extrapolated to period of 20 years where a curve which describes change in pretension force within time was defined for each bolt type and bolt length separately. The shortest HBT bolts (55 mm long) showed to be problematic with regards to achieving the design value of pretension force. Pretension force losses are significant in bolts assembled to specimens with the coating when compared to those without. Influence of the dynamic loads, which are below slip resistance of the connection, can be disregarded in means of loss of the pretension force. Additionally, the conclusion can be drawn that the pretension force loss is the largest in the case of shortest bolts and that it can be reduced by increasing the bolt length. Using finite element method (FEM) for modelling the experiments of calibration process of HV and HBT bolts, existing equations for

flexibility of HV bolts are improved, and for the first time equations are defined for HBT bolts. Also, using the results of FEM and experimental research, rheological properties of the applied zinc-silicate coating are determined.

According to results obtained from the conducted research, application of aforementioned coatings can be recommended, as well as the use of tested HBT bolts in friction connections. Quantification of pretension force loss allows for the engineers in practice to take such data into consideration in the course of design development and prevention of overestimation of load-bearing capacity against slippage.

Keywords: high-strength bolts, lock bolts, friction connection, bolt force calibration, slip resistance, pretension force

Science field: Civil Engineering

Narrow science field: Steel structures

UDK: 624.14 (043.3)

SADRŽAJ

SPISAK SLIKA.....	v
SPISAK TABELA.....	xii
OZNAKE I SKRAĆENICE	xvii
1. UVOD.....	1
1.1. Opšte	1
1.2. Predmet i cilj istraživanja.....	3
1.3. Značaj i opravdanost istraživanja.....	4
1.4. Kratak pregled sadržaja disertacije	5
2. PREGLED STANJA I ISTRAŽIVANJA U OBLASTI.....	8
2.1. Visokovredni zavrtnjevi sistema „ <i>Huck BobTail</i> - <i>HBT</i> “	8
2.1.1. Istorijat.....	8
2.1.2. “ <i>Huck BobTail</i> ” zavrtnj i čaura.....	11
2.1.3. Oprema za ugradnju “ <i>Huck BobTail</i> ” zavrtnjeva	13
2.1.4. Postupak ugradnje „ <i>Huck BobTail</i> “ zavrtnjeva	14
2.1.5. Proračun nosivosti zavrtnjeva sa zaključavanjem	17
2.2. Visokovredni HV zavrtnjevi proizvođača „ <i>Peiner</i> “	21
2.3. Cink-silikatni premaz RESIST 86 proizvođača „ <i>Jotun</i> “	22
2.4. Antikorozijska zaštita tarnih površina sa stanovišta ostvarenih koeficijenata trenja	26
2.5. Gubici sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima.....	34
3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE	46
3.1. Plan sopstvenih eksperimentalnih istraživanja	46
3.2. Uvodna eksperimentalna istraživanja	47

3.2.1	Mehanička svojstva primenjenih HBT zavrtnjeva	47
3.2.2	Mehanička svojstva primenjenih HV zavrtnjeva.....	49
3.2.3	Koeficijent trenja između navoja navrtke i tela HV zavrtnja - k	51
3.3	Cink-silikatni premaz RESIST 86 proizvođača „Jotun“	53
3.4	Opšte o eksperimentu.....	54
3.5	Metode merenja sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima.....	59
3.6	Primenjeni merno-akvizicioni sistemi za prikupljanje podataka	62
3.7	Postupak formiranja uzoraka	66
3.7.1	Izrada čeličnih ploča i njihova antikorozijska zaštita.....	66
3.7.2	Priprema zavrtnjeva i ugradnja mernih traka	71
3.7.2.1	Bušenje zavrtnjeva i priprema rupe za ugradnju merne trake	73
3.7.2.2	Ugradnja mernih traka i njihovo pravilno pozicioniranje	74
3.7.2.3	Pripremanje i ugradnja adhezionog sredstva.....	76
3.7.2.4	Ugradnja mernih traka u zavrtnjeve i termički tretman lepka.....	80
3.7.2.5	Kabliranje zavrtnjeva i ugradnja kompenzacionih mernih traka	81
3.7.3	Kalibracija zavrtnjeva.....	83
3.7.3.1	Rezultati kalibracije zavrtnjeva.....	86
3.7.4	Ugradnja zavrtnjeva u uzorke.....	96
3.8	Ispitivanje uzoraka na dejstvo dinamičkog opterećenja	97
3.9	Zaključci	102
4.	REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA	104
4.1	Inicijalni gubici sile prednaprezanja	104
4.2	Dugoročni gubici sile prednaprezanja	113
4.3	Gubici sile prednaprezanja usled dejstva dinamičkog opterećenja	140
5.	ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA	149

5.1	Maksimalna vrednost sile prednaprezanja ostvarena u procesu ugradnje zavrtnjeva.....	149
5.2	Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja	150
5.2.1.	Uticao načina ugradnje visokovrednih HV zavrtnjeva na inicijalne gubitke sile prednaprezanja	153
5.2.2.	Uticao redosleda ugradnje zavrtnjeva na kratkoročne gubitke sile prednaprezanja.....	155
5.3	Gubici sile prednaprezanja usled dejstva dinamičkog opterećenja	157
5.4	Dugoročni gubici sile prednaprezanja	158
5.4.1	Karakteristične vrednosti dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima	162
5.4.2	Odnos registrovane i minimalne propisane sile prednaprezanja u zavrtnju	165
5.4.3	Dugoročni gubici sile prednaprezanja u funkciji dužine visokovrednog zavrtnja	168
5.5	Numeričko i analitičko određivanje fleksibilnosti spojeva sa prednapregnutim visokovrednim zavrtnjevima	169
5.5.1	Ciljevi numeričkih analiza.....	169
5.5.1.1	Prikaz modela.....	170
5.5.1.2	Modeli materijala	174
5.5.1.3	Tip analize	174
5.5.2	Rezultati i poređenje.....	175
5.5.2.1	Dilatacije mernih traka	175
5.5.2.2	Fleksibilnost zavrtnjeva.....	181
5.5.2.3	Poređenje fleksibilnosti (deformabilnosti) zavrtnjeva	187
5.5.2.4	Fleksibilnost elemenata steznog paketa i ukupna fleksibilnost spoja	189
5.6	Reološka svojstva cink-silikatnog premaza „Resist 86“	190

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA	200
7. LITERATURA	205
PRILOG A – Određivanje koeficijenta trenja.....	211
A.1 Uvod.....	211
A.2 Postupak ispitivanja	212
A.3 Program ispitivanja	214
A.4 Rezultati ispitivanja	215
PRILOG B – Debljina cink silikatnog premaza	218
B.1 Debljina AKZ na čeličnim pločama faze I eksperimenta	218
B.2 Debljina AKZ na čeličnim pločama faze II eksperimenta.....	223
PRILOG C – Dijagrami kalibracionih krivih	228
C.1 Kalibracione krive za HV zavrtnjeve – faza I.....	228
C.2 Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve – faza I	233
C.3 Kalibracione krive za HV zavrtnjeve – faza II	238
C.4 Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve – faza II.....	244
PRILOG D – Inicijalni gubici sile prednaprezanja	250
D.1 HV zavrtnjevi - faza I ispitivanja.....	250
D.2 HV zavrtnjevi - faza II ispitivanja	253
D.3 HBT zavrtnjevi - faza I ispitivanja	257
D.4 HBT zavrtnjevi - faza II ispitivanja	260

Biografija autora

Izjava o autorstvu

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Izjava o korišćenju

SPISAK SLIKA

Slika 2.1: a) Louis C. Huck b) Originalna skica jednog od spojnih sredstava [14], [15].	8
Slika 2.2: a) C50L, b) HuckSpin, c) U-Spin, d) Huck BobTail.....	10
Slika 2.3: Spojno sredstvo sistema „Huck BobTail“	11
Slika 2.4: HBT zavrtnjevi a) sa glavom sa prirubnicom, b) sa okruglom glavom [17] .	12
Slika 2.5: Napajanje za ugradnju HBT zavrtnjeva	13
Slika 2.6: a) Presa sa glavom za ugradnju HBT zavrtnjeva, b) glava za demontažu HBT zavrtnjeva.....	14
Slika 2.7: Ugradnja HBT zavrtnjeva prečnika 20 mm a) crvena lampica kao indikator rada opreme za ugradnju b) postavljanje opreme u položaj za rad	14
Slika 2.8: a) Zavrtnaj pripremljen za ugradnju, b) rep zavrtnja uvučen u alat, c) gnječenje čaure d) kraj procesa ugradnje zavrtnja [19].....	15
Slika 2.9: Indikatori ugradnje HBT zavrtnja na nožici čaure pre i posle ugradnje zavrtnja	15
Slika 2.10: Princip unošenja sile prednaprezanja u HBT zavrtnaj	16
Slika 2.11: Kontakt između zavrtnja i čaure/navrtke nakon ugradnje.....	17
Slika 2.12: Rastojanje između zavrtnjeva u vezi.....	18
Slika 2.13: Stvarni presek tela zavrtnjeva sa zaključavanjem u zoni navoja	19
Slika 2.14: HV zavrtnaj proizvođača „Peiner“	22
Slika 2.15: Cink-silikatni premaz RESIST 86 proizvođača Jotun iz Norveške	24
Slika 2.16: Rekonstrukcija mosta „Gazela“ u Beogradu – primena cink-silikatnog premaza „Resist 86“ kao antikorozijske zaštite tarnih površina	26
Slika 2.17: Šematski prikaz uzoraka eksperimentalnog istraživanja [36].....	31
Slika 2.18: Ekvivalentni cilindrični delovi zavrtnja	35
Slika 2.19: Rezultati eksperimenta koji su sprovedi Hwan-Seon i grupa autora [45].....	39
Slika 2.20: Uzorak za test čiste relaksacije [48].....	41
Slika 2.21: Uzorci sa i bez podloški za produženje [48]	43
Slika 3.1: Epruvete za određivanje fizičko mehaničkih osobina HBT zavrtnjeva	48
Slika 3.2: Dijagrami napon – dilatacija za epruvete izrađene od HBT zavrtnjeva.....	49
Slika 3.3: Epruvete za određivanje fizičko mehaničkih osobina HV zavrtnjeva	50

Slika 3.4: Dijagrami napon - dilatacija za epruvete izrađene od HV zavrtnjeva.....	50
Slika 3.5: Uklanjanje cinka sa navoja zavrtnja.....	51
Slika 3.6: Šematski prikaz eksperimentalnog istraživanja	54
Slika 3.7: Uzorci sa visokovrednim HV zavrtnjevima izrađenim prema EN 14399-4 standardu.....	55
Slika 3.8: Uzorci sa „Huck BobTail“ visokovrednim zavrtnjevima	56
Slika 3.9: Ultrasonični uređaji za merenje sile prednaprezanja u zavrtnjevima.....	59
Slika 3.10: a) Merne ćelije na bazi mernih traka tip KMR, proizvođača HBM, b) Način ugradnje mernih ćelija tipa KMR	60
Slika 3.11: Piezoelektrične merne ćelije tip CLP i CFW, proizvođača HBM.....	61
Slika 3.12: Način primene CFW mernih ćelija.....	61
Slika 3.13: a) Merno-akvizicioni sistem MGCplus, b) primena za predmetno istraživanje	63
Slika 3.14: a) Loger DT85g, b) multiplekser CEM20.....	64
Slika 3.15: Čišćenje čeličnih ploča nakon peskarenja.....	66
Slika 3.16: Prskanje filma svežom vodom u uslovima smanjene vlažnosti	67
Slika 3.17: Merenje debljine premaza u vlažnom stanju.....	67
Slika 3.18: Laboratorijski elkometar proizvođača „Fischer“ i raspored mernih mesta za određivanje debljine premaza.....	69
Slika 3.19: Lepljenje mernih traka na telo zavrtnja.....	71
Slika 3.20: Merna traka BTM-6C.....	72
Slika 3.21: Zavrtnjevi sa izbušenim rupama za ugradnju merne trake i položaj merne trake u odnosu na dno rupe.....	73
Slika 3.22: Pozicioniranje merne trake po dubini rupe	74
Slika 3.23: Pozicioniranje mernih traka u HV zavrtnjevima dužine 50, 70 i 90 mm.....	75
Slika 3.24: Previjanje instalacije merne trake radi precizne ugradnje.....	75
Slika 3.25: Merne trake pripremljene za ugradnju	76
Slika 3.26: Adheziono sredstvo A-2 proizvođača „Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.“. 76	
Slika 3.27: Primena digitalne vage i ručnog fena u postupku pripreme lepka	77
Slika 3.28: Predgrevanje zavrtnjeva pre ugradnje lepka i mernih traka.....	78
Slika 3.29: Postupak ugradnje lepka u rupu u zavrtnju	79
Slika 3.30: Probna ugradnja lepka u rupu izbušene u komadu pleksiglasa	79

Slika 3.31: Ugradnja merne trake u zavrtnanj	80
Slika 3.32: Zavrtnjevi pripremljeni za termički tretman lepka u laboratorijskoj sušnici sa temperaturom kontrolisanom uz pomoć temperaturne sonde.....	81
Slika 3.33: Kontrola otpornosti mernih traka nakon postupka očvršćavanja lepka	81
Slika 3.34: Zaštita žičanih izvoda mernih traka	82
Slika 3.35: Način vezivanja mernih traka u Vitstonov most	82
Slika 3.36: Kompenzacione merne trake	83
Slika 3.37: Alat za kalibraciju zavrtnjeva.....	84
Slika 3.38: Postavljanje alata za kalibraciju u željeni položaj.....	85
Slika 3.39: Dijagram promene sile na kidalici u toku kalibracije zavrtnjeva [48]	86
Slika 3.40: Dijagram sila-dilatacija za zavrtnanj D50B03	87
Slika 3.41: Kalibraciona kriva za zavrtnanj H70C03	88
Slika 3.42: Kalibraciona kriva za zavrtnanj H70C03 nakon uklanjanja nelinearnog dela	88
Slika 3.43: Kalibraciona kriva za zavrtnanj H70C11 – primer loše ugrađene merne trake	89
Slika 3.44: Primer lepka sa i bez zaostalih mehurića vazduha.....	90
Slika 3.45: Primer rupe za ugradnju merne trake koja nije u osi zavrtnja.....	90
Slika 3.46: Redosled ugradnje zavrtnjeva u uzorke	96
Slika 3.47: Ugradnja zavrtnjeva u uzorke	97
Slika 3.48: Šematski prikaz spektra dinamičkog opterećenja	98
Slika 3.49: Krive nosivosti na zamor za opseg normalnog napona [69]	99
Slika 3.50: Alat za ugradnju ekstenzometara	101
Slika 3.51: Fiksiranje alata za uzorak i ugradnja ekstenzometara.....	102
Slika 4.1: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H1	104
Slika 4.2: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka D5.....	105
Slika 4.3: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima	106
Slika 4.4: Inicijalni i kratkoročni gubici u HBT zavrtnjevima	106
Slika 4.5: Proklizavanje merne trake u zavrtnju H70B03.1	107
Slika 4.6: Stabilnost merne trake u slučaju očitavanja uz pomoć HBM mernog sistema	114
Slika 4.7: Stabilnost merne trake u slučaju očitavanja uz pomoć DT85G mernog sistema	115

Slika 4.8: Dijagram promene dilatacije merne trake u zavrtnju H85C12	142
Slika 4.9: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka D3 u toku delovanja dinamičkog opterećenja	143
Slika 4.10: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H3 u toku delovanja dinamičkog opterećenja	144
Slika 4.11: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka D6 u toku delovanja dinamičkog opterećenja	145
Slika 4.12: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H6 u toku delovanja dinamičkog opterećenja	146
Slika 4.13: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka D9 u toku delovanja dinamičkog opterećenja	147
Slika 4.14: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H9 u toku delovanja dinamičkog opterećenja	148
Slika 5.1: Primer značajnog odstupanja sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima istog uzorka	150
Slika 5.2: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HBT zavrtnjevima u uzorcima bez AKZ	152
Slika 5.3: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HBT zavrtnjevima u uzorcima sa AKZ	152
Slika 5.4: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HV zavrtnjevima u uzorcima bez AKZ	153
Slika 5.5: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HV zavrtnjevima u uzorcima sa AKZ	153
Slika 5.6: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima zavisno od načina ugradnje zavrtnjeva	154
Slika 5.7: Brzina unošenja sile prednaprezanja moment ključem u HV zavrtnj	154
Slika 5.8: Brzina unošenja sile prednaprezanja običnim ključem u HV zavrtnj	155
Slika 5.9: Uticaj redosleda ugradnje HV zavrtnjeva na gubitak sile prednaprezanja ..	156
Slika 5.10: Uticaj redosleda ugradnje HBT zavrtnjeva na gubitak sile prednaprezanja	156
Slika 5.11: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 sec nakon ugradnje zavrtnja	159

Slika 5.12: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 sec nakon ugradnje zavrtnja	159
Slika 5.13: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima	161
Slika 5.14: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima.....	162
Slika 5.15: Karakteristične vrednosti dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 s nakon ugradnje zavrtnja	164
Slika 5.16: Karakteristične vrednosti dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 s nakon ugradnje zavrtnja	164
Slika 5.17: Promena koeficijenta ξ za HV zavrtnjeve tokom vremena.....	166
Slika 5.18: Promena koeficijenta ξ za HBT zavrtnjeve tokom vremena.....	167
Slika 5.19: Promena koeficijenta ξ u funkciji dužine HV zavrtnjeva	168
Slika 5.20: Promena koeficijenta ξ u funkciji dužine HBT zavrtnjeva	169
Slika 5.21: Geometrija zavrtnjeva u modelima na bazi MKE.....	171
Slika 5.22: Geometrija ostalih delovima u modelima.	171
Slika 5.23: Model za direktno poređenje eksperimentalne i numeričke kalibracije zavrtnjeva tipa HV.....	172
Slika 5.24: Geometrija modela za određivanje fleksibilnosti delova zavrtnjeva.	173
Slika 5.25: Raspodela podužnih dilatacija u zavrtnjevima tipa HV pri punoj sili prednaprezanja $F_{p,C}=171,5$ kN.....	176
Slika 5.26: Podužne dilatacije HV zavrtnja pri punoj sili prednaprezanja - $F_{p,C} =171,5$ kN	179
Slika 5.27: Raspodela podužnih dilatacija u zavrtnjevima tipa HBT pri punoj sili prednaprezanja $F=170,7$ kN	180
Slika 5.28: Podužne dilatacije HBT zavrtnja pri punoj sili prednaprezanja - $F_{p,C} =170,7$ kN	180
Slika 5.29: Pojedinačni delovi zavrtnjeva u kojima su očitavane promene dužine.....	182
Slika 5.30: Izduženje između podloški određeno numeričkim i analitičkim putem za zavrtnjeve tipa HV.....	184
Slika 5.31: Izduženje između glave i čaure određeno numeričkim i analitičkim putem za zavrtnjeve tipa HBT.	187
Slika 5.32: Deformacije delova zavrtnjeva pri punoj sili prednaprezanja.....	188
Slika 5.33: Poređenje fleksibilnosti zavrtnjeva tipa HV i HBT.	188

Slika 5.34: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HV zavrtnjevima, u funkciji vremena	193
Slika 5.35: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HV zavrtnjevima, u logaritamskoj funkciji vremena	193
Slika 5.36: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HBT zavrtnjevima, u funkciji vremena	195
Slika 5.37: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HBT zavrtnjevima, u logaritamskoj funkciji vremena	195
Slika 5.38: Zavisnost nominalne sile prednaprezanja i površine kontakta ispod podloške HV zavrtnjeva.....	197
Slika 5.39: Zavisnost nominalne sile prednaprezanja i površine kontakta ispod glave/nožice čaure HBT zavrtnjeva.....	197
Slika 5.40: Poređenje ukupne dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HV i HBT zavrtnjevima	199
Slika A.1: Epruvete za određivanje koeficijenta trenja [32]	211
Slika A.2: Određivanje sile trenja	214
Slika A.3: Šematski prikaz sila koje deluju na uzorak i mernih mesta za postavljanje tenziometara.....	215
Slika A.4: Epruvete pritegnute zavrtnjevima M16 – izgled nakon ispitivanja.....	217
Slika A.5: Epruvete pritegnute zavrtnjevima M20 – izgled nakon ispitivanja.....	217
Slika C.1: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D1 i D2.....	228
Slika C.2: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D3 i D4.....	229
Slika C.3: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D5 i D6.....	230
Slika C.4: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D7 i D8.....	231
Slika C.5: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorak D9.....	232
Slika C.6: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H1 i H2.....	233
Slika C.7: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H3 i H4.....	234
Slika C.8: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H5 i H6.....	235
Slika C.9: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H7 i H8.....	236
Slika C.10: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorak H9.....	237
Slika C.11: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D10 i D11	238
Slika C.12: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D12 i D13	239

Slika C.13: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D14 i D15.....	240
Slika C.14: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D16 i D17.....	241
Slika C.15: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D18 i D19.....	242
Slika C.16: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D20 i D21.....	243
Slika C.17: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H10 i H11.....	244
Slika C.18: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H12 i H13.....	245
Slika C.19: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H14 i H15.....	246
Slika C.20: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H16 i H17.....	247
Slika C.21: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H18 i H19.....	248
Slika C.22: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H20 i H21.....	249
Slika D.1: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D1, D2 i D3.....	250
Slika D.2: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D4, D5 i D6.....	251
Slika D.3: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D7, D8 i D9.....	252
Slika D.4: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D10, D11 i D12.....	253
Slika D.5: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D13, D14 i D15.....	254
Slika D.6: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D16, D17 i D18.....	255
Slika D.7: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D19, D20 i D21.....	256
Slika D.8: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H1, H2 i H3.....	257
Slika D.9: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H4, H5 i H6.....	258
Slika D.10: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H7, H8 i H9.....	259
Slika D.11: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H10, H11 i H12.....	260
Slika D.12: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H13, H14 i H15.....	261
Slika D.13: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H16, H17 i H18.....	262
Slika D.14: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H19, H20 i H21.....	263

SPISAK TABELA

Tabela 2.1: Standardi i oznake HV zavrtnjeva	21
Tabela 2.2: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe rekonstrukcije mosta „Gazela“ – deo 1	24
Tabela 2.3: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe rekonstrukcije mosta „Gazela“ – deo 2.....	25
Tabela 2.4: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe rekonstrukcije mosta „Gazela“ – deo 3.....	26
Tabela 2.5: Koeficijenti trenja za različite načine obrade površina tarnih spojeva, prema domaćim propisima [32].....	28
Tabela 2.6: Koeficijenti trenja za različite načine obrade površina tarnih spojeva, prema Evrokodu [29].....	28
Tabela 2.7: Koeficijenti trenja za različite tipove obrade površina – Vlajić [1]	30
Tabela 2.8: Koeficijenti trenja za različite vidove obrade površina – Husson [36]	32
Tabela 2.9: Koeficijenti trenja za sisteme obrade površina kod primene čelika klase čvrstoće S275, prema [23]	33
Tabela 2.10: Koeficijenti trenja za sisteme obrade površina kod primene visokovrednog čelika klase čvrstoće S690 i korten čelika klase čvrstoće S355, prema [23].....	34
Tabela 2.11: Prosečna vrednost gubitaka sile prednaprezanja nakon sedam dana [%], prema [48].....	42
Tabela 2.12: Prosečan gubitak sile prednaprezanja [%] po uzorku [48].....	43
Tabela 3.1: Dimenzije epruveta za određivanje mehaničkih svojstava HBT zavrtnjeva	48
Tabela 3.2: Karakteristike čelika od kog su izrađeni HBT zavrtnjevi.....	49
Tabela 3.3: Dimenzije epruveta za određivanje mehaničkih svojstava HV zavrtnjeva .	50
Tabela 3.4: Karakteristike čelika od kog su izrađeni HV zavrtnjevi.....	51
Tabela 3.5: Vrednosti koeficijenta k za fazu I istraživanja	52
Tabela 3.6: Vrednosti koeficijenta k za fazu II istraživanja	53
Tabela 3.7: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe disertacije	53
Tabela 3.8: Sistem označavanja zavrtnjeva	57

Tabela 3.9: Sistem označavanja uzoraka prve faze eksperimenta.....	58
Tabela 3.10: Sistem označavanja uzoraka druge faze eksperimenta.....	58
Tabela 3.11: Pregled primenjenih merno-akvizicionih sistema po fazama eksperimenta	65
Tabela 3.12: Atmosferski uslovi u trenutku nanošenja cink-silikatnog premaza.....	68
Tabela 3.13: Propisane debljine filma za premaz u vlažnom i suvom stanju [31].....	68
Tabela 3.14: Debljina premaza na uzorcima sa HBT zavrtnjevima faze I eksperimenta	69
Tabela 3.15: Debljina premaza na uzorcima sa HBT zavrtnjevima faze II eksperimenta	70
Tabela 3.16: Debljina premaza na uzorcima sa HV zavrtnjevima faze I eksperimenta ..	70
Tabela 3.17: Debljina premaza na uzorcima sa HV zavrtnjevima faze II eksperimenta .	71
Tabela 3.18: Karakteristike primenjene merne trake BTM-6C prema [67]	72
Tabela 3.19: Rastojanje između alata nakon ugradnje u kidalicu	85
Tabela 3.20: Faza I - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 50 mm	91
Tabela 3.21: Faza I - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 70 mm	91
Tabela 3.22: Faza I - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 90 mm	91
Tabela 3.23: Faza I - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 55 mm.....	92
Tabela 3.24: Faza I - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 70 mm.....	92
Tabela 3.25: Faza I - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 85 mm.....	92
Tabela 3.26: Faza II - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 50 mm.....	93
Tabela 3.27: Faza II - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 70 mm.....	93
Tabela 3.28: Faza II - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 90 mm.....	94
Tabela 3.29: Faza II - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 55 mm.....	94
Tabela 3.30: Faza II - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 70 mm.....	95
Tabela 3.31: Faza II - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 85 mm.....	95
Tabela 4.1: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima faze I – uzorci bez antikorozijske zaštite	108
Tabela 4.2: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima faze II – uzorci bez antikorozijske zaštite.....	108
Tabela 4.3: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima faze I – uzorci sa antikorozijskom zaštitom.....	109
Tabela 4.4: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima faze II – uzorci sa antikorozijskom zaštitom	110

Tabela 4.5: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze I – uzorci bez atikorozone zaštite	111
Tabela 4.6: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze II – uzorci bez atikorozone zaštite	111
Tabela 4.7: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze I – uzorci sa atikoroziomom zaštitom	112
Tabela 4.8: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze II – uzorci sa atikoroziomom zaštitom	113
Tabela 4.9: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku H1.....	116
Tabela 4.10: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H10 i H11	117
Tabela 4.11: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H2 i H3	118
Tabela 4.12: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H12 i H13	119
Tabela 4.13: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku H4.....	120
Tabela 4.14: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H14 i H15	121
Tabela 4.15: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H5 i H6	122
Tabela 4.16: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H16 i H17	123
Tabela 4.17: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku H7.....	124
Tabela 4.18: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H18 i H19	125
Tabela 4.19: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H8 i H9	126
Tabela 4.20: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H20 i H21	127
Tabela 4.21: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku D1.....	128
Tabela 4.22: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D10 i D11	129

Tabela 4.23: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D2 i D3	130
Tabela 4.24: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D12 i D13	131
Tabela 4.25: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku D4.....	132
Tabela 4.26: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D14 i D15	133
Tabela 4.27: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D5 i D6	134
Tabela 4.28: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D16 i D17	135
Tabela 4.29: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku D7.....	136
Tabela 4.30: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D18 i D19	137
Tabela 4.31: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D8 i D9	138
Tabela 4.32: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D20 i D21	139
Tabela 4.33: Maksimalne i minimalne vrednosti dinamičke sile po uzorcima	140
Tabela 5.1: Maksimalne vrednosti sile prednaprezanja ostvarene u postupku ugradnje zavrtnjeva.....	149
Tabela 5.2: Srednje vrednosti sile $F_{p,C}$ u HBT zavrtnjevima.....	150
Tabela 5.3: Poređenje inicijalnih i kratkoročnih gubitaka sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima dužine 55 mm, ugrađenim u uzorke bez AKZ.....	151
Tabela 5.4: Srednje vrednosti sile $F_{p,C}$ u HV zavrtnjevima.....	151
Tabela 5.5: Gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima usled dejstva dinamičkog opterećenja.....	157
Tabela 5.6: Gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima usled dejstva dinamičkog opterećenja.....	157
Tabela 5.7: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima	160
Tabela 5.8: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima	161
Tabela 5.9: Vrednosti koeficijenta k_n za 5% fraktil [54].....	163

Tabela 5.10: Vrednosti koeficijenta ξ za HV zavrtnjeve.....	166
Tabela 5.11: Vrednosti koeficijenta ξ za HBT zavrtnjeve.....	167
Tabela 5.12: Odnosi nominalnih i stvarnih dilatacija na mestu merne trake	177
Tabela 5.13: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HV L=90 mm	182
Tabela 5.14: Fleksibilnosti delova zavrtnja tipa HV L=70 mm	183
Tabela 5.15: Fleksibilnosti delova zavrtnja tipa HV L=50 mm	183
Tabela 5.16: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HBT L=85 mm.....	185
Tabela 5.17: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HBT L=70 mm.....	186
Tabela 5.18: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HBT L=55 mm.....	186
Tabela 5.19: Analitički određena fleksibilnost spojeva sa HV i HBT zavrtnjevima ...	190
Tabela 5.20: Ukupna dilatacija premaza u spojevima sa visokovrednim HV zavrtnjevima	192
Tabela 5.21: Ukupna dilatacija premaza u spojevima sa visokovrednim HBT zavrtnjevima	194
Tabela A.1: Podaci o komponentama korišćenog premaza „Resist 86“	212
Tabela A.2: Uslovi ambijenta pri nanošenju premaza.....	212
Tabela A.3: Koeficijenti trenja na epruvetama pritegnutim zavrtnjevima M16.....	216
Tabela A.4: Koeficijenti trenja na epruvetama pritegnutim zavrtnjevima M20.....	216
Tabela B.1: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 5 mm	218
Tabela B.2: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 8 mm	219
Tabela B.3: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 10 mm	220
Tabela B.4: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 1	221
Tabela B.5: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 2	222
Tabela B.6: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 25 mm	222
Tabela B.7: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 5 mm	223
Tabela B.8: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 8 mm	224
Tabela B.9: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 10 mm	225
Tabela B.10: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 1 ..	226
Tabela B.11: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 2 ..	227
Tabela B.12: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 25 mm	227

OZNAKE I SKRAĆENICE

Latinska velika slova

A -	površina poprečnog preseka epruvete; bruto površina poprečnog preseka uzorka	[cm ²]
A_C -	površina uzorka izložena dejstvu napona usled sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju (<i>stressed area of joint element</i>)	[m ²]
A_{d3} -	površina poprečnog preseka na mestu minimalnog prečnika tela visokovrednog zavrtnja	[mm ²]
A_i -	površina poprečnog preseka ekvivalentnog cilindričnog dela visokovrednog zavrtnja	[mm ²]
A_{net} -	neto površina poprečnog preseka uzorka	[cm ²]
A_{nom} -	nominalna površina poprečnog preseka tela visokovrednog zavrtnja	[mm ²]
A_s -	efektivna površina poprečnog preseka zavrtnja – površina tela zavrtnja u ravni upravnoj na podužnu osu zavrtnja	[mm ²]
A_z -	površina poprečnog preseka zavrtnja	[mm ²]
C^f -	popustljivost zavrtnja (<i>bolt compliance</i>)	[N/m]
C_v -	koeficijent varijacije	[%]
D_A -	rastojanje između zavrtnjeva u spoju	[mm]
D_K -	maksimalni prečnik konusa deformacije spoja sa visokovrednim zavrtnjevima	[mm]
$E_{navrtke}$ -	modul elastičnosti materijala navrtke visokovrednog zavrtnja	[N/mm ²]
E_{sp} -	modul elastičnosti elemenata steznog paketa	[N/mm ²]
E_z -	modul elastičnosti materijala visokovrednog zavrtnja	[N/mm ²]
$F(t)$ -	sila prednaprezanja u trenutku t nakon ugradnje visokovrednog zavrtnja	[N]
F_0 -	inicijalna sila prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju	[N]

$F_{b,Rd}$ -	proračunska vrednost nosivosti zavrtnja na pritisak po omotaču rupe	[kN]
$F_{d,max}$ -	maksimalna vrednost dinamičke sile	[kN]
$F_{d,max,1}$ -	maksimalna vrednost dinamičke sile određena u funkciji nosivosti uzorka na proklizavanje	[kN]
$F_{d,max,2}$ -	maksimalna vrednost dinamičke sile određena u funkciji nosivosti neto preseka uzorka	[kN]
$F_{d,min}$ -	minimalna vrednost dinamičke sile	[kN]
F_{max} -	sila loma epruvete; maksimalna vrednost dinamičke sile za ispitivanje uzoraka	[kN]
F_{min} -	minimalna vrednost dinamičke sile za ispitivanje uzoraka	[kN]
F_p -	propisana sila prednaprezanja u zavrtnjevima za određivanje koeficijenta k	[kN]
F_{p1} -	sila prednaprezanja u zavrtnju prema [32] za $k > 0,14$	[kN]
F_{p2} -	Sila prednaprezanja u zavrtnju prema [32] za $k \leq 0,14$	[kN]
$F_{p,C}$ -	inicijalna sila prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju sračunata prema [22] i [29]	[N]
$F'_{p,C}$	preostala sila prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju na kraju eksploatacionog perioda	[kN]
$F_{p,C,d}$ -	sila prednaprezanja u trenutku t u dugačkim HBT zavrtnjevima	[N]
$F_{p,C,k}$ -	sila prednaprezanja u trenutku t u kratkim HBT zavrtnjevima	[N]
$F_{p,C,t}$ -	preostala sila prednaprezanja u zavrtnju nakon određenog perioda vremena	[N]
$F_{p,C,max}$ -	maksimalna dostignuta vrednost sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju	[kN]
$F_{p,C,t}$ -	sile prednaprezanja u zavrtnju u trenutku t	[kN]
$F_{p,C,t2}$ -	sila prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju u trenutku t_2	[kN]
$F_{p,C,t3}$ -	sila prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju u trenutku t_3	[kN]
$F_{p,C,t4}$ -	sila prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju u trenutku t_4	[kN]
F_{pg1} -	sila prednaprezanja u zavrtnjevima na gornjoj strani epruvete	[kN]

F_{pg2} -	sila prednaprezanja u zavrtnjevima na gornjoj strani epruvete	[kN]
F_{pd1} -	sila prednaprezanja u zavrtnjevima na donjoj strani epruvete	[kN]
F_{pd2} -	sila prednaprezanja u zavrtnjevima na donjoj strani epruvete	[kN]
$F_{s,Rd}$ -	nosivost zavrtnja na proklizavanje	[kN]
$F_{s,Rd}^b$ -	nosivost zavrtnja na proklizavanje	[kN]
$F_{s,Rd}^s$ -	nosivost uzorka na proklizavanje	[kN]
F_t -	sila trenja	[kN]
F_{tg1} -	sila proklizavanja na gornjoj strani epruvete	[kN]
F_{tg2} -	sila proklizavanja na donjoj strani epruvete	[kN]
$F_{v,Rd}$ -	Proračunska vrednost nosivosti zavrtnja na smicanje	[kN]
H_0 -	debljina sloja antikorozijske zaštite	[m]
L -	ukupna dužina epruvete; dužina merne trake	[mm]
L_m -	dužina merne trake	[mm]
M_p -	moment pritezanja	[Nm]
$M_{r,opt,FI}$ -	optimalni moment pritezanja HV zavrtnjeva prve faze istraživanja	[Nm]
$M_{r,opt,FII}$ -	optimalni moment pritezanja HV zavrtnjeva druge faze istraživanja	[Nm]
M_u -	moment pritezanja zavrtnja moment ključem	[Nm]
N -	broj ciklusa dinamičkog opterećenja	-
$N_{pl,Rd}$ -	plastična nosivost preseka uzorka	[kN]
$N_{t,Rd}$ -	nosivost neto preseka uzorka	[kN]
$N_{u,Rd}$ -	granična nosivost preseka uzorka	[kN]
R_1 -	otpornik poznate otpornosti	-
R_2 -	merna traka u zavrtnju	-
R_3 -	otpornik poznate otpornosti	-
R_4 -	merna traka za kompenzaciju temperaturnih uticaja	-

S	standardna devijacija	-
V_X	koeficijent varijacije veličine X	-

Latinska mala slova

a	dužina navoja epruvete; rastojanje između alata za kalibraciju zavrtnjeva	[mm]
a	koeficijent kalibracione krive	[kN/ μ m/m]
b	dužina dela epruvete promenljivog prečnika	[mm]
b	koeficijent kalibracione krive	[kN]
d	prečnik tela visokovrednog zavrtnja; širina nosača merne trake	[mm]
d_0	prečnik rupe za spojno sredstvo	[mm]
d_3	minimalni prečnik tela visokovrednog zavrtnja u zoni navoja, prečnik jezgra navoja zavrtnja	[mm]
$d_{g\check{c}}$	prečnik glave i nožice čaure „ <i>Huck BobTail</i> “ zavrtnja	[mm]
d_h	prečnik rupe za spojno sredstvo	[mm]
d_m	širina merne trake	[mm]
$d_{\text{podloške}}$	spoljašnji prečnik podloške visokovrednog zavrtnja	[mm]
e_1	rastojanje zavrtnja od ivice elementa koja je upravna na pravac delovanja sile	[mm]
e_2	rastojanje zavrtnja od ivice elementa koja je paralelna sa pravcem delovanja sile	[mm]
f_y	granica razvlačenja materijala	[Mpa]
$f_{y,sr}$	srednja vrednost granice razvlačenja materijala	[Mpa]
f_u	čvrstoća materijala pri zatezanju	[MPa]
f_{ub}	čvrstoća pri zatezanju materijala zavrtnja	[MPa]
$f_{u,sr}$	srednja vrednost čvrstoće materijala pri zatezanju	[MPa]
k	koeficijent trenja između navoja navrtke i tela HV zavrtnja	-

k_1 -	koeficijent za nosivost zavrtnja na pritisak po omotaču rupe	-
k_n -	koeficijent za 5% fraktil	-
k_s -	koeficijent oblika rupe za spojno sredstvo	-
k_{sr} -	srednja vrednost koeficijenta k	-
l -	dužina dela epruvete konstantnog prečnika	[mm]
$l_{a.navoja}$ -	dužina angažovanog dela navoja visokovrednog zavrtnja	[mm]
$l_{navrtke}$ -	dužina (debljina) navrtke visokovrednog zavrtnja	[mm]
l_{pr} -	ukupna nominalna debljina premaza u spoju	[μ m]
$l_{s.navoja}$ -	dužina slobodnog dela navoja visokovrednog zavrtnja	[mm]
l_{sp} -	debljina steznog paketa	[mm]
$l_{sp,red}$ -	redukovana debljina steznog paketa	[mm]
l_{tela} -	dužina tela visokovrednog zavrtnja bez navoja	[mm]
l_{glave} -	dužina (debljina) glave visokovrednog zavrtnja	[mm]
l_i -	dužina ekvivalentnog cilindričnog dela visokovrednog zavrtnja	[mm]
l_b -	dužina kontrolne baze merenja pre početka ispitivanja epruvete	[mm]
l_b' -	dužina kontrolne baze merenja nakon loma epruvete	[mm]
m_X -	srednja vrednost veličine X	[N]
n -	broj ciklusa dinamičkog opterećenja; broj tarnih ravni	-
p -	korak navoja visokovrednog zavrtnja	[mm]
p_1 -	rastojanje između dva susedna zavrtnja u pravcu delovanja sile	[mm]
p_2 -	rastojanje između dva susedna zavrtnja upravno na pravac delovanja sile	[mm]
s_X -	standardna devijacija veličine X	-
t -	vreme proteklo od trenutka ugradnje zavrtnja	[s],[god]

t_1 -	trenutak dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju	[s]
t_2 -	vremenski trenutak dve sekunde nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju	[s]
t_3 -	vremenski trenutak deset sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju	[s]
t_4 -	vremenski trenutak dvanaest časova nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju	[h]
t_{akz} -	debljina antikorozijske zaštite	[μ m]
t_d -	trenutak početka dinamičkog ispitivanja uzorka	[s]
t_{pl} -	debljina čelične ploče u uzorku	[mm]
t_{sp} -	debljina steznog paketa	[mm]

Grčka velika slova

ΔF_d -	razlika između maksimalne i minimalne vrednosti dinamičke sile	[kN]
$\Delta F_{p,C}$ -	ukupan gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju	[kN]
$\Delta F_{p,C,1}$ -	gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled međusobnog „nameštanja“ elemenata spoja	[kN]
$\Delta F_{p,C,2}$ -	gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled relaksacije elemenata spoja	[kN]
$\Delta F_{p,C,3}$ -	gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled odvrtnja navrtke pod uticajem dinamičkog opterećenja	[kN]
$\Delta F_{p,C,4}$ -	gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled poprečne kontrakcije čeličnih ploča u spoju izloženom aksijalnoj sili zatezanja	[kN]
$\Delta F_{p,C,5}$ -	gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled dodatnog opterećenja koje deluje u pravcu ose zavrtnjeva	[kN]
$\Delta F_{p,C,k}$	karakteristična vrednost gubitka sile prednaprezanja	[%]

$\Delta F_{p,C,pr}(t)$ -	smanjenje sile prednaprezanja u zavrtnju usled puzanja cink-silikatnog premaza, u trenutku t	
$\Delta F_{p,C,t0}(t)$ -	gubitak sile prednaprezanja u trenutku t , u odnosu na maksimalnu ostvarenu vrednost sile prednaprezanja u postupku ugradnje zavrtnja	[%]
$\Delta F_{p,C,t2}$ -	gubitak sile prednaprezanja u prve dve sekunde nakon dostizanja maksimalne vrednosti	[%]
$\Delta F_{p,C,t3}$ -	gubitak sile prednaprezanja u prvih deset sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti	[%]
$\Delta F_{p,C,t3}(t)$ -	gubitak sile prednaprezanja u trenutku t , u odnosu na ostvarenu vrednost sile prednaprezanja u trenutku $t_3=10$ sekundi, računato od trenutka postizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja	[%]
$\Delta F_{p,C,t4}$ -	gubitak sile prednaprezanja u prvih dvanaest časova nakon dostizanja maksimalne vrednosti	[%]
$\Delta l_{gč}$ -	izduženje dela zavrtnja između glave i čaure	[mm]
Δl_p -	izduženje dela zavrtnja između dve podloške	[mm]
$\Delta l_{pr}(t)$ -	ukupna promena debljine premaza u spoju, u trenutku t	[mm]
Δt -	interval vremenske integracije	[s]
$\Delta \varepsilon_{pr}(t)$ -	promena ukupne dilatacije premaza u spoju	[mm/mm]
$\Delta \sigma_C$ -	promena normalnog napona - kategorija detalja	[MPa]
$\Delta \sigma_L$ -	granica zamora pri konstantnoj amplitudi	[MPa]
$\Delta \sigma_R$ -	opseg normalnog napona	[MPa]
ΣF_p -	ukupna sila pritezanja kojom su pritegnute tarne površi	[kN]
\emptyset -	prečnik tela epruvete	[mm]

Grčka mala slova

α -	odnost nominalne i stvarne dilatacije na mestu merne trake	-
α_b -	koeficijent pritiska po omotaču rupe	-
α_{EXP} -	Odnos nominalne i stvarne dilatacije (određene eksperimentom) na mestu merne trake	-

α_{MKE} -	Odnos nominalne i stvarne dilatacije (određene primenom metode konačnih elemenata) na mestu merne trake	-
α_v -	koeficijent smicanja	-
γ_{M0} -	parcijalni koeficijent sigurnosti	-
γ_{M2} -	parcijalni koeficijent sigurnosti	-
γ_{M3} -	parcijalni koeficijent sigurnosti	-
$\delta_{a,navoja}$ -	elastična fleksibilnost angažovanog dela navoja visokovrednog zavrtnja	[mm/N]
δ_{glave} -	elastična fleksibilnost glave visokovrednog zavrtnja	[mm/N]
$\delta_{i,A}$ -	fleksibilnost dela zavrtnja određena analitički	[mm/N]
$\delta_{i,MKE}$ -	fleksibilnost dela zavrtnja određena primenom metode konačnih elemenata	[mm/N]
$\delta_{navrtke}$ -	elastična fleksibilnost navrtke visokovrednog zavrtnja	[mm/N]
$\delta_{s,navoja}$ -	elastična fleksibilnost slobodnog dela navoja visokovrednog zavrtnja	[mm/N]
δ_{sp} -	elastična fleksibilnost steznog paketa	[mm/N]
δ_{spoja} -	elastična fleksibilnost spoja sa visokovrednim zavrtnjevima	[mm/N]
$\delta_{spoja,A}$ -	analitički određena elastična fleksibilnost spoja sa visokovrednim zavrtnjevima	[mm/N]
δ_{tela} -	elastična fleksibilnost tela visokovrednog zavrtnja	[mm/N]
δ_z -	elastična fleksibilnost prednapregnutog zavrtnja	[mm/N]
ε -	dilatacija merne trake	[μ m/m]
ε -	dilatacija epruvete	[%]
ε_{nom} -	nominalna dilatacija zavrtnja	[μ m/m]
$\varepsilon_{mt,EXP}$ -	dilatacija merne trake određena eksperimentom	[μ m/m]
$\varepsilon_{mt,MKE}$ -	dilatacija merne trake određena primenom metode konačnih elemenata	[μ m/m]
μ -	koeficijent trenja	-
μ_{sr} -	srednja vrednost koeficijenta trenja	-

ν -	Poasonov koeficijent	-
$\xi(t)$ -	odnost stvarne sile prednaprezanja u zavrtnju i njene minimalne propisane vrednosti, u trenutku t	-
σ -	normalni napon	[MPa]
$\sigma_{\text{nom,glave/čaure}}$ -	normalni napon ispod glave odnosno nožice čaure „ <i>Huck BobTail</i> “ zavrtnja	[MPa]
$\sigma_{\text{nom,podloške}}$ -	normalni napon ispod podloške visokovrednog zavrtnja	[MPa]
φ -	ugao konusa deformacije	[°]

Skraćenice

A-2	vrsta adhezionog sredstva	-
AKZ	antikoroziorna zaštita	-
BTM-6C	tip merne trake	-
DFT	debljina suvog premaza (<i>dry film thickness</i>)	[μm]
HBT -	visokovredni zavrtnj sa zaključavanjem (<i>lockbolt</i>) tipa „ <i>Huck BobTail</i> “	-
HV -	klasični visokovredni zavrtnj u svemu prema [24]	-
MKE -	metoda konačnih elemenata	-
TCB -	zavrtnj sa kontrolisanom silom prednaprezanja „ <i>Tension Control Bolt</i> “	-

1. UVOD

1.1. Opšte

Jedan od najvećih izazova savremenog građevinarstva jeste postizanje maksimalne industrijalizacije i prefabrikacije u procesu izgradnje objekata. Pored toga, smanjenje troškova i pojednostavljenje procesa održavanja imaju veliki uticaj na opravdanost i izvodljivost izgradnje i održavanja objekata. Skraćenje rokova izgradnje, smanjenje uticaja ljudskog faktora u procesu izgradnje i smanjenje troškova i kompleksnosti održavanja inženjerskih objekata kao što su: mostovi, antenski stubovi, stubovi dalekovoda, vetrogeneratori i slično, ima veliki društveno-ekonomski značaj. U tu svrhu se kontinuirano razvijaju, kako novi konstruktivni sistemi, tako i novi elementi konstrukcija i njihove veze.

Mehanička spojna sredstva predmet su brojnih istraživanja i usavršavanja od svoje pojave, a sa ciljem pojednostavljenja i ubrzavanja procesa izgradnje metalnih konstrukcija. Pored referentnih inostranih istraživanja, o kojima će svakako biti reči, u našoj zemlji teorijskim i eksperimentalnim istraživanjem mehaničkih spojnih sredstava bavili su se Lj. Vajić [1], čije je istraživanje pionirsko u oblasti merenja sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima i Z. Marković [2], [3] koji je prvi uspeo da eksperimentalno određene nosivosti samonarezujućih mehaničkih spojnih sredstava potvrdi i numeričkom analizom. Navedena istraživanja su u domenu primene mehaničkih spojnih sredstava u građevinarstvu, dok je razmatranje ovog problema sa stanovišta mašinskih elemenata posebna oblast, koja je takođe bogata saznanjima i istraživanjima domaćih i inostranih istraživača.

Prednapregnuti visokovredni zavrtnjevi imaju nezamenljivu ulogu u izgradnji čeličnih konstrukcija. Posebno su značajni u tarnim spojevima, gde se njihovom primenom značajno povećava nosivost dinamički opterećenih konstrukcija na zamor materijala. Prednaprežanjem zavrtnjeva, smičući spojevi kod kojih se sila prenosi smicanjem tela zavrtnja i pritiskom po omotaču rupe postaju tarni spojevi. Kod tarnih spojeva smičuća sila se prihvata i prenosi putem trenja koje se realizuje na kontaktu

elemenata u spoju. Nosivost ovakvog spoja zavisi od koeficijenta trenja u tarnim površima i od inteziteta sile prednaprezanja u spojnom sredstvu.

Gubitak sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima je poznat fenomen, kako u građevinskim, tako i u mašinskim konstrukcijama. Prema Sedlacek-u i Kammel-u [4], gubitak ili nedovoljna vrednost sile prednaprezanja mogu se javiti usled samoodvijanja zavrtanja, relaksacije u spoju, nedovoljnog prednaprezanja ostvarenog u postupku ugradnje (na primer zbog neadekvatne ugradnje), puzanja materijala, upotrebe neadekvatne antikorozijske zaštite i plastifikacije zavrtnja u zoni angažovanog navoja. Takođe, u slučaju delovanja spoljašnjeg opterećenja, gubitak sile prednaprezanja može se javiti i usled poprečne kontrakcije aksijalno zategnutih elemenata (čeličnih ploča) spoja.

Ovaj proces može se podeliti na tri dela: inicijalni gubici sile prednaprezanja koji najviše zavise od metode ugradnje zavrtnja, zatim kratkoročni gubici sile prednaprezanja (*short term relaxation*) koji se odvijaju u prvih dvanaest sati nakon ugradnje zavrtnja i na kraju dugoročni gubici sile (*long term relaxation*) za koje se pretpostavlja da se odvijaju asimptotski. Što je veća maksimalna ostvarena sila u toku ugradnje zavrtnja veći su i inicijalni gubici. Isto važi i u slučaju prednaprezanja zavrtnja preko granice razvlačenja. Ustavno je i da brži proces ugradnje (prednaprezanja) zavrtnja rezultuje većim inicijalnim gubicima sile [5], kao i da se gubici sile povećavaju sa smanjenjem dužine zavrtnjeva.

Ukoliko je ostvareni pritisak u kontaktnoj spojnici dovoljno veliki da izazove puzanje sloja antikorozijske zaštite, dolazi do smanjenja sile prednaprezanja u zavrtnju, a samim tim i sile pritezanja u spoju, što rezultuje smanjenjem nosivosti spoja na proklizavanje [6]. Dosadašnja istraživanja pokazala su da ukupan gubitak sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima dominantno zavisi od vrste i debljine antikorozijske zaštite primenjene na tarnim površinama [7], [8] i [9]. Sa povećanjem broja elemenata u tarnom spoju povećava se i ukupna debljina antikorozijske zaštite, što dovodi do većeg gubitka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima. Ipak, fenomen se ne ograničava samo na čisto puzanje materijala. Sila u zavrtnju menja se kroz vreme, pa je evaluacija ovog procesa veoma kompleksna. Suštinski, puzanje zavisi od sile pritezanja spoja, koja je pak funkcija vremena. Zbog svega navedenog, veoma je

važno pouzdano proceniti intezitet sile prednaprezanja u zavrtnjevima u bilo kom trenutku u toku životnog veka konstrukcije.

Sistemi antikorozijske zaštite, čiji je uticaj na koeficijent trenja i smanjenje sile prednaprezanja ispitivan, menjali su se kroz vreme, jer su istraživači pratili razvoj ovih sistema i trudili se da svaki novi ispitaju i sa ovog stanovišta. Uz obavezno ispitivanje uzoraka bez antikorozijske zaštite (kao etalonskih), najveći deo istraživanja odnosi se na površine zaštićene galvanizacijom [9], [10], cinkovanjem i metalizacijom [11], [12], a u poslednje vreme i na sisteme na bazi cink-silikatnih premaza [10], [13].

Ukoliko se dovoljno tačno može pretpostaviti očekivani gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju isti se može uzeti u obzir u postupku projektovanja konstrukcije. Na taj način bi se otklonila opasnost da dođe do gubitka nosivosti konstrukcije, ali i smanjili obim i troškovi održavanja konstrukcija (dotezanje zavrtnjeva).

1.2. Predmet i cilj istraživanja

Primenom cink-silikatnih premaza kao antikorozijske zaštite tarnih površina povećava se brzina izgradnje konstrukcija i obezbeđuje adekvatna zaštita od korozije. Ovakav sistem zaštite ima niz prednosti u odnosu na široko primenjivan postupak metalizacije, pre svega u smislu brzine sprovođenja, zahtevane kvalifikovanosti radne snage i cene. Prilikom rekonstrukcije mosta „*Gazela*“ u Beogradu (u toku 2011. i 2012. godine), prvi put je u Srbiji, za antikorozijsku zaštitu tarnih površina primenjen cink-silikatni premaz. Tada je, za potrebe njegove primene, određen koeficijent trenja koji se može ostvariti u tarnoj površini. Ipak, uticaj primene ovakvog premaza na gubitke sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima nije istražen.

Pored, kod nas najčešće primenjivanih, visokovrednih HV zavrtnjeva sve veću primenu u građevinarstvu nalaze i visokovredni zavrtnjevi kod kojih se navrtka utiskuje u navoj zavrtnja u postupku ugradnje. Ovi se zavrtnjevi još nazivaju i antivandal ili zavrtnjevi sa zaključavanjem (*lockbolts*). Njihova primena ima niz prednosti, kao što su: brza ugradnja, ugradnja sa jedne strane zavrtnja, nemogućnost demontaže zavrtnja bez specijalne opreme, povećana nosivost na dejstvo dinamičkog opterećenja i slično. Nedostatak ovih zavrtnjeva je nemogućnost njihovog dotezanja nakon ugradnje. Dakle, neutralisanje nastalih gubitaka sile prednaprezanja dotezanjem zavrtnja u procesu održavanja konstrukcija kod ovih zavrtnjeva nije moguće.

Istraživanje koje je predmet disertacije obuhvata inicijalne, kratkotrajne i dugotrajne gubitke sile prednaprezanja, u dve navedene vrste zavrtnjeva, u funkciji od: debljine antikorozijske zaštite (cink-silikatni premaz) u tarnim površinama, dužine zavrtnja, vrste opterećenja i redosleda ugradnje zavrtnjeva. Takođe, predmet istraživanja je i određivanje koeficijenta trenja koji se primenom predmetnog cink-silikatnog premaza ostvaruje u tarnim površinama.

U skladu sa predmetom istraživanja definisani su i njegovi ciljevi:

- da se istraži opravdanost primene cink-silikatnih premaza kao antikorozijske zaštite u tarnim spojevima, pre svega sa stanovišta ostvarenog koeficijenta trenja i uticaja na gubitke sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima
- da se ispita mogućnost primene zavrtnjeva sa zaključavanjem u tarnim spojevima;
- da se odredi ukupan gubitak sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima i razloži na inicijalne i dugotrajne gubitke,
- da se ukupan gubitak sile prednaprezanja razloži na delove koji potiču od puzanja osnovnog materijala zavrtnja i čeličnih elementa u spoju, od antikorozijske zaštite kao i od dejstva dinamičkog opterećenja,
- da se odredi minimalna dužina zavrtnja od koje se posmatrani fenomen eventualno može zanemariti,
- da se odredi gubitak sile prednaprezanja u već ugrađenom zavrtnju u trenutku ugradnje preostalih zavrtnjeva u spoju,
- da se dobijene vrednosti gubitaka sile prednaprezanja ekstrapoliraju na period od 20 godina,
- da se daju preporuke na koji način posmatrane fenomene uzeti u obzir u postupku projektovanja čeličnih konstrukcija kako bi se obezbedila nosivost konstrukcija za period do 20 godina i smanjili troškovi njihovog održavanja.

1.3. Značaj i opravdanost istraživanja

Pored neophodnog izučavanja i sistematizacije postojećih znanja ovo istraživanje iziskuje i značajna materijalna i logistička sredstva. Kao takvo mora biti od posebnog značaja za naučnu i stručnu javnost kako bi se angažovani resursi opravdali, a istraživanje imalo smisla.

Na polju primenjenih materijala i elemenata, ovo istraživanje:

- izučava mogućnosti primene predmetnog cink-silikatnog premeza u sistemima antikorozijske zaštite u kojima nije predviđen ni od strane proizvođača, a samim tim podstiče razvoj ove grane industrije;
- izučava nova rešenja u oblasti antikorozijske zaštite tarnih površina koja su jeftinija, ekološki prihvatljivija i brže izvodljiva, što ima značajan uticaj na cenu i brzinu izgradnje objekata kao i na očuvanje životne sredine;
- upoznaće domaću stručnu javnost sa zavrtnjevima sa zaključavanjem, s obzirom da se njihova dosadašnja primena u Srbiji svodi na druge inženjerske oblasti i na slučajeve uvoza gotovih konstrukcija kao što su rezervoari. O primeni zavrtnjeva sa zaključavanjem u građevinskom konstrukterstvu nema zvaničnih podataka. Primenom ovih spojnih sredstava pre svega se rešava problem neovlašćenog odnošenja elemenata konstrukcija, kao što su antenski stubovi i stubovi dalekovoda, čime se nanosi velika šteta elektro-energetskom i telekomunikacionom sistemu Srbije.

Na polju unapređenja normi i standarda, ovo istraživanje:

- daje detaljno uputstvo za eksperimentalno određivanje sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima, što će značajno olakšati naredna istraživanja koja za osnov imaju praćenje ovog parametra. Prikazane procedure predstavljaju dobar osnov za eventualnu standardizaciju ovog postupka;
- vrši kvantifikaciju gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima kao i ekstrapolaciju dobijenih vrednosti na životni vek konstrukcije, čime se omogućava unapređenje važećih standarda za projektovanje čeličnih konstrukcija, a posmatrani fenomen čini predvidivim u zadatim graničnim uslovima.

1.4. Kratak pregled sadržaja disertacije

Disertacija se sastoji iz sedam poglavlja. Nakon uvodnih razmatranja o predmetu istraživanja, ciljevima, značaju i opravdanosti disertacije, u drugom poglavlju izvršen je pregled stanja i istraživanja u posmatranoj oblasti. Poglavlje je podeljeno u dva dela. U prvom delu predstavljeni su korišćeni zavrtnjevi i cink-silikatni premaz, pre svega njihove tehničke karakteristike i specifičnosti primene u građevinskim konstrukcijama. Značajna pažnja posvećena je zavrtnjevima sa zaključavanjem za koje je prikazan hronološki pregled razvoja i usavršavanja, karakteristike i način primene. Za, kod nas

najčešće primenjivanje, visokovredne HV zavrtnjeve prikazan je pregled važećih standarda. Upotrebljeni cink-silikatni premaz predstavljen je sa stanovišta proizvođački deklariranih svojstava, ali i kroz prikaz rezultata eksperimentalnog određivanja koeficijenta trenja koji se javljaju u tarnim spojevima u slučaju njegove primene. Drugi deo ovog poglavlja bavi se pregledom istraživanja koja se odnose na koeficijente trenja u tarnim spojevima, zavisno od vrste i debljine antikorozijske zaštite i istraživanja koja izučavaju gubitke sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima. Iako u predmetnim oblastima ne postoji veliki broj dostupnih istraživanja, u poslednjih petnaest godina sprovedeno je nekoliko veoma značajnih, pa je akcenat stavljen na njih.

Treće poglavlje predstavlja prikaz sprovedenih sopstvenih eksperimentalnih istraživanja. Na početku su predstavljena uvodna istraživanja kojima se određuju mehanička svojstva primenjenih zavrtnjeva, koeficijent trenja između tela i navrtke primenjenih HV zavrtnjeva i koeficijent trenja za slučaj primene odabranog cink-silikatnog premaza, a zatim i centralno eksperimentalno istraživanje kojim se određuju gubici sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima. U ovom poglavlju dat je detaljan opis metode merenja sile u zavrtnju ugradnjom mernih traka u telo zavrtnja. Poseban akcenat stavljen je na primenjeni postupak kalibracije zavrtnjeva i tumačenje rezultata kalibracije. Detaljno je opisan postupak formiranja i numeracije uzoraka.

U četvrtom poglavlju izvršen je prikaz obrađenih rezultata eksperimenta, sa vrednostima sile u zavrtnjevima u referentnim vremenskim trenucima. S obzirom na veliki broj uzoraka i dug vremenski period kontinuiranog monitoringa, nije dat zapis svih sakupljenih rezultata, već su, za ovo istraživanje relevantni rezultati, sistematično prikazani kako bi se lakše razumela njihova dalja analiza.

Peto poglavlje donosi analizu rezultata eksperimenta po svim fenomenima koji se iz njih mogu analizirati. Pored statističkih metoda, koriste se i postojeći analitički izrazi ali i metod konačnih elemenata za definisanje fleksibilnosti spojeva sa visokovrednim zavrtnjevima kao i za određivanje reoloških svojstava primenjenog premaza. Ovo poglavlje je ključni osnov za donošenje zaključaka i preporuka.

Šesto poglavlje sadrži zaključke i preporuke za primenu dobijenih rezultata, kao i smernice za dalji naučno-istraživački rad u ovoj oblasti.

Poslednje poglavlje predstavlja pregled korišćene literature.

Disertacija sadrži i priloge u kojima je dat laboratorijski izveštaj o određivanju koeficijenta trenja, izveštaj o određivanju debljine premaza na čeličnim pločama, kalibracione krive za sve zavrtnjeve i dijagrami promene sile u zavrtnjevima u periodu od oko 1800 sekundi od trenutka ugradnje.

2. PREGLED STANJA I ISTRAŽIVANJA U OBLASTI

U ovom poglavlju biće prikazan pregled stanja i istraživanja u oblasti, pre svega sa stanovišta primenjenih zavrtnjeva i vrste antikorozijske zaštite, kao i izučavanih fenomena: koeficijenta trenja u tarnim spojevima i gubitaka sile prednapreznja u visokovrednim zavrtnjevima. Za primenjene zavrtnjeve sa zaključavanjem i cink-silikatni premaz biće prikazane tehničke karakteristike i osobnosti primene, dok će se za primenjene HV zavrtnjeve, s obzirom na njihovu široku primenu i opšte poznata svojstva, dati kratak osvrt na važeće standarde sa naglaskom na izmene koje je donela njihova primena.

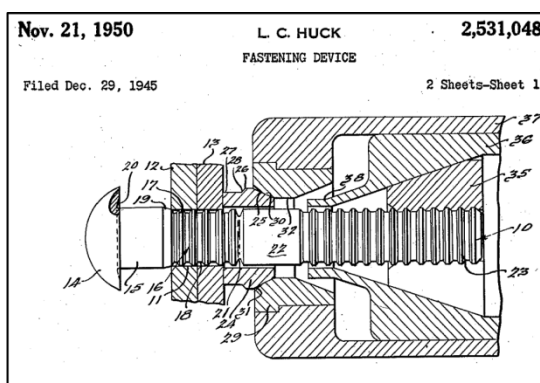
2.1. Visokovredni zavrtnjevi sistema „Huck BobTail - HBT“

2.1.1. Istorijat

Tvorac visokovrednih zavrtnjeva sa zaključavanjem je Louis C. Huck (1896-1956), priznati pronalazač i industrijalac čiji su izumi imali veoma zapaženo mesto u razvoju avio, auto i železničke industrije [14].



a)



b)

Slika 2.1: a) Louis C. Huck b) Originalna skica jednog od spojnih sredstava [14], [15]

Nakon završenog mašinskog fakulteta na Cornell Univerzitetu, Louis 1920. godine formira „Huck Axle Company“, razvija i patentira Huck osovinu sa dvostrukom redukcijom i počinje sa razvojem Huck kočionih sistema. General Motors otkupljuje 1926. godine licencu za Huck kočioni sistem, a Louis postaje inženjer konsultant u General Motors-u. U tom periodu Huck kočnice ugrađuju se u Cadillac, LaSalle, Buick i Chevrolet vozila. Nakon dve godine razvijanja rešenja za avio industriju, 1930. godine

napušta *General Motors* i posvećuje se razvoju aluminijskih pop-zakivaka (*blind rivets*) za avio industriju. S obzirom na veliku recesiju u Americi i nemogućnost za profitabilnu saradnju sa avio industrijom, Huck je razvio čelične pop-zakivke koji su našli široku primenu u auto industriji. Ipak, prva praktična primena čeličnih zakivaka bila je u toku 1932. godine i to u prototipu Madaras rotora za proizvodnju električne energije. Veliki uspeh ovog proizvoda rezultovao je formiranjem dve nove kompanije u toku 1933. godine i to „*Hukson Holding Corporation*“, koja se brinula o autorskim pravima za patente Huck Louis-a i „*Huck Manufacturing Corporation*“, koja se bavila razvijanjem patenata. Nakon neuspelog pokušaja spajanja sa kompanijom „*Clark Equipment*“, Huck nastavlja samostalan rad 1939. godine, koju je obeležio početak rata u Evropi i ponovno otvaranje velikog tržišta za aluminijske zakivke i njihovu primenu u avio industriji. Nakon nekoliko godina rada, aluminijski pop-zakivci kao i pneumatski pištolj za njihovu ugradnju razvijeni su do nivoa komercijalne primene i masovne proizvodnje, a prva njihova primena bila je 1943. godine kada su ugrađeni u avion B-24 proizveden u fabrici „*Willow Plant*“ u Mičigenu.

Louis Huck izumeo je originalno Huck spojno sredstvo 1944. godine, stvarajući na taj način čitavu novu kategoriju antivandal, ili spojnih sredstava sa zaključavanjem (*lockbolts*). Od 1955. godine ova spojna sredstva nazivaju se zajedničkim imenom „*Huck bolts*“. Ubrzo zatim, za potrebe spojnih sredstava većeg prečnika (preko ½") dizajnirao je i proizveo spojno sredstvo označeno kao C50L (slika 2.2a). Ovo je za kratko vreme postalo najčešće primenjivano spojno sredstvo prilikom izgradnje železnice i proizvodnje lokomotiva i vagona.

U potrazi za ekspertima u proizvodnji opreme za ugradnju zakivaka i zavrtnjeva, Huck-ova kompanija je 1965. godine kupila firmu „*Electrol Inc.*“ i objedinila kompletnu proizvodnju sistema za ugradnju u Kingston-u, New York.

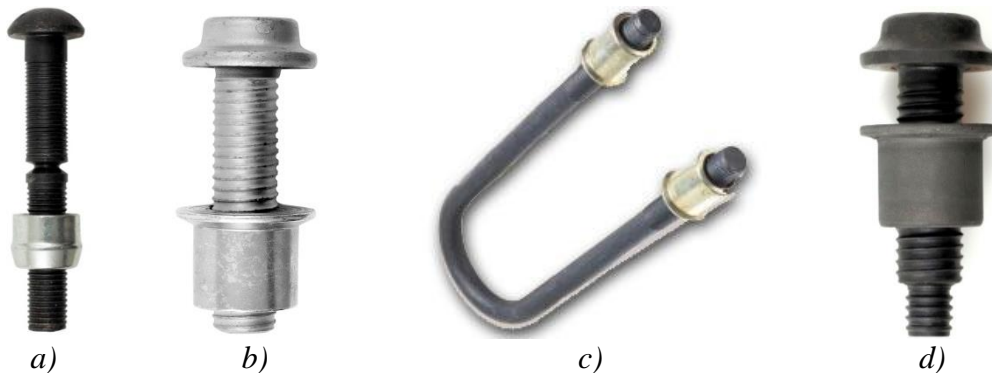
Sledeći značajan korak načinjen je u toku devedestih godina XX veka pojavom „*HuckSpin*“ (slika 2.2b) spojnih sredstava. Ovo rešenje kombinuje izuzetne karakteristike zavrtnjeva sa zaključavanjem Lock bolts i sofisticirani alat za veoma brzu ugradnju uz eliminisanje gubitka prilikom otkidanja kraja tela zavrtnja (*pin tail waste*) koji je karakterističan za prethodnu generaciju Huck zavrtnjeva.

U toku 1991. godine došlo je do konačnog preuzimanja kompanije „*Huck Manufacturing Company*“ od strane „*The Thiokol Corporation*“, koja 1998. godine

menja ime u „Howmet“. Konačno, „Alcoa“ postaje vlasnik kompanije „Howmet“ 2000. godine i to je i dan danas. Koncept razvoja bio je usavršavanje dve vrste proizvoda: pop-zakivaka i zavrtnjeva sa zaključavanjem o čemu svedoči činjenica da danas, u paleti proizvoda kompanije Alcoa, postoji na stotine proizvoda koji predstavljaju varijacije ova dva spojna sredstva. Huck sistemi spojnih sredstava, između ostalog, danas se koriste za izradu aviona Boeing 787 i Airbus A380.

Nakon više od deset godina testiranja na kamionima i prikolicama, u toku vožnje, Alcoa je dizajnirao U-Spin spojno sredstvo (slika 2.2c). U-Spin spojna sredstva ugrađuju se u paru, za šta je potrebno 10-15 sekundi standardnom Huck tehnologijom „zaviti – utisnuti – odviti“ (*spin on – swage – spin off*). U toku ugradnje u obe grane spojnog sredstva unosi se ujednačena sila prednaprezanja što za rezultat ima uravnotežen spoj nakon ugradnje. S obzirom da se primenom ovih spojnih sredstava ostvaruje konzistentna sila prednaprezanja eliminiše se potreba za dotezanjem. Više od sedam godina U-Spin spojna sredstva su standard u Volvo vozilima [16].

BobTail sistem spojnih sredstava (slika 2.2d) razvijen je da zameni, u tom trenutku najčešće primenjivani sistem u železničkoj industriji, C50L. Kombinacija veoma laganog i efikasnog sistema za ugradnju i precizno dizajniranih zavrtnjeva donela je značajan napredak u razvoju železničke industrije. Pojavom „Huck BobTail“ zavrtnjeva, pogotovo onih velikog prečnika (preko 12 mm), otvorilo se pitanje primene ovog sistema u građevinskoj industriji. Svesni ove činjenice, inženjeri kompanije „Alcoa Fastening Systems“ dizajnirali su zavrtnjeve većeg prečnika od onih koji se koriste u auto i avio industriji. Sa zavrtnjevima prečnika do 25,4 mm (1") i odgovarajućim laganim alatom za ugradnju, velikom brzinom ugradnje i kontrolisanom silom prednaprezanja nema sumnje da će ovi zavrtnjevi zauzeti značajno mesto u polju građevinske industrije.



Slika 2.2: a) C50L, b) HuckSpin, c) U-Spin, d) Huck BobTail

Na putu do široke primene novog sistema zavrtnjeva u građevinarstvu stoje i neki njegovi nedostaci. Na prvom mestu to je nepostojanje kriterijuma za projektovanje (standarda) koji bi omogućili široku primenu sistema „Huck BobTail“ u inženjerskoj praksi. Na drugom mestu je svakako činjenica da se zavrtnjevi „Huck BobTail“ ne mogu dotezati. Za razliku od primene u avio, auto i železničkoj industriji, gde je akcenat na zaključavanju zavrtnja, u građevinarstvu je veoma važna i veličina sile prednapreznja koja se ostvaruje u zavrtnjevima nakon ugradnje. Zbog toga je sproveden čitav niz eksperimentalnih istraživanja koja služe da sa velikom pouzdanošću definišu minimalne sile prednapreznja u zavrtnjevima nakon ugradnje. Dodatni problem predstavlja i smanjenje sile prednapreznja kroz vreme, što je predmet aktuelnih eksperimentalnih istraživanja čiji se smisao može izraziti rečenicom: „Nije važno što postoji gubitak sile prednapreznja u zavrtnjevima sve dok znamo koliki je!“

2.1.2. „Huck BobTail“ zavrtnanj i čaura

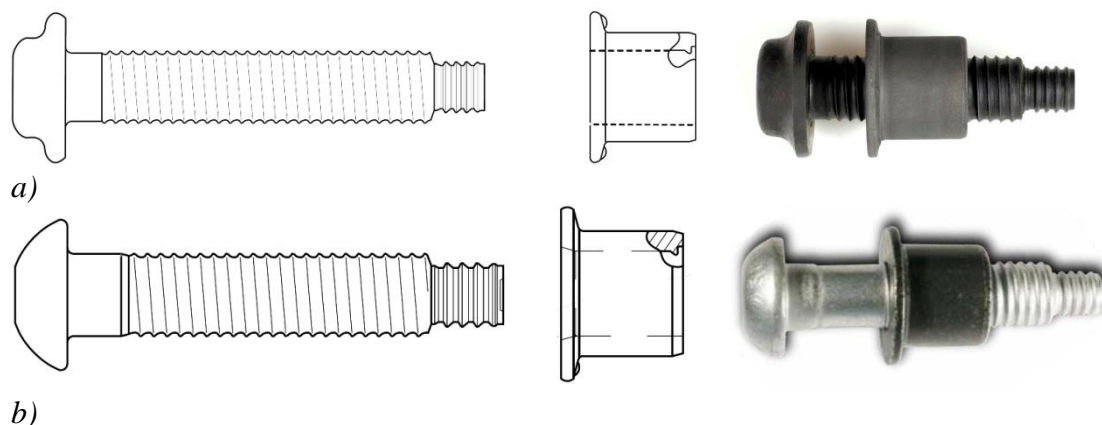
„Huck BobTail“ zavrtnanj sa zaključavanjem je spojno sredstvo koje se sastoji iz dva dela: zavrtnja i čaure (slika 2.3).



Slika 2.3: Spojno sredstvo sistema „Huck BobTail“

Prema obliku glave dele se na: zavrtnjeve sa glavom sa prirubnicom (*flanged head*) (slika 2.4a) i zavrtnjeve sa okruglom glavom (*round head*) (slika 2.4b). Zavrtnjevi malog prečnika mogu imati još neke oblike glave, ali se oni izrađuju samo po specijalnom zahtevu. Što se tiče prečnika zavrtnja [17] postoje:

- imperijal zavrtnjevi malog prečnika: 3/16" (4,8 mm), 1/4" (6,4 mm), 5/16" (7,9 mm) i 3/8" (9,5 mm),
- imperijal zavrtnjevi velikog prečnika: 1/2" (12,7 mm), 5/8" (15,9 mm), 3/4" (19,1 mm), 7/8" (22,2 mm) i 1" (25,4 mm),
- metrički zavrtnjevi velikog prečnika: 12 mm, 14 mm, 16 mm i 20 mm.



Slika 2.4: HBT zavrtnjevi a) sa glavom sa prirubnicom, b) sa okruglom glavom [17]

U zavisnosti od oblika glave i prečnika "Huck BobTail" zavrtnjevi izrađuju se u klasama čvrstoće 5.8, 8.8 i 10.9. Svaki tip zavrtnja ima svoju čauru odgovarajućih dimenzija i čvrstoće. Zavrtnjevi se proizvode od srednje ugljeničnog čelika ili legiranog čelika, dok se čaure proizvode isključivo od nisko ugljeničnog čelika što je veoma važno s obzirom na način njihove ugradnje. Antikorozijska zaštita zavrtnjeva je na bazi cinka i to klasično cinkovanje, ili Geomet metoda [18], dok se čaure uvek zaštićuju klasičnim postupkom cinkovanja.

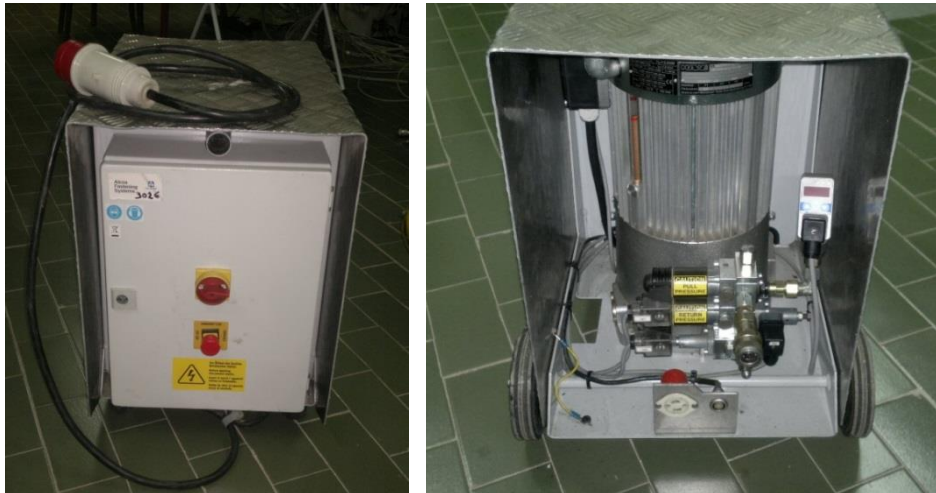
Efektivni prečnik zavrtnja je umanjen u odnosu na nazivni kako bi se omogućilo veće izduženje zavrtnja u postupku ugradnje. Prečnik je konstantan celom dužinom tela zavrtnja, od glave do repa, što olakšava poravnanje spojeva u koje sa ugrađuju. Redukcija prečnika zavrtnja omogućava formiranje većeg radijusa na spoju glave i tela zavrtnja, što garantuje dobru raspodelu sile prednaprezanja iz zavrtnja. Prirubnice (nožica) na glavi zavrtnja i na čauri eliminišu potrebu za podloškama i povećavaju čvrstoću spoja. Produženje zone sa navojem moguće je zahvaljujući činjenici da je navoj BobTail zavrtnjeva 6 do 10 puta veće čvrstoće od navoja običnih zavrtnjeva.

U unutrašnjosti čaure ne postoji navoj već samo vođica („fit-up“ tab) (slika 2.3) čija je uloga da omogući uvrtnje čaure na navoj zavrtnja pre ugradnje. Svaka čaura na nožici ima „bradavičaste“ indikatore ugradnje (*bump crease installation indicators*).

Na kraju tela zavrtnja nalazi se rep čiji su prečnik i dužina određeni tako da omoguće normalno funkcionisanje opreme za ugradnju. Na repu se nalaze prstenasti žljebovi (*pull grooves*), koji omogućavaju povlačenje zavrtnja u toku njegove ugradnje.

2.1.3. Oprema za ugradnju “Huck BobTail” zavrtnjeva

Postoji veliki broj sistema za ugradnju BobTail zavrtnjeva, zavisno od prečnika zavrtnja, vrste spojeva u kojima se koriste i pristupačnosti mesta na kojima se zavrtnjevi ugrađuju. Da bi se izvršila ugradnja “Huck BobTail” zavrtnja neophodna je sledeća oprema: napajanje (slika 2.5) – služi za napajanje strujom alata za ugradnju zavrtnjeva, presa za ugradnju zavrtnjeva (slika 2.6a) – hidraulička ili pneumatska, glava za ugradnju zavrtnjeva (*nose assembly*) (slika 2.6b) – bira se u zavisnosti od tipa alata za ugradnju i vrste zavrtnja [17].



Slika 2.5: Napajanje za ugradnju HBT zavrtnjeva

Mogućnost brze zamene glave za ugradnju zavrtnjeva (*installation nose*) sistemom za demontažu zavrtnjeva (*cutter nose*) omogućava da se demontaža BobTail zavrtnjeva vrši istom opremom kao i ugradnja. BobTail sistem za demontažu proizvodi se za sve postojeće prečnike zavrtnjeva. U početku, sistem za demontažu imao je problem sa oštećenjima i deformacijom usled toplote kao i sa pojavom varnica i prskanjem materijala u toku demontaže. Sistem za demontažu koji se danas koristi radi na principu bočnog sečenja čaure (*side cutting collar cutter*), a pokazao je najbolje rezultate u praksi. Upotreba ovakvog sistema omogućava jednostavnu i brzu demontažu zavrtnjeva usled koje ne dolazi do oštećenja ostalih elemenata konstrukcije.



Slika 2.6: a) Presa sa glavom za ugradnju HBT zavrtnjeva, b) glava za demontažu HBT zavrtnjeva

2.1.4. Postupak ugradnje „Huck BobTail“ zavrtnjeva

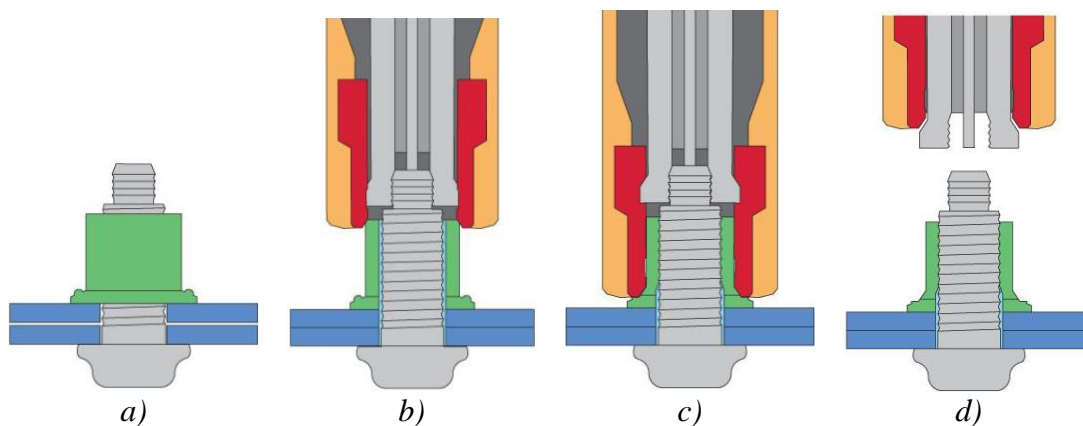
BobTail sistem podrazumeva kratak ciklus ugradnje zavrtnjeva uz primenu lagane prese. Na primer, vreme potrebno za ugradnju jednog zavrtnja prečnika 5/8", klase čvrstoće 8, je dve sekunde. Dužina jednog ciklusa u dobroj meri proizilazi iz kratkog vremena koje je potrebno da se glava za ugradnju zavrtnja prisloni na kraj zavrtnja i inicira (pritiskom na dugme) postupak ugradnje (slika 2.7). Od trenutka kada operater pritisne prekidač, postupak gnječenja čaure (*swaging of the collar*) i otpuštanja zavrtnja odvija se bez dodatnog angažovanja operatera.



Slika 2.7: Ugradnja HBT zavrtnjeva prečnika 20 mm a) crvena lampica kao indikator rada opreme za ugradnju b) postavljanje opreme u položaj za rad

Telo zavrtnja postavi se u pripremljenu rupu i izvrši ručno uvrtnanje čaure uz pomoć vođice (*“fit-up” tab*) koja se nalazi sa njene unutrašnje strane (slika 2.8a). Sledeći korak u postupku ugradnje zavrtnja je postavljanje alata za ugradnju na prstenaste žljebove za povlačenje (*annular pull grooves*) koji se nalaze na repu zavrtnja.

Kada je alat aktiviran (upaljeno crveno svetlo indikatorske lampice - Slika 2.7a) potezač (*puller*) koji se nalazi u glavi za ugradnju zavrtnjeva uvlači rep zavrtnja u alat što dovodi do oslanjanja nakovnja (*swaging anvil*) na čauru. Na taj način, inicijalnim povlačenjem repa zavrtnja, poništavaju se eventualni zazori između elemenata konstrukcije koji se zavrtnjem povezuju (slika 2.8b). Kada sila povlačenja repa zavrtnja dostigne definisanu vrednost počinje proces utiskivanja čaure u navoj na telu zavrtnja, pri čemu dolazi do izduženja zavrtnja i čaure što izaziva pojavu sile prednaprezanja u zavrtnju (slika 2.8c). Nakon završetka utiskivanja čaure u navoj zavrtnja alat izbacuje zavrtnj i otpušta potezač čime se postupak ugradnje završava (slika 2.8d) [19].



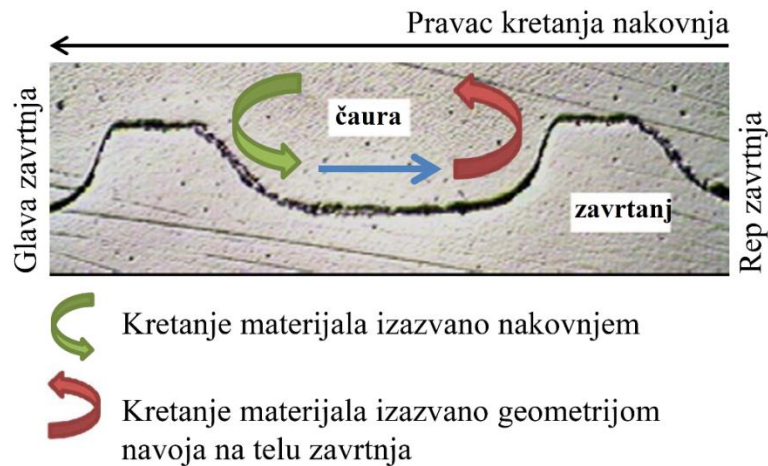
Slika 2.8: a) Zavrtnj pripremljen za ugradnju, b) rep zavrtnja uvučen u alat, c) gnječenje čaure d) kraj procesa ugradnje zavrtnja [19]

Indikatori ugradnje koji se nalaze na nožici čaure pokazuju da li je BobTail čaura u potpunosti utisnuta u navoj na telu zavrtnja. Kratak vizuelni pregled indikatora ugradnje dovoljan je da se operater uveri da li je zavrtnj ispravno ugrađen, odnosno da li je postupak ugradnje sproveden u potpunosti (slika 2.9).



Slika 2.9: Indikatori ugradnje HBT zavrtnja na nožici čaure pre i posle ugradnje zavrtnja

Opisanim načinom ugradnje postiže se postupno utiskivanje čaura u navoj tela zavrtnja koji je izgrađen od tvrdog materijala. Sadejstvom zavrtnja i čaura dobija se ugrađeni BobTail zavrtnanj. Postupkom gnječenja (*squeezing action*) smanjuje se debljina zida čaura što, zbog konstantne zapremine čaura, dovodi do njenog izduženja. Kretanje materijala čaura, u kombinaciji sa specijalnom orijentacijom navoja zavrtnja, dovodi do izduženja zavrtnja i uvođenja sile prednaprezanja u spoj (slika 2.10) [15], [17].



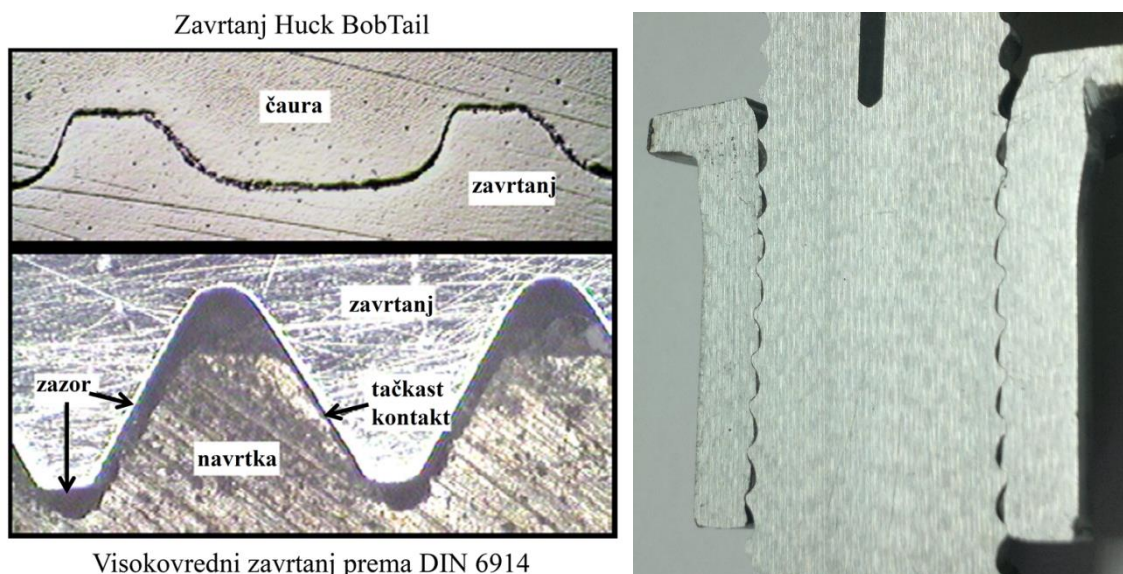
Slika 2.10: Princip unošenja sile prednaprezanja u HBT zavrtnanj

U poređenju sa drugim zavrtnjevima sa zaključavanjem [20] kao i sa zavrtnjevima sa kontrolisanim prednaprezanjem (*tension controlled bolts*) na kraju tela BobTail zavrtnjeva nalazi se rep (produžetak tela zavrtnja) do čijeg otkidanja ne dolazi u postupku ugradnje. Prednosti ovog rešenja su smanjenje ukupne količine utrošenog materijala za izradu zavrtnja, kao i nepostojanje otpada u procesu ugradnje. Otkidanje repa zavrtnja, u slučaju većih prečnika, izaziva veoma veliku buku, pa se može reći da u slučaju HBT zavrtnjeva imamo čist i tih postupak ugradnje. Takođe, u poređenju sa zavrtnjevima čija ugradnja podrazumeva otkidanje repa zavrtnja, „Huck BobTail“ zavrtnjevi su otporniji na dejstvo korozije jer ne postoje delovi bez antikorozijske zaštite nakon ugradnje zavrtnja niti potreba za dodatnim radom.

Što se tiče zaštite na radu rukovaoca opremom ovakav sistem je veoma povoljan. Naime, nepostojanje loma repa zavrtnja povoljno utiče na sluh rukovaoca (nema buke), a povrede komadima metala usled otkidanja repa zavrtnja nisu moguće. Ovakav postupak ugradnje onemogućava prekomerno naprezanja ramena i ruku rukovaoca i povećava njegovu ukupnu bezbednost.

„Huck BobTail“ zavrtnjevi ne izlažu se dejstvu torzije u toku postupka ugradnje. Zbog toga se sasvim bezbedno mogu izložiti većim vrednostima sile prednaprezanja. Za razliku od ostalih zavrtnjeva, koji su u postupku ugradnje izloženi kombinaciji torzije i zatezanja, „Huck BobTail“ zavrtnjevi izloženi su samo zatezanju.

Pun kontakt metal-metal koji se ostvaruje između materijala čaure i navoja na telu zavrtnja eliminiše zazor koji se inače javlja između navoja kod običnih zavrtnjeva i navrtki (slika 2.11). U tom slučaju, kontakt se ostvaruje samo na 30-35% ukupne površine navoja navrtke i tela zavrtnja. Mekši materijal čaure ispunjava prostor između navoja u ojačanom materijalu tela zavrtnja. Postojanje zazora je loše jer može dovesti do smanjenja nosivosti zavrtnjeva na zamor, ali i do gubitka sile prednaprezanja u uslovima značajnih vibracija kod konstrukcija kao što su vetrogeneratori, antenski stubovi, mostovi itd.



Slika 2.11: Kontakt između zavrtnja i čaure/navrtke nakon ugradnje

2.1.5. Proračun nosivosti zavrtnjeva sa zaključavanjem

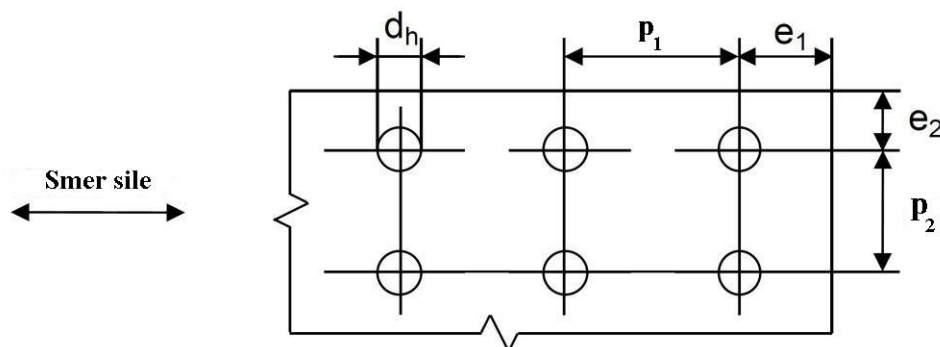
Otežavajuća okolnost za masovnu primenu „Huck BobTail“ zavrtnjeva u građevinarstvu svakako je nedostatak standarda. Do skoro, nosivost ovih spojnih sredstava u smičućim i zatežućim spojevima određivana je isključivo na osnovu kataloških vrednosti proizvođača. Stvari su počele da se menjaju sprovođenjem veoma obimnih i rigoroznih eksperimentalnih istraživanja, u skladu sa važećim standardima. Rezultat je usledio 2013. godine kada su zavrtnjevi sa zaključavanjem sistema „Huck BobTail“ proizvođača „Alcoa Fastening Systems“ dobili prestižno nacionalno nemačko odobrenje poznato pod nazivom „allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ)“ [21].

Ovo odobrenje dodeljuje se onim proizvodima i tipovima konstrukcija za koje ne postoje generalno priznata pravila za proračun i konstruisanje, odnosno za koje ne postoji DIN (*Deutsches Institut Fur Normang e.V.*) standard.

Istovremeno, istraživanja sprovedena od strane nemačkog instituta za građevinarstvo „DIBt“ (*Deutsches Institut für Bautechnik*), referentne ustanove formirane od strane nemačke države, definisala su “*Huck BobTail*” zavrtnjeve kao spojna sredstva koja nije potrebno održavati (*maintance free*) u toku životnog veka spoja u kojem se koriste. Ovo ih svakako izdvaja od svih sličnih proizvoda na tržištu.

Kao kruna rada na razvoju standarda za proračun HBT zavrtnjeva, u januaru 2014. godine pojavio se nacrt standarda pod nazivom “*Sistemi zavrtnjeva sa zaključavanjem – proračun prema Evrokodu 3 i VDI 2230 standardu*” [22] (*Schließringbolzensysteme - Berechnung von Verbindungen nach Eurocode 3 und VDI 2230*). Ovaj predlog standarda, koji se nalazi u proceduri usvajanja, sačinili su nemačko udruženje za zavarivanje i slične procese DVS (*DVS-Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.*) i evropska asocijacija za istraživanja u oblasti obrade limova EFB (*EFB Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V.*). U pitanju je obiman predstandard, a u daljem tekstu je prikazan samo deo koji definiše proračun nosivosti zavrtnjeva sa zaključavanjem na smicanje, pritisak po omotaču rupe i proklizavanje, sa akcentom na parametre koji se razlikuju u odnosu na one koje definiše Evrokod za proračun standardnih HV zavrtnjeva.

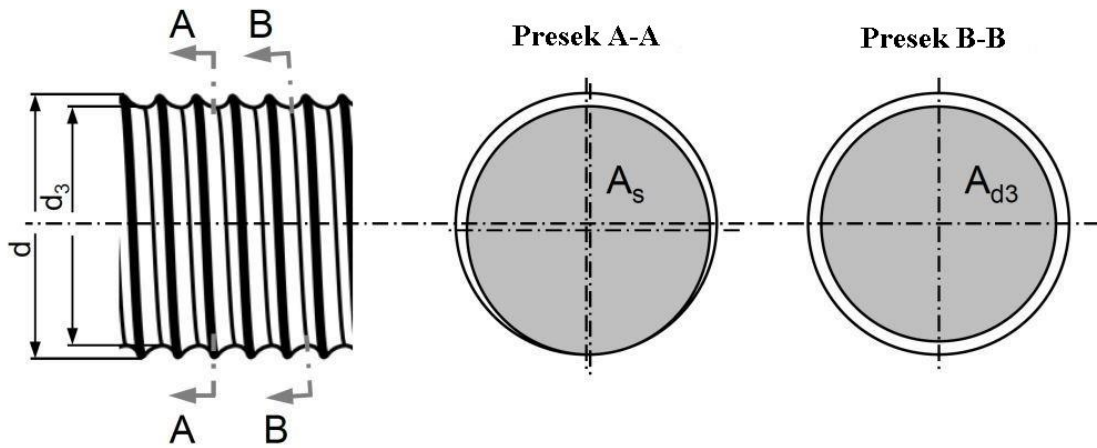
Da bi se mogli opisati izrazi za nosivost zavrtnjeva sa zaključavanjem neophodno je, pre svega, definisati rastojanja između zavrtnjeva u vezi (slika 2.12) i karakteristične preseke tela zavrtnja (slika 2.13).



Slika 2.12: Rastojanje između zavrtnjeva u vezi

Navoj se razlikuje od standardnog metričkog navoja na HV zavrtnjevima pa su i vrednosti površina preseka drugačije. Definisana je efektivna površina poprečnog

preseka A_s kao površina tela zavrtnja u ravni upravnoj na podužnu osu zavrtnja. Međutim, neophodno je napraviti razliku između ovog preseka i preseka paralelnog spiralnim žljebovima. Standardom je, kao površina na koju deluju naponi usled prednaprezanja zavrtnja, definisana površina paralelna spiralnim žljebovima i označena sa A_{d3} .



Slika 2.13: Stvarni presek tela zavrtnjeva sa zaključavanjem u zoni navoja

Površina preseka izložena naponu usled prednaprezanja, u zavisnosti od oblika tela zavrtnja sa zaključavanjem definiše se kao:

- u slučaju navoja sa paralelnim žljebovima:

$$A_{d3} = \frac{\pi}{4} \cdot d_3^2 \quad 2.1$$

- u slučaju navoja sa spiralnim žljebovima:

$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d + 2 \cdot d_3}{3} \right)^2 \quad 2.2$$

U skladu sa odredbama standarda Evrokod 3, definišu se kategorije spojeva sa zavrtnjevima sa zaključavanjem. Kategorije A, B i C za smičuće spojeve i kategorije D i E u zatežućim spojevima. U zavisnosti od kategorije spoja zahteva se ispunjenje određenih kriterijuma, a nosivosti zavrtnjeva određuju se na sledeći način:

- nosivost zavrtnja na smicanje, za jednu ravan smicanja:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad 2.3$$

gde su:

α_v – koeficijent smicanja. Za zavrtnjeve klase čvrstoće 5.8, 8.8, 10.9, A2-50 i A4-50 uzima vrednost $\alpha_v=0,55$,

f_{ub} – čvrstoća materijala zavrtnja pri zatezanju,

A – površina poprečnog preseka zavrtnja u zoni ravni smicanja. U slučaju da ravan smicanja prokliza kroz navoj zavrtnja koristi se površina A_s . Kada ravan smicanja prolazi kroz deo tela zavrtnja bez navoja koristi se površina tela zavrtnja A ,

$\gamma_{M2}=1,0$ – parcijalni koeficijent sigurnosti;

- nosivost zavrtnjeva na pritisak po omotaču rupe:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad 2.4$$

gde su:

k_1 – koeficijent za nosivost na pritisak po omotaču rupe.

Za ivični zavrtnj sa zaključavanjem koeficijent k_1 uzima vrednost:

$$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases} \quad 2.5$$

Za slučaj unutrašnjeg zavrtnja sa zaključavanjem k_1 uzima vrednost:

$$k_1 = \min \begin{cases} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{cases} \quad 2.6$$

α_b – koeficijent pritiska po omotaču rupe koji uzima vrednost:

$$\alpha_b = \min \begin{cases} \alpha_d \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1,0 \end{cases} \quad 2.7$$

Za ivični zavrtnj sa zaključavanjem, koeficijent α_d uzima vrednost:

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0} \quad 2.8$$

Za unutrašnji zavrtnj sa zaključavanjem, koeficijent α_d uzima vrednost:

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} \quad 2.9$$

$\gamma_{M2}=1,0$ – parcijalni koeficijent sigurnosti

- minimalna propisana sila prednaprezanja u zavrtnju:

$$F_{p,C} = 0,62 \cdot f_{ub} \cdot A_s \quad 2.10$$

gde su:

f_{ub} – čvrstoća materijala zavrtnja pri zatezanju,

A_s – efektivna površina poprečnog preseka. Za slučaj zavrtnjeva sa paralelnim žljebovima koristi se površina A_{d3} , a u slučaju spiralnih žljebova površina A_s ,

- nosivost zavrtnja na proklizavanje:

$$F_{s,Rd} = \frac{n \cdot k_s \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C} \quad 2.11$$

gde su:

n – broj tarnih površina,

k_s – koeficijent koji zavisi od veličine rupe za spojno sredstvo. Za normalne rupe uzima vrednost 1,0,

μ - koeficijent trenja

$\gamma_{M3}=1,25$ – parcijalni koeficijent sigurnosti.

2.2. Visokovredni HV zavrtnjevi proizvođača „Peiner“

Visokovredni HV zavrtnjevi nalaze se u paleti proizvoda velikog broja kompanija. Izbor je pao na HV zavrtnjeve proizvođača „Peiner“ iz Nemačke. Prilikom nabavke zavrtnjeva vođeno je računa, u skladu sa odredbama standarda [23], da ceo komplet (zavrtnanj, podloške i navrtka) bude od istog proizvođača.

U pitanju su visokovredni (HV) zavrtnjevi i navrtka definisani standardom EN 14399-4 [24] i HV podloške definisane standardom EN 14399-6 [25] (tabela 2.1). Ovi standardi uvedeni su 2007. godine i od tada su obavezujući za proizvođače.

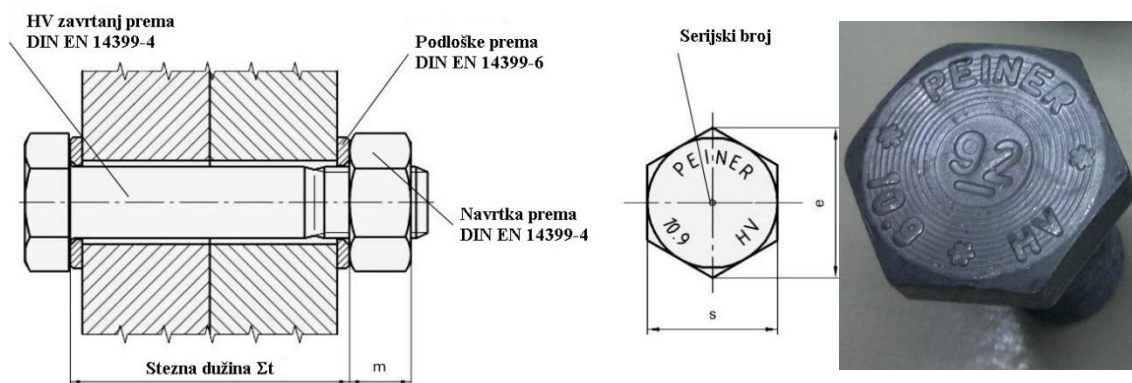
Tabela 2.1: Standardi i oznake HV zavrtnjeva

Proizvod	Stari standard nemački / srpski	Novi standard	Oznaka
Visokovredni zavrtnanj	DIN 6914 / SRPS M.B1.066:1982	EN 14399-4	10.9 HV
Visokovredna navrtka	DIN 6915 / SRPS ISO 4775:1999	EN 14399-4	10 HV
Visokovredne podloške	DIN 6916 / SRPS ISO 7416:1999	EN 14399-6	H

Prelaznim odredbama definisano je da se zavrtnjevi proizvedeni prema starim standardima mogu i dalje koristiti, ali se ne smeju, u istim spojevima, mešati sa zavrtnjevima izrađenim prema novim standardima.

Novi standardi nisu doneli značajne izmene u geometriji i dimenzijama, izuzev dužine navoja „b“ koji sada uzima maksimalnu vrednost predviđenu starim standardima, a počev od zavrtnjeva M24 i nešto veću. Takođe, zahtevana udarna žilavost povećana je sa $K_{v,min}=20$ J na $K_{v,min}=27$ J na -20°C . Važno je napomenuti da je novim standardom u steznu dužinu uračunata i debljina podloški (slika 2.14).

Na tržištu su dostupni „Peiner“ HV zavrtnjevi [26], koji ispunjavaju uslove navedenih standarda, dimenzija M12 do M36, bez antikorozijske zaštite (*black bolts*) ili zaštićeni toplim cinkovanjem. Za ovo istraživanje korišćeni su toplo cinkovani zavrtnjevi na kojima se nalazi sloj cinka debljine 50 – 70 μm . Proizvode se i zavrtnjevi većeg prečnika (do M64), ali isključivo po specijalnim narudžbinama i za potrebe izgradnje vetrogeneratora.



Slika 2.14: HV zavrtnanj proizvođača „Peiner“

Predmetni zavrtnjevi odgovaraju klasi trenja K1 prema [23] i koeficijent k (koji je istaknut na pakovanju) uvek uzima vrednosti između 0,10 i 0,16. Kako bi se obezbedio dovoljan zazor između navoja zavrtnja i navrtke, nakon cinkovanja, navrtke se dodatno obrađuju alatom koji njihov navoj utiskuje na prečnik veći za 0,3 mm. Takođe, navrtka se tretira molibden disulfidom (MoS_2), što obezbeđuje laku ugradnju zavrtnjeva. Dodatno podmazivanje ili odmašćivanje, koje utiče na koeficijent k nije dozvoljeno.

Svaki „Peiner“ HV zavrtnanj, pored oznake klase čvrstoće, na glavi ima i oznaku serijskog broja (slika 2.14). Na osnovu njega može se ući u trag zavrtnjevima i dobiti nephodni atesti koji se čuvaju 10 godina.

2.3. Cink-silikatni premaz RESIST 86 proizvođača „Jotun“

Izbor cink-silikatnog premaza „Resist 86“ (proizvođač „Jotun“, Norveška) za sprovedeno eksperimentalno istraživanje načinjen je pod pretpostavkom da se između

dve čelične ploče zaštićene ovim sistemom može ostvariti koeficijent trenja veći od 0,4. Prva primena cink silikatnih premaza na tarnim površinama u Srbiji izvršena je u toku rekonstrukcije mosta „Gazela“ 2011. godine. Tada je i prvi put, za potrebe rekonstrukcije mosta, određena vrednost koeficijenta trenja koji se mogu ostvariti na tarnim površinama primenom ovog sistema antikorozijske zaštite [27]. Da bi se opravdala primena Resist-a 86 i potvrdila polazna hipoteza, za potrebe ove disertacije izvršeno je eksperimentalno određivanje koeficijenta trenja, koje je kao i prvi put, sprovedeno u akreditovanoj Laboratoriji za ispitivanje, građevinskog preduzeća Mostogradnja iz Beograda [28]. U ovom poglavlju će biti opisan sprovedeni postupak i prikazani rezultati oba eksperimenta.

Prema standardu EN 1993-1-8 [29], za kategorije hrapavosti spoja A i B zahteva se koeficijent trenja veći od 0,5, odnosno 0,4. Iskustvo primene predmetnog premaza u toku rekonstrukcije mosta Gazela, a posebno eksperimentalno istraživanje na određivanju koeficijenta trenja [27], koje je tada sprovedeno (2010. godine), veoma su dragoceni i u najvećoj meri su opredelili autora za ovu vrstu premaza.

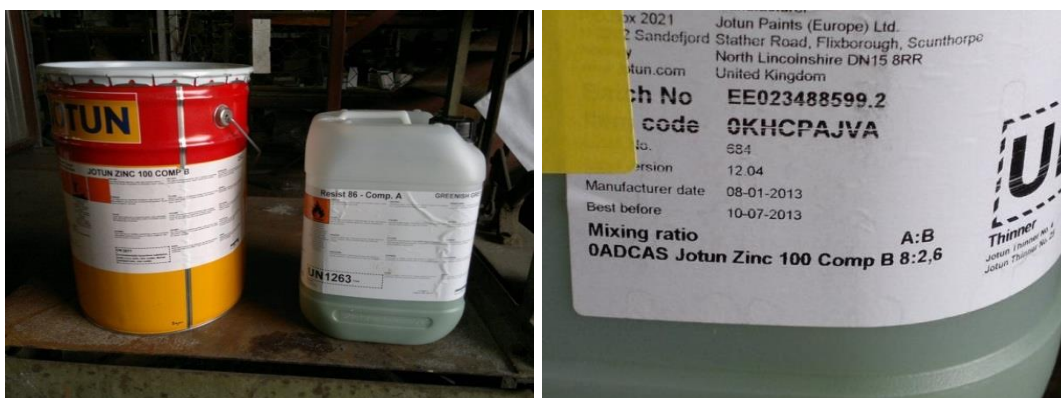
Predmetni sistem antikorozijske zaštite (slika 2.15) predviđen je od strane proizvođača [31] za zaštitu od korozije u “teškim” uslovima, i to:

- kao prvi sloj u višeslojnim sistemima ili
- kao jednoslojni sistem za zaštitu čeličnih površina u srednjoj do veoma korozivnoj sredini.

U pitanju je dvokomponentni brzосуšeći etilsilikatni premaz obogaćen cinkom. Sastoji se od tečne komponente A i praškaste komponente B (suv cinkov prah), koje se međusobno mešaju u odnosu $A : B = 8 : 2,6$. Komponentu A neophodno je dobro promućkati pre upotrebe jer dolazi do pojave taloga u stanju mirovanja. Veoma je važno voditi računa o činjenici da tečna komponenta A ima ograničen rok trajanja i to 6 meseci pri skladištenju na suvom i tamnom mestu i temperaturi od 23 °C. Izloženost većoj temperaturi skraćuje rok trajanja i dovodi do pretvaranja tečnosti u želatinoznu masu. Zbog svega navedenog, primena cink-silikatnog premaza Resist 86, pogotovo u letnjem periodu, iziskuje veoma pažljivo planiranje kako u praksi, tako i u sprovođenju eksperimentalnih istraživanja.

Postupak određivanja koeficijenta trenja sproveden je prvi put 2010. godine u svemu prema odredbama standarda SRPS U.E7.140:1985 [32]. Nakon toga, za potrebe

ove disertacije, istraživanje je ponovljeno 2013. godine i to prema odredbama standarda SRPS EN 1090-2:2012 [33] (bivši SRPS U.E7.140:1985.).



Slika 2.15: Cink-silikatni premaz RESIST 86 proizvođača Jotun iz Norveške

Činjenica da cink-silikatni premaz Resist 86 nikada ranije nije primenjivan u tarnim spojevima iziskivala je opsežno eksperimentalno istraživanje na određivanju koeficijenta trenja. Zbog toga je koeficijent trenja određen ispitivanjem ukupno 48 uzoraka, a poseban akcenat stavljen je na analiziranje uticaja vremenskog perioda između nanošenja premaza i pritezanja zavrtnjeva na ostvarene koeficijente trenja. Ispitivanje je podjeljeno na dva dela. Prvi kod kojeg se pritezanje zavrtnjeva i ispitivanje uzoraka odvijalo u istom vremenskom trenutku - jedno za drugim (tabela 2.2 i tabela 2.3) i drugi deo u kom su uzorci ispitivani nakon određenog vremena od trenutka pritezanja zavrtnjeva (tabela 2.4).

Početna ispitivanja (tabela 2.2) pokazala su da u kratkom vremenskom periodu nakon nanošenja premaza (do 3 dana) nije moguće postići zahtevani koeficijent trenja.

Tabela 2.2: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe rekonstrukcije mosta „Gazela“ – deo 1

Zavrtnjevi u uzorku	Broj uzoraka	Srednja vrednost koef. trenja μ_{sr}	Standardna devijacija S_u	Koeficijent varijacije C_v [%]
Epruvete pritegnute nakon 24h i neposredno zatim ispitane				
M16	3	0,29	0,074	25,1
M20	3	0,31	0,040	12,5
Epruvete pritegnute nakon 72h i neposredno zatim ispitane				
M16	3	0,37	0,074	25,1
M20	3	0,38	0,030	6,7

Dobijeni koeficijenti trenja od 0,29 do 0,38, ali i veliko rasipanje rezultata, ukazali su na potrebu da se ispitivanje vrši nakon dužeg vremenskog perioda od trenutka nanošenja premaza. Shodno tome ispitivanja su sprovedena nakon 6, 8 i 10 dana od

trenutka nanošenja premaza, na po 4 uzorka za svaki vremenski period (tabela 2.3). Dobijene su mnogo bolje vrednosti koeficijenta trenja (od 0,46 do 0,50) ali i standardno odstupanje manje od 8 % što je u granicama dozvoljenog prema odredbama standarda.

Tabela 2.3: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe rekonstrukcije mosta „Gazela“ – deo 2

Zavrtnjevi u uzorku	Broj uzoraka	Srednja vrednost koef. trenja μ_{sr}	Standardna devijacija S_u	Koeficijent varijacije C_v , [%]
Epruvete pritegnute nakon 6 dana i neposredno zatim ispitane			0,036	7,7
M16	2	0,49		
Epruvete pritegnute nakon 8 dana i neposredno zatim ispitane				
M16	2	0,47		
Epruvete pritegnute nakon 10 dana i neposredno zatim ispitane				
M16	2	0,46		
Epruvete pritegnute nakon 6 dana i neposredno zatim ispitane			0,037	7,7
M20	2	0,47		
Epruvete pritegnute nakon 8 dana i neposredno zatim ispitane				
M20	2	0,50		
Epruvete pritegnute nakon 10 dana i neposredno zatim ispitane				
M20	2	0,47		

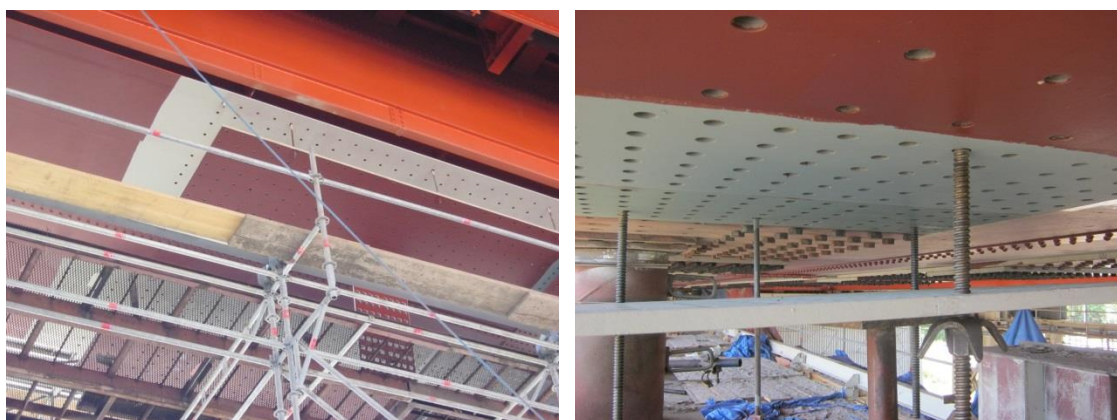
Dobijeni rezultati svakako su opravdali primenu premaza „Resist 86“ u tarnim površinama mosta „Gazela“, ali su otvorili pitanje tehnologije i brzine izvođenja radova na poziciji antikorozijske zaštite tarnih površina. S obzirom da je u pitanju rekonstrukcija postojeće mostovske konstrukcije, sprovedena po fazama, bilo je veoma važno omogućiti vraćanje elemenata montažnih nastavaka mosta (podvezica i zavrtnjeva) u prvobitno stanje u što kraćem roku od trenutka njihove demontaže. Zbog toga je sproveden i treći deo ovog ispitivanja (tabela 2.4) u kom su koeficijenti trenja određivani 10 dana nakon nanošenja premaza, a pritezanja zavrtnjeva na punu silu izvršeno 72 h nakon nanošenja premaza.

Na kraju, dobijeni rezultati omogućili su unapređenje tehnologije rekonstrukcije mostovske konstrukcije i značajno smanjenje rokova na poziciji antikorozijske zaštite. Pokazalo se da je najbolje zavrtnjeve pritegnuti nakon 72h od nanošenja premaza, a opterećenje na konstrukciju naneti najmanje nakon 10 dana.

Tabela 2.4: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe rekonstrukcije mosta „Gazela“ – deo 3

Zavrtnjevi u uzorku	Broj uzoraka	Srednja vrednost koef. trenja μ_{sr}	Standardna devijacija S_{μ}	Koeficijent varijacije C_v [%]
Epruvete pritegnute nakon 24h, a ispitane 10 dana nakon nanošenja premaza				
M16	3	0,46	0,032	7,0
M20	3	0,42	0,014	3,3
Epruvete blago pritegnute nakon 24h. Pritegnute na punu silu nakon 10 dana i odmah zatim ispitane.				
M16	3	0,44	0,027	6,2
M20	3	0,45	0,015	3,3
Epruvete pritegnute nakon 72h, a ispitane 10 dana nakon nanošenja premaza				
M16	3	0,49	0,009	1,9
M20	3	0,50	0,015	3,1
Epruvete blago pritegnute nakon 72h. Pritegnute na punu silu nakon 10 dana i odmah zatim ispitane.				
M16	3	0,46	0,009	1,9
M20	3	0,47	0,022	4,8

Sledeći izvedene zaključke, izvođač je razvio sistem pridržavanja podvezica brezonima (slika 2.16). Na ovaj način je omogućeno da se pritezanje zavrtnjeva izvrši 72h nakon nanošenja premaza. Posle pritezanja svih spojeva svakako je prošlo više od deset dana do njihovog izlaganja delovanju eksploatacionog opterećenja.



Slika 2.16: Rekonstrukcija mosta „Gazela“ u Beogradu – primena cink-silikatnog premaza „Resist 86“ kao antikorozijske zaštite tarnih površina

2.4. Antikorozijska zaštita tarnih površina sa stanovišta ostvarenih koeficijenata trenja

U postupku izbora vrste antikorozijske zaštite tarnih površina, osim zahtevane otpornosti na koroziju, veoma važan faktor i najčešće opredeljujući, jeste zahtevani

koeficijent trenja između elemenata (čeličnih ploča) povezanih prednapregnutim zavrtnjevima.

Sila proklizavanja ne zavisi dominantno od trenja između površina koje se dodiruju već od smicanja isturenih delova na tim površinama [1]. Sa ovog stanovišta, najpovoljnije bi bilo konstrukciju ostaviti bez antikorozijske zaštite, odnosno izvršiti spajanje elemenata konstrukcije odmah nakon peskarenja. Peskarenjem se ostvaruje najpovoljnija tekstura osnovnog materijala, više ili manje hrapava u zavisnosti od vrste i stepena peskarenja površina. Opšte je poznato da se u slučaju čeličnih površina tretiranih peskarenjem ostvaruju visoki koeficijenti trenja. Međutim, u najvećem broju slučajeva ovo nije izvodljivo, bilo zbog vremena koje je neophodno za montažu čelične konstrukcije (dovoljno dugo da na ispeskarenim elementima započne proces korozije), bilo zbog nemogućnosti da se izvedeni tarni spoj na adekvatan način zadihtuje i tako spreči dotok kiseonika i pojava odnosno širenje korozije.

Iz navedenih razloga, tarne površine neophodno je zaštititi od dejstva korozije, a samim tim i odrediti koeficijent trenja koji se u njima ostvaruje u slučaju primenjenog sistema zaštite. Ovaj postupak je standardizovan s obzirom da se često sprovodi. Ovo je veoma često sproveden postupak, pa je i sam standardizovan. U našoj zemlji, koeficijent trenja u tarnim površinama određuje se primenom standarda SRPS U.E7.140:1985 [14]. Od 2012. godine uporedo važi i standard SRPS EN 1993-1-8:2012 [34] pa je ovaj postupak, uz male izmene, usaglašen sa postupkom koji se primenjuje u Evropskoj uniji i koji je definisan standardom [29]. Primenom ovih standarda sproveden je veliki broj eksperimenata kojima je izvršena kategorizacija sistema antikorozijske zaštite prema ostvarenim koeficijentima trenja.

Iako primena sistema zaštite tarnih površina na bazi premaza ima veoma dugu tradiciju u svetu, u našoj zemlji praktično je prvi put primenjena 2010. godine, tokom rekonstrukcije mosta „Gazela“ u Beogradu. Razlog za ovo su problematična nabavka adekvatnog premaza i tradicionalne preporuke za primenu postupka metalizacije tarnih površina. Ovaj postupak podrazumeva nanošenje sloja određene legure na tarnu površinu. Najčešće je primenjivana legura aluminijuma i magnezijuma AlMg5. Metalizacija svakako rezultuje visokim koeficijentima trenja, ali sa druge strane iziskuje adekvatnu opremu (pištolj za metalizaciju i instalacije), utrošak gasa i metalne žice, kvalifikovanu radnu snagu, adekvatnu zaštitnu opremu i zaptivanje spojeva nakon

ugradnje zavrtnjeva (najčešće gitom) kako bi se sprečio dotok kiseonika. Pojavom premaza, koji ujedno obezbeđuju i zadovoljavajući koeficijent trenja, postupak metalizacije se sve ređe koristi. Standardizacijom opita je olakšano i unificirano određivanje koeficijenta trenja u tarnim spojevima. S obzirom na kontinuirani razvoj industrije sistema antikorozone zaštite, što na tržište donosi veliki broj premaza, pojednostavljeno je određivanje njihovih karakteristika za potrebe primene u tarnim spojevima.

Vrednosti koeficijenta trenja definisane su SRPS [32] i Evrokod standardima [29].

Tabela 2.5: Koeficijenti trenja za različite načine obrade površina tarnih spojeva, prema domaćim propisima [32]

Način obrade naležućih (tarnih) površina		μ	
		S235	S355
Nezaštićene	Bez posebne obrade	0,30	0,30
	Čišćenje plamenom	0,40	0,40
	Čišćenje mlazom abraziva	0,50	0,55
Zaštićene	Površine očišćene mlazom abraziva, a potom zaštićene prevlakom od legure aluminijuma	0,50	0,50

Tabela 2.6: Koeficijenti trenja za različite načine obrade površina tarnih spojeva, prema Evrokodu [29]

Način obrade tarnih površina	Klasa	μ
Peskareno sačmom ili kvarcom, uklonjena rđa	A	0,5
Površina peskarena sačmom ili kvarcom, a nakon toga zaštićena: 1. metalizacijom legurom na bazi cinka ili aluminijuma 2. alkalnim cink-silikatnim premazom debljine od 50 μm do 80 μm	B	0,4
Površina očišćena čeličnom četkom ili plamenom, uklonjena rđa	C	0,3
Površine kao nakon valjanja	D	0,2

Iz priloženih tabela jasno je uočljivo da savremni propisi imaju konzervativniji pristup ovoj problematici i da propisuju niže koeficijente trenja. Takođe, savremeni propisi prepoznaju i cink silikatne premaze kao vid antikorozone zaštite tarnih površina za razliku od, do skoro jedino važećih, domaćih propisa usvojenih pre tridesetak godina (1985. godine).

U svojoj doktorskoj disertaciji Lj. Vlajić [1] ekperimentalnim putem, standardizovanim postupcima, odredio je koeficijente trenja na tarnim površinama zaštićenim:

- metalizacijom legurom aluminijuma i magnezijuma AlMg5,
- metalizacijom čistim aluminijumom,
- klasičnom antikorozijskom zaštitom (hlorvenmijum proizvođača „Zorka“ iz Šapca),
- premazom hlorvenmijum sa dodatkom silicijum karbida SiC.

Pored navedenog, za potrebe poređenja, u istom istraživanju je određen koeficijent trenja i na površinama bez antikorozijske zaštite, za dva različita nivoa obrade: peskarenjem i poliranjem.

Polazna ideja je bila da se dodatkom silicijum karbida klasičnoj antikorozijskoj zaštiti poboljšaju njene karakteristike i poveća koeficijent trenja što bi je učinilo primenljivom i u tarnim spojevima. Silicijum karbid ili karborundum spada u neorganska jedinjenja sa izrazito velikom tvrdoćom i relativno niskom proizvodnom cenom. Iz ovog razloga našao je široku primenu u industriji, posebno za izradu šmirgli, abraziva i slično.

Odmah po ručnom izvođenju klasične zaštite u vidu hlorvenijuma, na tarne površine nanosi se i karborundum krupnoće zrna od 0,2 – 0,5 mm. Očekivano ponašanje ovakve antikorozijske zaštite objašnjeno je rečima: „*Ta sitna zrnca nepravilnog oblika, oštarih ivica i izuzetno velike tvrdoće, pod dejstvom izražene sile pritiska, kao posledica sile u zavrtnjevima, utiskuju se u čelik na tarnoj površini spoja i tu postaju, na izvestan način, mali moždanci, čime se povećava koeficijent trenja*“ [35].

Autor je sproveo opsežno eksperimentalno istraživanje (ukupno 260 uzoraka) i odredio koeficijente trenja (tabela 2.7) sa malim standardnim devijacijama, što potvrđuje kvalitet i pouzdanost ovog eksperimentalnog istraživanja.

Dobijene vrednosti za površine obrađene peskarenjem i metalizacijom značajno su veće od onih koje su definisane Evrokodom što daje na značaju primeni eksperimentalnog određivanja koeficijenta trenja za potrebe izgradnje objekata. Postupkom dodavanja karborunduma klasičnim premazima postignuto je povećanje koeficijenta trenja za više od 30%, što je opravdalo ovaj postupak. Zaključeno je da bi se još bolji rezultati mogli postići posipanjem samo na jednu taru površ. Na taj način bi se sprečilo mrvljenje zrna koja su nalegla jedno na drugo u trenutku pritezanja zavrtnjeva.

Tabela 2.7: Koeficijenti trenja za različite tipove obrade površina – Vlajić [1]

Tip čelika	Obrada tarnih površina	Koeficijent trenja μ	Standardna devijacija [%]	Broj testova
S235	peskarenje	0,616	4,30	24
	peskarenje + metalizacija (AlMg5)	0,548	5,20	188
	peskarenje + metalizacija (Al)	0,363	7,80	24
	peskarenje + hlorvenmijum + SiC	0,308	2,44	24
	peskarenje + hlorvenmijum	0,235	8,82	24
	poliranje	0,156	6,80	12

Wylliam Husson u istraživanju koje je sastavni deo njegove teze [36] ispitivao je mogućnosti unapređivanja montažnih nastavaka vetrogeneratora i definisanje kriterijuma za izvođenja nastavaka u vidu smičućeg spoja primenom “šlicovanih” rupa. Između ostalog, određivani su koeficijenti trenja na površinama obrađivan na dva načina:

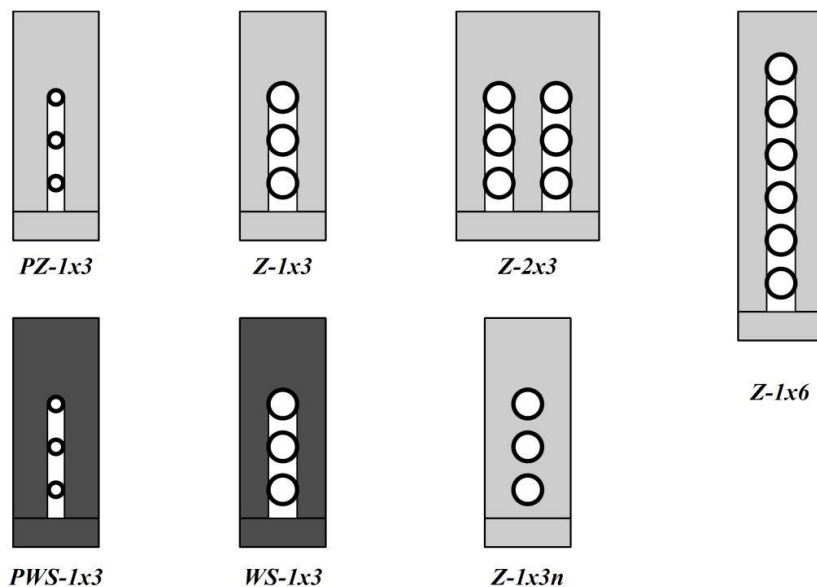
- čelični limovi kvaliteta S355 ispeskareni do nivoa Sa2.5, u svemu prema standardu ISO-8501-1 [37], nakon toga premazani dvokomponentnim etil silikatnim premazom bogatim cinkom „*TEMASIL 90*“, proizvođača „*Tikkurila Coatings*“,
- limovi od čelika otpornog na atmosfersku koroziju (*weathering steel*) sa proizvođačkim nazivom „*COR-TEN B*“ [38] proizvođača „*Ruukki*“, u prvoj seriji ispeskarene i odmah pritegnute, a u drugoj ispeskarene i ostavljene dejstvu atmosferskih uticaja pre pritezanja.

Premaz, primenjen tokom istraživanja, već ima veoma široku primenu u izgradnji vetrogeneratora i može se koristiti kao jedinstvena prevlaka, ili kao prajmer u složenijem sistemu antikorozijske zaštite. U oba slučaja nanosi se u debljini od 50 μm do 80 μm sa sadržajem cinka između 70 i 90%.

Čelik otporan na atmosfersku koroziju sadrži elemente koji omogućavaju formiranje patine u slučaju izlaganja atmosferskim uticajima. Jedan broj uzoraka formiran je od ploča na kojima nije bilo rđe, a ostatak od ploča ostavljenih dejstvu atmosferalija i

nakon formiranja patine ugrađenih u uzorke. Proizvod „COR-TEN B“, prema svojim mehaničkim svojstvima, odgovara čeliku kvaliteta S355J0W(P).

S obzirom na predmetnu tematiku definisano je nekoliko tipova uzoraka sa jednoznačnim sistemom obeležavanja (slika 2.17).



Slika 2.17: Šematski prikaz uzoraka eksperimentalnog istraživanja [36]

Autor komentariše standardom [23] definisanu graničnu vrednost međusobnog smicanja čeličnih ploča u trenutku proklizavanja, a koja iznosi $150 \mu\text{m}$. Na osnovu izvedenih ispitivanja zaključuje da ova granica varira zavisno od dimenzija uzoraka i da je teško definisati jedinstvenu vrednost. Iz ovog razloga, ovaj eksperiment bazira na maksimalnoj nosivosti uzorka na proklizavanje, a ne na onoj koja se javlja pri proklizavanju od $150 \mu\text{m}$. Shodno tome, koeficijent trenja određuje se kao odnos ovako dobijene nosivosti uzorka na proklizavanje i inicijalne sile prednaprezanja u zavrtnjevima.

U sve zavrtnjeve koji su korišćeni u uzorcima ugrađene su merne trake, čime je omogućeno kontinuirano praćenje promene sile prednaprezanja tokom opterećivanja uzorka. Na osnovu zapažanja da u trenutku proklizavanja uzorka sila u zavrtnjevima opada, definisan je „očigledni“ koeficijent trenja (tabela 2.8). Isti predstavlja odnos maksimalne nosivosti na proklizavanje uzorka i sile prednaprezanja u zavrtnjevima u tom trenutku.

Tabela 2.8: Koeficijenti trenja za različite vidove obrade površina – Husson [36]

Uzorak	Tip čelika	Obrada tarnih površina	Koef. trenja	Očigledni koef. trenja	Broj testova
P-1x3	Cor-Ten B	peskarenje	0,591	0,792	3
PWS-1x3	Cor-Ten B	peskarenje + atmosferski uticaji	0,629	0,856	3
WS-1x3	Cor-Ten B	peskarenje + atmosferski uticaji	0,611	0,795	5
PZ-1x3	S355	peskarenje + Temasil 90	0,311	0,430	3
Z-1x3	S355	peskarenje + Temasil 90	0,320	0,356	5
Z-2x3	S355	peskarenje + Temasil 90	0,264	0,288	3
Z-1x6	S355	peskarenje + Temasil 90	0,310	0,337	3
Z-1x3n	S355	peskarenje + Temasil 90	0,338	0,370	3

Na osnovu analize dobijenih rezultata jasno se mogu uočiti visoke vrednosti koeficijenata trenja u slučaju primene materijala COR-TEN B. Vrednosti koeficijenta trenja manje od 0,40 dobijene su u slučaju primene predmetnih cink silikatnih premaza, što onemogućava njihovu primenu u kategoriji tarnih spojeva A i B definisanih standardom [29].

Sve češća primena čelika visokih čvrstoća u građevinarstvu aktuelizovala je pitanje njihovog ponašanja u tarnim spojevima. Samim tim oni su postali i predmet eksperimentalnih istraživanja prilikom određivanja koeficijenata trenja. Jedno takvo istraživanje sprovedeno je na odseku za građevinarstvo Univerziteta u Koimbri (Portugal), kao sastavni deo međunarodnog istraživačkog projekta „*HISTWIN*“ [39]. A. Cruz, R. Simoes i R. Alves [40], u potpunosti prema odredbama standarda [23], odredili su koeficijent trenja za tri vrste čelika (S275, S355 i S690) i nekoliko različitih sistema anikorozivne zaštite (tabela 2.9 i tabela 2.10).

Tabela 2.9: Koeficijenti trenja za sisteme obrade površina kod primene čelika klase čvrstoće S275, prema [23]










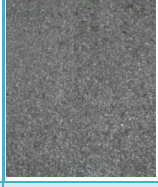
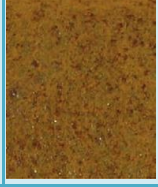
Sistem zaštite	Opis sistema zaštite	Koeficijent trenja μ	Standardna devijacija [%]	Izgled površine
Tip A	Peskarenje kvarcom do stepena Sa2.5	0,558	3,98	
Tip B	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa2.5	0,561	2,84	
Tip C	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa3 + metalizacija cinkom debljine 75 μ m	0,520	1,67	
Tip D	Hemijsko čišćenje površina + toplo cinkovanje u debljini 150 μ m	0,521	2,90	
Tip E	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa2.5 + zaštitno cink etil silikatnim premazom u jednom sloju od 70 μ m	0,457	2,51	
Tip F	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa2.5 + zaštićeno cink epoksi premazom u jednom sloju od 70 μ m	0,378	1,19	

Tabela 2.10: Koeficijenti trenja za sisteme obrade površina kod primene visokovrednog čelika klase čvrstoće S690 i korten čelika klase čvrstoće S355, prema [23]

Sistem zaštite	Čelik	Opis sistema zaštite	Koeficijent trenja μ	Standardna devijacija [%]	Izgled površine
Tip B	S690	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa2.5	0,557	2,65	
Tip C	S690	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa3 + metalizacija cinkom debljine 75 μ m	0,546	1,74	
Tip F	S690	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa2.5 + zaštićeno cink epoksi premazom u jednom sloju od 135 μ m	0,244	1,44	
Tip BI	S355	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa2.5, bez zaštite, izloženo unutrašnjim uslovima 10 dana	0,569	3,27	
Tip BE	S355	Peskarenje sačmom ili šljunkom do stepena Sa2.5, bez zaštite, izloženo unutrašnjim uslovima 15 dana + izloženo spoljašnji uslovima 20 dana	0,604	2,15	

Na osnovu dobijenih rezultata, zaključuje se da sistem zaštite tarne površine ima dominantan uticaj na koeficijente trenja, dok je uticaj kvaliteta čelika značajno manji. Ovo ukazuje da se klasifikacija tarnih površina definisana standardom SRPS EN 1090-2 može primeniti i na čelike visoke čvrstoće.

2.5. Gubici sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima

Gubici sile prednaprezanja su u direktnoj vezi sa smanjenjem debljine steznog paketa pritegnutog visokovrednim zavrtnjem. Da bi se mogla odrediti promena dužine (ili debljine) elemenata spoja važno je definisati njihovu krutost. Nemački standard VDI 2330 [41], kao i Kammel i Sedlaček u svom istraživanju [42] definišu izraze za elastičnu krutost, odnosno fleksibilnost, spoja sa visokovrednim zavrtnjevima.

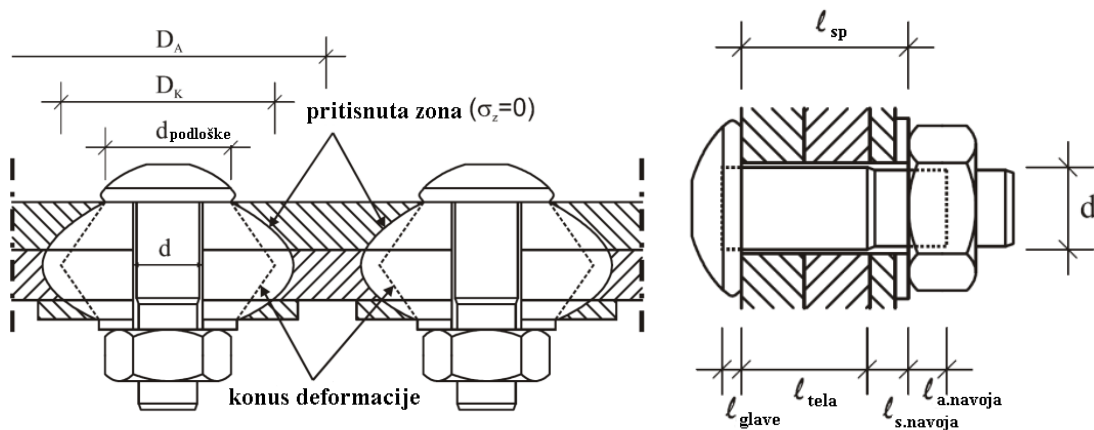
Fleksibilnost spoja δ_{spoja} određuje se kao zbir fleksibilnosti prednapregnutog zavrtnja δ_z i fleksibilnosti elemenata steznog paketa δ_{sp} :

$$\delta_{\text{spoja}} = \delta_z + \delta_{\text{sp}} \quad 2.12$$

Elastična fleksibilnost zavrtnja definiše se kao zbir elastičnih fleksibilnosti ekvivalentnih cilindričnih delova zavrtnja:

$$\delta_z = \delta_{\text{glave}} + \delta_{\text{tela}} + \delta_{\text{s.navoja}} + \delta_{\text{a.navoja}} + \delta_{\text{navrtke}} \quad 2.13$$

Svaki ekvivalentni cilindrični deo zavrtnja određen je svojom dužinom l_i i površinom poprečnog preseka A_i (slika 2.18).



Slika 2.18: Ekvivalentni cilindrični delovi zavrtnja

Komponente izraza za elastičnu fleksibilnost zavrtnja definišu se na sledeći način:

- elastična fleksibilnost glave zavrtnja δ_{glave} :

$$\delta_{\text{glave}} = \frac{l_{\text{glave}}}{E_z \cdot A_{\text{nom}}} \quad 2.14$$

$$l_{\text{glave}} = 0,5 \cdot d \quad 2.15$$

$$A_{\text{nom}} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad 2.16$$

gde su:

l_{glave} – dužina ekvivalentnog cilindra glave zavrtnja,

E_z – modul elastičnosti materijala zavrtnja,

A_{nom} – nominalna površina poprečnog preseka tela zavrtnja,

d – prečnik tela zavrtnja;

- elastična fleksibilnost tela zavrtnja:

$$\delta_{\text{tela}} = \frac{l_{\text{tela}}}{E_z \cdot A_{\text{nom}}} \quad 2.17$$

gde je:

l_{tela} – dužina tela zavrtnja bez navoja;

- elastična fleksibilnost slobodnog dela navoja:

$$\delta_{\text{s.navoja}} = \frac{l_{\text{s.navoja}}}{E_z \cdot A_{d_3}} \quad 2.18$$

$$A_{d_3} = \frac{d_3^2 \cdot \pi}{4} \quad 2.19$$

gde su:

$l_{\text{s.navoja}}$ – dužina slobodnog dela navoja,

A_{d_3} – površina preseka na mestu minimalnog prečnika zavrtnja,

d_3 – prečnik jezgra navoja zavrtnja,

p – korak navoja;

- elastična fleksibilnost angažovanog dela navoja:

$$\delta_{\text{a.navoja}} = \frac{l_{\text{a.navoja}}}{E_z \cdot A_{d_3}} \quad 2.20$$

$$l_{\text{a.navoja}} = 0,5 \cdot d \quad 2.21$$

gde je:

$l_{\text{a.navoja}}$ – dužina angažovanog dela navoja;

- elastična fleksibilnost navrtke zavrtnja:

$$\delta_{\text{navrtke}} = \frac{l_{\text{navrtke}}}{E_{\text{navrtke}} \cdot A_{\text{nom}}} \quad 2.22$$

$$l_{\text{navrtke}} = 0,4 \cdot d \quad 2.23$$

gde su:

l_{navrtke} – dužina (debljina) navrtke,

E_{navrtke} – modul eleastičnosti materijala od kog je izrađena navrtka.

Pod pretpostavkom da je spoj koncentrično prednapregnut i da se konus deformacije dva susedna zavrtnja može formirati bez preklapanja, odnosno da je

rastojanje između zavrtnjeva D_A veće od maksimalnog prečnika konusa deformacije D_K (slika 2.18) elastična fleksibilnost steznog paketa može se odrediti kao:

$$\delta_{sp} = \frac{2 \cdot \ln \left[\frac{(d_{podloške} + d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp} \cdot \tan \varphi - d_0)}{(d_{podloške} - d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp} \cdot \tan \varphi + d_0)} \right]}{E_{sp} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \tan \varphi} \quad 2.24$$

gde su:

$d_{podloške}$ – spoljašnji prečnik podloške,

d_0 – prečnik rupe za spojno sredstvo,

l_{sp} – debljina steznog paketa,

φ – ugao konusa deformacije,

E_{sp} – modul elastičnosti materijala od kog su izrađeni elementi koji sačinjavaju stezni paket (podloške i čelične ploče).

Navedene izraze za elastičnu fleksibilnost elemenata spoja potvrdio je Pavlović M. sa grupom autora [43] primenom metode konačnih elemanta. Naime, dobijeno je značajno poklapanje numeričkih rezultata sa rezultatima analitičkog proračuna i eksperimenta u zoni naprezanja do 50% od granične nosivosti spoja. U slučaju većih naprezanja, rezultati eksperimenta i metode konačnih elemenata pokazali su nelinearnost koja je posledica pojave smičućih sila u zavrtnjevima. Zaključak je da se prikazani analitički izrazi mogu koristiti veoma uspešno za slučajeve naprezanja do 50% od granične nosivosti. Ovi izrazi mogu imati široku primenu u oblasti zamora spoja jer ekvivalentna opterećenja koja dovode do oštećenja usled zamora retko kada prelaze 50% od granične nosivosti spoja.

Prema [42], nakon definisanja krutosti spoja sa visokovrednim zavrtnjevima data je i struktura ukupnog gubitka sile prednaprezanja $\Delta F_{p,C}$, razloženog na sledeći način:

$$\Delta F_{p,C} = \Delta F_{p,C,1} + \Delta F_{p,C,2} + \Delta F_{p,C,3} + \Delta F_{p,C,4} + \Delta F_{p,C,5} \quad 2.25$$

gde su:

$\Delta F_{p,C,1}$ – gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled međusobnog “nameštanja” elemenata spoja,

$\Delta F_{p,C,2}$ – gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled relaksacije elemenata spoja,

$\Delta F_{p,C,3}$ – gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled odvrtnanja navrtke pod uticajem dinamičkog opterećenja (ako je spoj izložen dinamičkom dejstvu),

$\Delta F_{p,C,4}$ – gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled poprečne kontrakcije čeličnih limova u spoju izloženom aksijalnoj sili zatezanja,

$\Delta F_{p,C,5}$ – gubitak sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju usled dodatnog opterećenja koje deluje u pravcu ose zavrtnjeva.

Uzimajući u obzir sve navedeno, za proračun nosivosti smičućeg spoja neophodno je koristiti preostalu silu prednaprezanja u zavrtnjevima $F'_{p,C}$ koja se dobija redukcijom inicijalne sile prednaprezanja $F_{p,C}$ [44]:

$$F'_{p,C} = F_{p,C} - \Delta F_{p,C} \quad 2.26$$

Konačno, nosivost smičućeg spoja na proklizavanje treba odrediti uzimajući u obzir ukupan gubitak sile prednaprezanja u toku životnog veka konstrukcije:

$$F_{s,Rd(ser)} = \frac{n \cdot \mu \cdot F'_{p,C}}{\gamma_{M3(ser)}} \quad 2.27$$

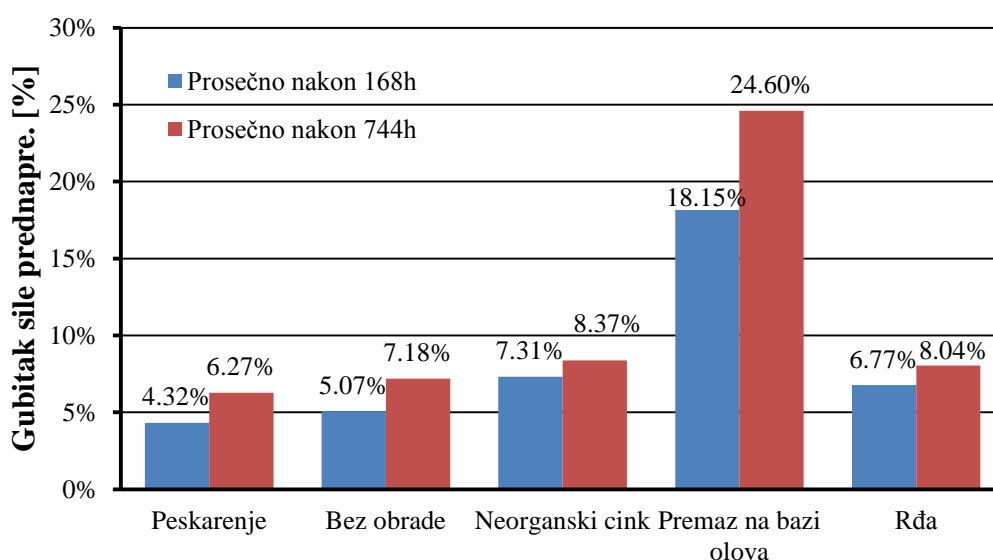
Hwan-Seon Nah i grupa autora [45] sprovedli su 2009. godine eksperimentalno istraživanje tokom kojeg su na ukupno 15 uzorka (60 zavrtnjeva) ispitivali kratkoročne gubitke sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima. Uzorci su formirani u vidu spojeva sa obostranim preklopom (*double lap joint*), a eksperimentom su varirani:

- vrsta zavrtnjeva: zavrtnjevi sa kontrolisanom silom pritezanja (*tension control bolts*) izrađeni prema standardu ASTM F2280 [46], bez antikorozijske zaštite i zaštićeni u sistemu „*dacro-coated*“, i visokovredni zavrtnjevi sa šestougaonom glavom izrađeni prema standardu ASTM A490 [47];
- vrsta i debljina antikorozijske zaštite u tarnim površinama: uzorci od nezaštićenog čelika kao iz valjanja (*clean mill*), uzorci od ispeskarenih čeličnih ploča, uzorci od čeličnih ploča izloženih rđi (*rusted*), uzorci od ispeskarenih ploča zaštićenih neorganskim premazom na bazi cinka debljine 128 μm i 65 μm , i uzorci zaštićeni bojom na bazi olova (*red lead paint*);
- uslovi sredine: konstantni uslovi vlage i temperature u zatvorenom prostoru i nekontrolisani uslovi temperature i vlažnosti u zatvorenom prostoru.

Za potrebe merenja sile prednaprezanja, na telo zavrtnjeva zalepljene su merne trake. Zavrtnjevi nisu kalibrisani, a za potrebe kontrole, ispod nekoliko zavrtnjeva, ugrađeni su merači sile nalik podloškama (*washer-typed load cells*). Merenje sile trajalo je 1000 časova, a rezultati su analizirani nakon sedam dana i nakon mesec dana (31 dan). Korišćen je merno akvizicioni sistem skromnih performansi, ali ipak dovoljnih da se registruju vrednosti sile prednaprezanja.

Na osnovu dobijenih rezultata (slika 2.19), pored kvantitativnih zaključaka o veličini gubitaka sile prednaprezanja za konkretne vrste uzoraka, autori izvode i sledeće zaključke:

- u slučaju primene neorganske zaštite na bazi cinka, debljine oko 127 μm , prosečan gubitak sile prednaprezanja nakon mesec dana je 8,37 %. Ovo potvrđuje odredbe japanskog standarda koje zahtevaju unošenje sile prednaprezanja za 10% veće od proračunske pa se preporučuje implementacija ovakve odredbe i u nove korejske standarde;
- u slučaju zaštite od neorganskog cinka debljina ne sme da pređe 127 μm ;
- zbog gubitka sile prednaprezanja od 24,6 %, predlaže se zabrana primene sistema zaštite na bazi olova na tarnim površinama.



Slika 2.19: Rezultati eksperimenta koji su sproveli Hwan-Seon i grupa autora [45]

Za slučaj primene zaštite na bazi neorganskog cinka debljine 127 μm sprovedena je regresiona analiza i definisan je izraz za napon puzanja u proizvoljnom trenutku t kao:

$$\text{napon puzanja}_{\text{cink}} = 5,0 \cdot 10^{-5} + 5,6 \cdot 10^{-5} \cdot \log_{10} t \quad 2.28$$

Na osnovu definisane zakonitosti puzanja zaštitnog sloja (2.28) izvodi se obrazac za određivanje sile prednaprezanja u proizvoljnom trenutku t nakon ugradnje zavrtnja $F(t)$, uzimajući u obzir relaksaciju:

$$F(t) = F_0 \cdot \frac{C^f + \left(\frac{H_0}{A_C}\right) \cdot 5,0 \cdot 10^{-5}}{C^f + \left(\frac{H_0}{A_C}\right) \cdot (5,0 \cdot 10^{-5} + 5,6 \cdot 10^{-5} \cdot \log_{10} t)} \quad 2.29$$

gde su:

F_0 [N] – inicijalna sila prednaprezanja u zavrtnju,

C^f [m/N] – popustljivost zavrtnja (*bolt compliance*),

H_0 [m] – debljina antikorozijske zaštite,

A_C [m²] – površina uzorka izložena dejstvu napona usled sile prednaprezanja u zavrtnju (*stressed area of joint element*),

t – proteklo vreme od trenutka ugradnje zavrtnja.

Christine Heistermann u istraživanju prikazanom u tezi iz 2011. godine [48], kao i u publikacijama koje su usledile [49], [50] između ostalog, eksperimentalnim putem određuje gubitke sile prednaprezanja u različitim tipovima visokovrednih zavrtnjeva. Poseban akcenat je stavljen na određivanje inicijalnih i dugotrajnih gubitaka sile, pre svega u funkciji vrste i debljine primenjene antikorozijske zaštite na tarnim površinama i vrste zavrtnjeva. U domenu ispitivanja sprovedenih sa cink-silikatnim premazom i zavrtnjevima sa zaključavanjem može se reći da je ova teza iskorišćena kao pilot istraživanje na osnovu kojeg je definisana i postavka dela eksperimenta sprovedenog u ovoj disertaciji.

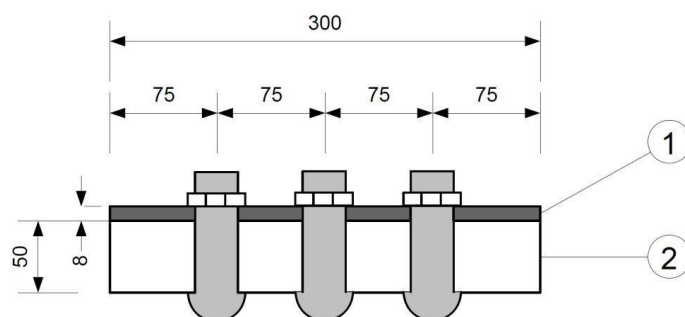
Eksperimentalnim istraživanjem obuhvaćene su četiri vrste zavrtnjeva:

- zavrtnjevi sa kontrolisanom silom prednaprezanja (*Tension Control Bolt - TCB*) [20];
- zavrtnjevi sa zaključavanjem sistema „*Huck BobTail*“ (HBT) [51];
- standardni zavrtnjevi sa podloškama sistema „*NordLock*“ [52], što je unikatno rešenje sa podloškama sa klinastim sistemom zaključavanja;

- zavrtnjevi tipa „*Friedberg HV Rändel*“ [53], švo je takođe unikatni sistem zavrtnjeva koji se mogu ugrađivati sa jedne strane, standardnim alatom, zahvaljujući nazubljenom delu tela ispod glave zavrtnja koji obezbeđuje da zavrtnanj bude upasovan.

Sprovedeno istraživanje sastoji se iz tri tipa testova, test čiste relaksacije uzoraka (*pure relaxation tests*), test dugotrajnog ispitivanja uzoraka (*long-term tests*) izloženog dejstvu statičkog opterećenja i test ispitivanja uzoraka na dejstvo dinamičkog opterećenja.

Test čiste relaksacije korišćen je da se, pre svega, utvrdi uticaj debljine premaza na gubitke sile prednaprezanja u zavrtnjevima. Test je sproveden u laboratorijskim uslovima, pa je uticaj korozije i temperature zanemaren. U okviru prvog dela eksperimenta uzorci su formirani od jedne čelične ploče (označena brojem 2 na slici 2.21) čija debljina odgovara ukupnoj debljini ploča u uzorcima za dugotrajno ispitivanje (drugi deo eksperimentalnog istraživanja). Funkciju podloški preuzela je pokrivna ploča (*cover plate*), označena brojem 1 na slici 2.21. Na ovaj način eliminisan je uticaj zazora između čeličnih ploča (slučaj kada ploče nisu idealno ravne). Ispitivanje je sprovedeno sa sve četiri vrste zavrtnjeva i to TCB i zavrtnjevi sa klinastim podloškama kao M30, a HBT i Friedberg HV zavrtnjevi kao M20. Test sa HBT zavrtnjevima sproveden je sa dve različite dužine zavrtnjeva: dugački sa steznom dužinom 40 mm i kratki sa steznom dužinom 18 mm. Za svaki tip zavrtnjeva ispitan je po jedan uzorak sa po tri zavrtnja. Za sve testove korišćen je prajmer bogat cinkom „*Temasil 90*“, proizvođača „*Tikkurila Coatings*“, koji prema specifikaciji proizvođača sadrži 70 – 90% cinka. Debljina premaza je varirana tako što su izrađeni uzorci bez premaza, sa jednom premazanom stranom i sa dve premazane strane ploče.



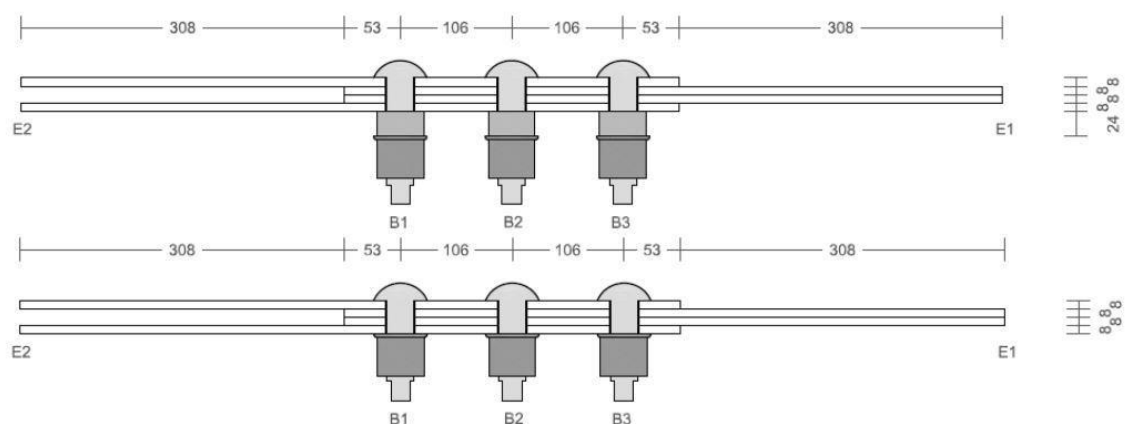
Slika 2.20: Uzorak za test čiste relaksacije [48]

Na osnovu rezultata gubitaka sile prednaprezanja (tabela 2.11), autorka zaključuje da svakako treba dati prednost TCB zavrtnjevima ispred primene klasičnih HV zavrtnjeva sa klinastim podloškama. Zbog oštećenja zavrtnjeva prilikom ugradnje, rezultati eksperimenta sa Friedberg HV zavrtnjevima se isključuju u potpunosti. Ponašanje HBT zavrtnjeva nije bilo u skladu sa pretpostavkom da su gubici sile prednaprezanja veći što je veća debljina premaza, ali su rezultati logični sa stanovišta dužine zavrtnjeva, odnosno da pod istim uslovima kraći zavrtnjevi imaju veće gubitke sile.

Tabela 2.11: Prosečna vrednost gubitaka sile prednaprezanja nakon sedam dana [%], prema [48]

Broj površina sa premazom	Tip zavrtnjeva				
	TCB	Klasični HV sa klinastim podloškama	Friedberg HV	HBT dugački	HBT kratki
0	4,00	8,77	35,80	24,82	40,85
1	6,50	9,49	22,94	25,01	43,93
2	7,50	8,50	93,36	20,01	40,41

Drugi deo eksperimenta sproveden je sa HBT zavrtnjevima prečnika 1" (25,4 mm). Ispitano je šest uzoraka sa po tri zavrtnja (slika 2.21). Tri uzorka su sa kraćim zavrtnjevima (stezna dužina 32mm), a tri uzorka su sa dužim zavrtnjevima (stezna dužina 32 mm + 24 mm = 56 mm). Iako su čelične ploče identične debljine, veća stezna dužina postignuta je primenom podloški za produženje (*extension sleeves*) u vidu cilindričnog čeličnog elementa. Na ovaj način izbegava se primena kratkih HBT zavrtnjeva za koje je pokazano da imaju problem sa ostvarivanjem proračunske nosivosti na proklizavanje. Svi uzorci izrađeni su od ploča koje su ispeskarene ili ispeskarene i zaštićene toplim cinkovanjem. Ukupna debljina cinka varirana je primenom različitog broja zaštićenih ploča u uzorcima, pa su izrađeni uzorci bez cinka, sa dve zaštićene ploče i sa sve 4 zaštićene ploče.



Slika 2.21: Uzorci sa i bez podloški za produženje [48]

Usvojen je sistem označavanja uzoraka, pa je tako, na primer, oznakom RuH-S_2 označen uzorak koji se koristi za test relaksacije (Ru), a u njega su ugrađeni HBT zavrtnjevi (H) sa podloškama za produženje (S), pri čemu je ukupan broj pocinkovanih ploča 2.

Svi uzorci su praćeni četiri nedelje u testu čiste relaksacije (bez spoljašnjeg opterećenja). Nakon toga po jedan uzorak je izložen statičkom, odnosno dinamičkom opterećenju, dok su ostali uzorci praćeni u testu čiste relaksacije do isteka 40 nedelja od trenutka ugradnje zavrtnjeva. Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je ekstrapolacija dobijenih vrednosti na period od 20 godina.

Tabela 2.12: Prosečan gubitak sile prednaprezanja [%] po uzorku [48]

Vreme	Dugački HBT zavrtnjevi			Kratki HBT zavrtnjevi		
	RuH-S_4	RuH-S_2	RuH-S_0	RuH_4	RuH_2	RuH_0
10 sekundi	18,12	20,30	17,85	25,54	25,65	26,16
4 nedelje	25,93	24,92	19,82	34,52	32,01	29,25
40 nedelja	-	25,86	20,25	-	33,42	30,20

Prikazane vrednosti rezultata (tabela 2.12) predstavljaju gubitke sile prednaprezanja merene u odnosu na maksimalnu vrednost sile prednaprezanja koja je ostvarena u toku ugradnje zavrtnja. Sam princip ugradnje HBT zavrtnjeva je takav da podrazumeva značajne inicijalne gubitke sile. Zbog toga je korisno gubitke sile prednaprezanja razmatrati i u odnosu na vrednost sile ostvarenu nakon prvih deset sekundi. Na osnovu dobijenih rezultata, pored kvantitativnih zaključaka uočene su dve tendencije. Prvo, da se gubici sile prednaprezanja povećavaju sa povećanjem debljine

antikorozijske zaštite na tarnim površinama i drugo, da se pod istim uslovima, kod kraćih zavrtnjeva javljaju veći gubici sile.

Ekstrapolacijom za period od 20 godina, dobijen je gubitak sile prednaprezanja od oko 11% za dugačke HBT zavrtnjeve, mereno od trenutka koji odgovara periodu od 10 s nakon ugradnje zavrtnjeva. U slučaju kratkih HBT zavrtnjevima, ekstrapolacijom je dobijena veća vrednost gubitaka sile nakon 20 godina, oko 12,5%. Ovo važi i kod uzoraka bez cinka i kod uzorka u kojima su zaštitne samo dve ploče.

Za svaki referentni trenutak, primenom odredbi standarda EN 1990:2002 [54] i standarda EN 1993-1-8 [29], izračunata je karakteristična vrednost gubitka sile. Za tako dobijene vrednosti određena je trend linija i definisani sledeći izrazi za određivanje preostale sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima:

$$F_{p,C,d} = F_{p,C} \cdot \left[1 - \frac{0,7578 \cdot \ln\left(\frac{t}{31,536 \cdot 10^6}\right) + 16,459}{100} \right] \quad 2.30$$

$$F_{p,C,k} = F_{p,C} \cdot \left[1 - \frac{0,7517 \cdot \ln\left(\frac{t}{31,536 \cdot 10^6}\right) + 24,458}{100} \right] \quad 2.31$$

gde su:

$F_{p,C,d}$ – sila prednaprezanja u trenutku t u dugačkim HBT zavrtnjevima,

$F_{p,C,k}$ – sila prednaprezanja u trenutku t u kratkim HBT zavrtnjevima,

t – vreme u godinama nakon pritezanja zavrtnjeva.

U zaključku koji se odnosi na ovaj deo istraživanja, naglašeno je da se izvedeni izrazi odnose na konkretne uslove i uzorke, i da ih treba uzeti sa rezervom. Za svega tri zavrtnja po tipu uzorka, dobijaju se velike karakteristične vrednosti gubitaka sile prednaprezanja, pa se preporučuje nastavak istraživanja sa većim brojem uzoraka. Drugi ograničavajući faktor je vremenski period kontinuiranog praćenja sile u zavrtnjevima od najviše 40 nedelja. Ovo je relativno kratak vremenski period s obzirom na period ekstrapolacije od 20 godina.

Uzorak RuH-S_4, nakon četiri nedelje testa čiste relaksacije, izložen je dejstvu statičke sile koja odgovara 80% nosivosti uzorka i to u trajanju od 5 časova. Nakon toga uzorak je opterećen do proklizavanja, a sve vreme su merene sile u zavrtnjevima.

U trenutku delovanja maksimalne sile zatezanja od 574,64 kN, pojedinačni zavrtnj u uzorku izgubio je najviše dodatnih 2,29 % sile prednaprezanja, računato u odnosu na maksimalne vrednosti ostvarene u toku ugradnje zavrtnjeva. Sa obzirom na prethodno iznešeno, zaključeno je da se uticaj statičkog opterećenja na gubitak sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima može zanemariti.

Ispitivanje promene sile prednaprezanja usled dejstva dinamičkog opterećenja sprovedeno je na svega jednom uzorku označenom kao RuH_4. Primenjen je spektar dinamičkog opterećenja od ukupno 9×10^5 ciklusa. Frekvencija opterećenja menjala se od 1 Hz do 5 Hz na svakih 50000 ciklusa. Istom dinamikom menjao se i opseg opterećenja koji se povećavao za po 50 kN, od opsega 40-140 kN do opsega 40-490 kN. Do loma uzorka usled zamora došlo je nakon 849000 ciklusa, dakle pre kraja delovanja predviđenog broja ciklusa. Na osnovu dobijenih rezultata, merenjem sile u zavrtnjevima, autorka zaključuje da je gubitak sile prednaprezanja usled dejstva dinamičkog opterećenja, u proseku, 5,01 % i da se može zanemariti u odnosu na gubitak usled čiste relaksacije.

3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Za potrebe ove doktorske disertacije osmišljena su i sprovedena sopstvena eksperimentalna istraživanja. Kao uvod u centralno eksperimentalno istraživanje sprovedeno je nekoliko standardnih opita kojima su određena: mehanička svojstva primenjenih zavrtnjeva, koeficijent trenja između navrtke i tela primenjenih HV zavrtnjeva i koeficijent trenja u tarnim površinama za slučaj primene odabranog cink-silikatnog premaza. Centralno eksperimentalno istraživanje svakako ne spada u standardne opite (definisane nekim od standarda), pa je sprovedeno u dve faze. Na osnovu rezultata prve faze eksperimenta (probna serija uzoraka) definisan je sadržaj i obim druge faze, a sve sa ciljem što boljeg oslikavanja istraživanih fenomena. Uzorci su pripremani i ispitivani u Laboratoriji za ispitivanje materijala, Laboratoriji za ispitivanje konstrukcija i Laboratoriji za beton i reologiju Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Laboratoriji za ispitivanje neorganskih prevlaka i Laboratoriji za mehanička ispitivanja Tehnološko metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Laboratoriji za ispitivanje građevinskog preduzeća Mostogradnja iz Beograda i Laboratoriji za eksperimentalnu čvrstoću Vojnotehničkog instituta u Beogradu. Sa izradom uzoraka prve faze započeto je u januaru 2013. godine, a ugradnja zavrtnjeva i početak ispitivanja sprovedeni su u maju 2013. godine. Uzorci druge faze ispitivanja izrađeni su u oktobru 2013. godine, a ugradnja zavrtnjeva i početak ispitivanja izvršeni su u decembru 2013. godine. U ovoj disertaciji prikazani su rezultati dobijeni u periodu od četrnaest meseci nakon ugradnje uzoraka prve faze eksperimenta, dakle zaključno sa avgustom 2014. godine. Prema planu istraživanja predviđeno je da se praćenje sile prednaprezanja vrši u periodu od dve godine, pa se definitivni završetak eksperimenta očekuje u decembru 2015. godine.

3.1 Plan sopstvenih eksperimentalnih istraživanja

Polazeći od želje da se kvantifikuju gubici sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima, inicijalni, kratkoročni i dugoročni, a vodeći računa o primeni cink-silikatnih premaza kao antikorozijske zaštite na tarnim površinama, definisani su uzorci i način njihovog ispitivanja u toku eksperimentalnog istraživanja. S obzirom da je

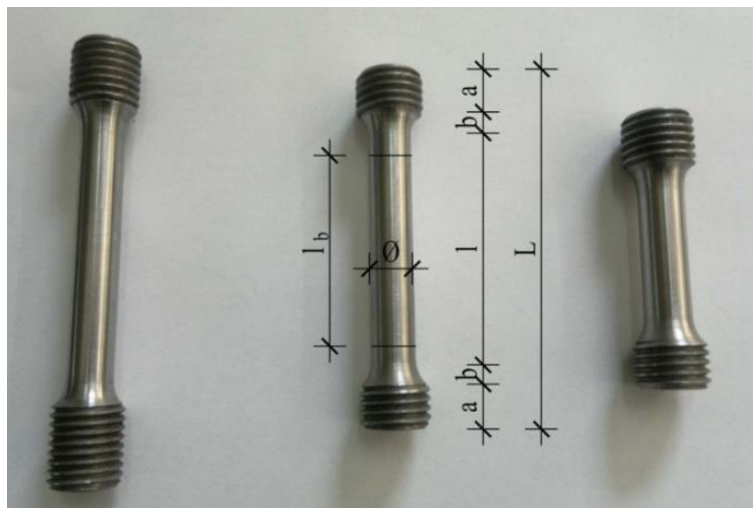
problem izrade i ispitivanja uzoraka multidisciplinarnan, pažljivo je planiran sa aspekta raspoloživih resursa. Da bi se sprovedo ovako zahtevno istraživanje unapred je osmišljen detaljan redosled operacija, definisani resursi sa kojim će se sprovesti svaka od faza istraživanja, pa samim tim i mesto na kom će se sprovesti. Tako je pre početka izrade uzoraka dogovoreno da se čelične ploče izrade, ispeskare i na njih nanese antikorozijska zaštita u pogonima „PC Batajnica“ građevinskog preduzeća „Mostogradnja“ iz Beograda. Ovo je bilo najlogičnije rešenje s obzirom na veliko iskustvo zaposlenih u primeni premaza Resist 86 u tarnim spojevima mosta „Gazela“ u toku njegove rekonstrukcije u toku 2012. godine. „Huck BobTail“ zavrtnjeve (HBT) i opremu za njihovu ugradnju ustupila je firma „Alcoa Fastening Systems“ iz Telforda u Engleskoj. Visokovredni zavrtnjevi i navrtke (HV) proizvođača „Peiner“, donacija su firme „Johannes Steiner GmbH & Co.“ iz Weningena u Nemačkoj. Cink silikatni premaz Resist 86 donirao je njegov proizvođač, norveška firma „Jotun“.

3.2 Uvodna eksperimentalna istraživanja

3.2.1 Mehanička svojstva primenjenih HBT zavrtnjeva

Iz razloga boljeg razumevanja i tačnijeg tumačenja rezultata predmetnog eksperimentalnog istraživanja izvršeno je ispitivanje materijala od kog su sačinjeni korišćeni zavrtnjevi. Na taj način određena su njihova stvarna mehanička svojstva i potvrđene karakteristike garantovane od strane proizvođača. Prema atestnoj dokumentaciji proizvođača, zavrtnjevi sa zaključavanjem i HV zavrtnjevi primenjeni u ovom istraživanju su klase čvrstoće 10.9, odnosno imaju garantovanu granicu razvlačenja $f_y=900$ MPa i čvrstoću pri zatezanju $f_u=1000$ MPa.

Za potrebe određivanja mehaničkih karakteristika HBT zavrtnjeva izrađeno je šest epruveta, od svake vrste zavrtnjeva i svake dužine po jedna epruveta (slika 3.1). Ispitivanje je izvršeno u Laboratoriji za mehanička ispitivanja Tehnološko metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.



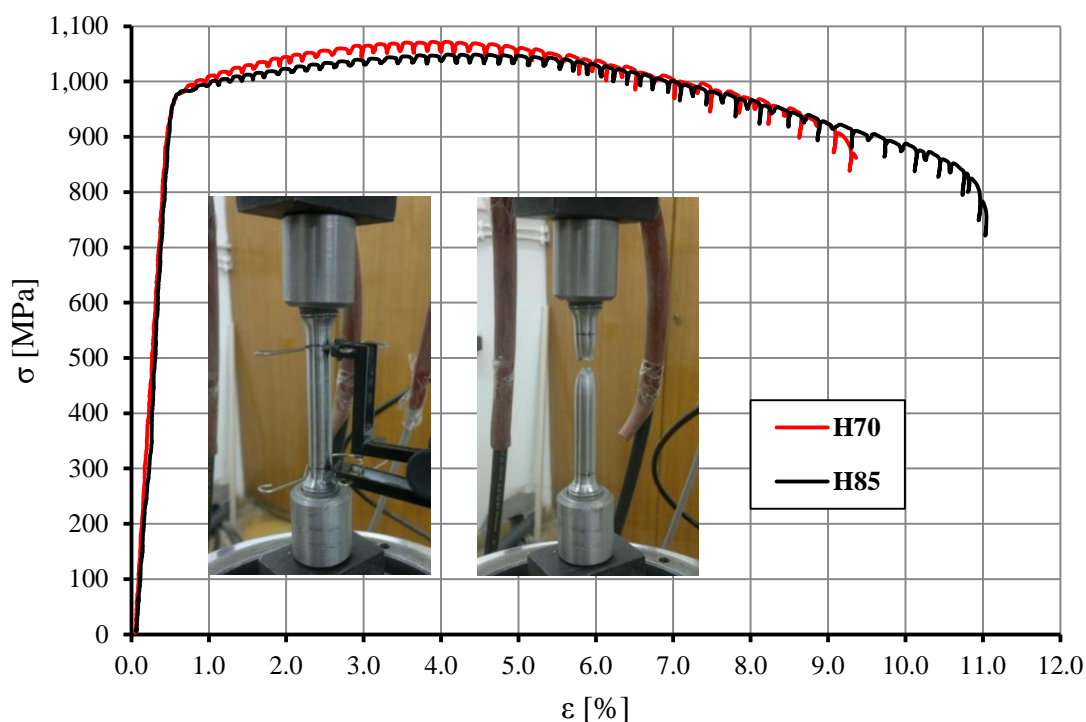
Slika 3.1: Epruvete za određivanje fizičko mehaničkih osobina HBT zavrtnjeva

Pre ispitivanja epruveta izvršeno je merenje njihovih dimenzija (tabela 3.1). Merenje deformacija epruvete izvršeno je ekstenzometrom sa dužinom merne baze od 50 mm. U slučaju epruveta izrađenih od najkraćih zavrtnjeva (HBT zavrtnjevi dužine 55 mm), zbog neophodne dužine navoja za fiksiranje epruvete u alat, dužina baze nije mogla biti veća od 36 mm, što nije dovoljno da se postavi ekstenzometar. Zbog toga su ove epruvete isključene iz ispitivanja. Kao dodatna kontrola merenja izduženja pri lomu uzorka izvršeno je obeležavanje kontrolne baze merenja flomasterom, dužina l_b , čija je dužina nakon loma uzorka označena kao l_b' .

Tabela 3.1: Dimenzije epruveta za određivanje mehaničkih svojstava HBT zavrtnjeva

Epruveta	a [mm]	b [mm]	l [mm]	L [mm]	\varnothing [mm]	l_b [mm]	l_b' [mm]
H70	10,0	3,0	55,0	81,0	9,87	44,1	48,79
H85	15,0	5,5	60,0	101,0	9,95	50,3	56,08

Za izradu epruveta korišćeni su HBT zavrtnjevi sa već izbušenim rupama za ugradnju mernih traka ali, u koje trake nisu ugrađene. Zbog toga je površina poprečnog preseka ovih epruveta umanjena za površinu rupe prečnika 2 mm.



Slika 3.2: Dijagrami napon – dilatacija za epruvete izrađene od HBT zavrtnjeva

Ovim ispitivanjem (slika 3.2) potvrđeno je da korišćeni zavrtnjevi imaju specificirana mehanička svojstva, pri čemu su dobijena granica razvlačenja i čvrstoća pri zatezanju oko 8%, odnosno 6% veće od garantovanih. Dobijeni rezultati pokazali su veliko međusobno poklapanje (tabela 3.2), što je isključivanje najkraćih epruveta iz ispitivanja učinilo zanemarljivim.

Tabela 3.2: Karakteristike čelika od kog su izrađeni HBT zavrtnjevi

Epruveta	A [cm ²]	F_{max} [kN]	f_v [MPa]	$f_{v,sr}$ [MPa]	f_u [MPa]	$f_{u,sr}$ [MPa]
H70	0,7337	78,645	976,0	976,0	1071,9	1060,4
H85	0,7461	78,247	976,0		1048,8	

3.2.2 Mehanička svojstva primenjenih HV zavrtnjeva

Za potrebe određivanja mehaničkih karakteristika HV zavrtnjeva izrađene su tri epruvete, od svake dužine zavrtnja po jedna (slika 3.3). Ispitivanje je izvršeno u Laboratoriji za mehanička ispitivanja Tehnološko metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.



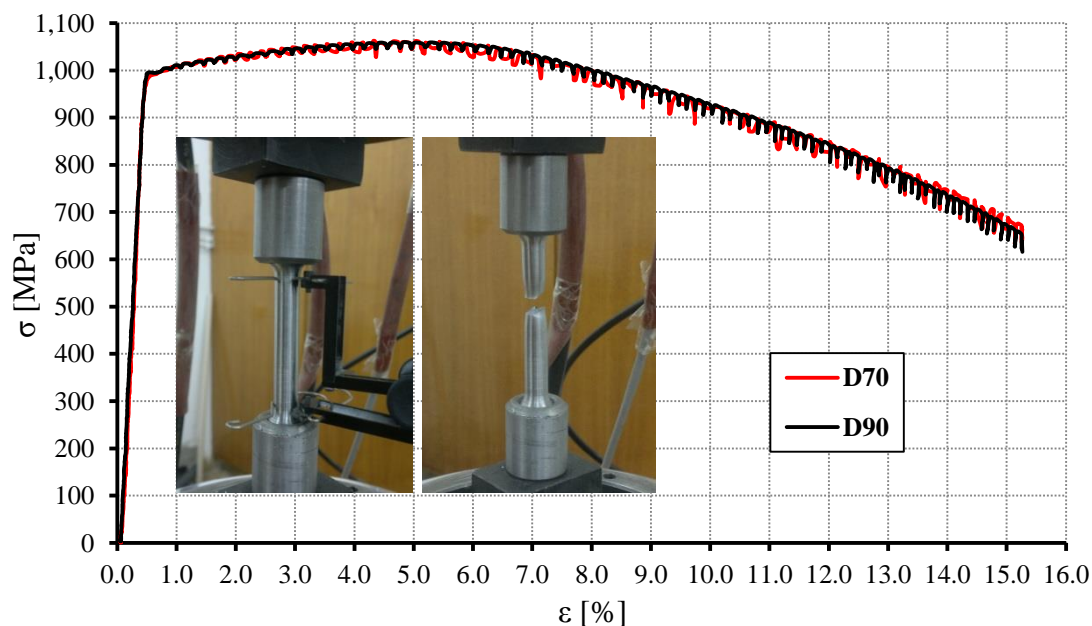
Slika 3.3: Epruvete za određivanje fizičko mehaničkih osobina HV zavrtnjeva

Pre ispitivanja epruveta izvršeno je merenje njihovih dimenzija (tabela 3.3). Merenje deformacija epruvete u toku ispitivanja izvršeno je primenom ekstenzometra. Iz istih razloga kao kod ispitivanja HV zavrtnjeva, epruvete izrađene od najkraćih zavrtnjeva (HV zavrtnjevi dužine 50 mm), isključene su iz ispitivanja. Kao dodatna kontrola izduženja pri lomu uzorka izvršeno je obeležavanje kontrolne baze merenja flomasterom, dužina l_b , čija je dužina nakon loma uzorka označena kao l_b' .

Tabela 3.3: Dimenzije epruveta za određivanje mehaničkih svojstava HV zavrtnjeva

Epruveta	a [mm]	b [mm]	l [mm]	L [mm]	\varnothing [mm]	l_b [mm]	l_b' [mm]
D70	11,0	3,5	52,0	81,0	9,95	43,0	50,54
D90	22,0	2,5	52,0	101,0	9,90	43,1	50,73

Ovim ispitivanjem (slika 3.4) potvrđeno je da korišćeni zavrtnjevi ispunjavaju specificirana mehanička svojstva, kao i da su granica razvlačenja i čvrstoća pri zatezanju oko 9%, odnosno 6% veće od garantovanih.



Slika 3.4: Dijagrami napon - dilatacija za epruvete izrađene od HV zavrtnjeva

Dobijeni rezultati pokazali su veliko međusobno poklapanje (tabela 3.4), što je isključivanje najkraćih epruveta iz ispitivanja učinilo zanemarljivim.

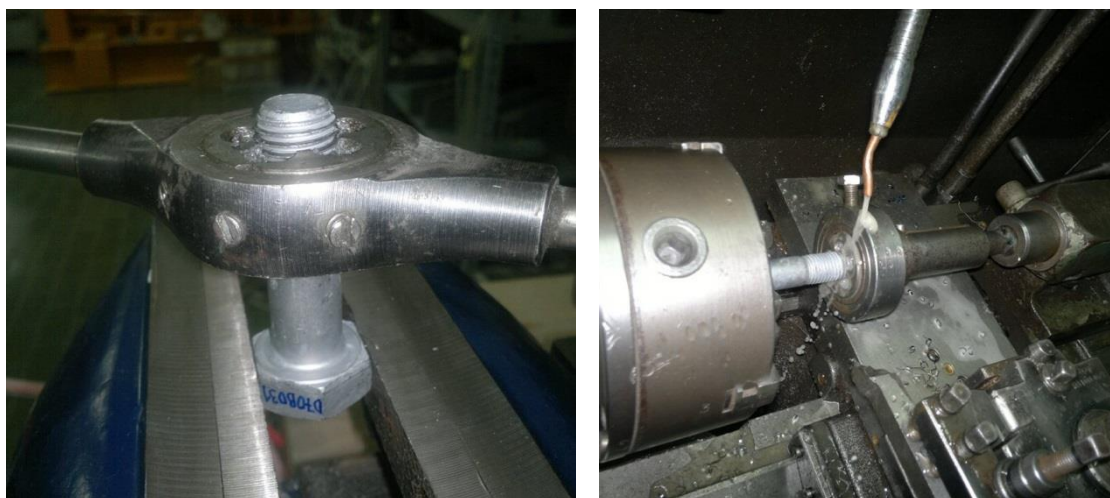
Tabela 3.4: Karakteristike čelika od kog su izrađeni HV zavrtnjevi

Epruveta	A [cm ²]	F _{max} [kN]	f _v [MPa]	f _{v,sr} [MPa]	f _u [MPa]	f _{u,sr} [MPa]
D70	0,7777	82,677	988,0	993,0	1063,1	1061,6
D90	0,7698	81,606	995,0		1060,1	

3.2.3 Koeficijent trenja između navoja navrtke i tela HV zavrtnja - k

Najčešće primenjivana metoda ugradnje HV zavrtnjeva u Srbiji je ugradnja uz pomoć moment ključa. Ta metoda primenjena je i u ovom eksperimentalnom istraživanju. Za potrebe određivanja momenta pritezanja HV zavrtnjeva izvršeno je, za svaku od faza istraživanja, određivanje koeficijenta trenja između navoja navrtke i navoja na telu zavrtnja, koeficijenta *k*. Ovaj deo priprema zavrtnjeva za ugradnju izvršen je u, za taj postupak akreditovanoj, Laboratoriji za ispitivanje firme „Mostogradnja“ iz Beograda.

U ovom eksperimentalnom istraživanju korišćeni su toplocinkovani HV zavrtnjevi, što podrazumeva da je na njima, u postupku toplog cinkovanja, nanet zaštitni sloj cinka u debljini 45 – 90 μm. Prilikom probne ugradnje zavrtnjeva u alat za kalibraciju uočeno je da kod velikog broja HV zavrtnjeva nije moguće izvršiti njihovu ugradnju u metrički navoj koji je izveden u alatu. Zbog ovoga je izvršena obrada (čišćenje) navoja svakog od HV zavrtnjeva nareznicom, u prvoj fazi ručno, a u drugoj na strugu (slika 3.5). Na taj način sa navoja je uklonjen višak cinka, što je omogućilo njihovu laku ugradnju u alat za kalibraciju. Veoma je važno naglasiti da je koeficijent *k* određivan na zavrtnjevima čiji je navoj takođe obrađen na opisan način.



Slika 3.5: Uklanjanje cinka sa navoja zavrtnja

Postupak je sproveden u svemu prema standardu SRPS U.E7.140:1985 [32] (od 25.07.2012. godine uporedo važi SRPS EN 1993-1-8:2012 [34]). Za potrebe postupka korišćena je sledeća oprema:

- momentna vaga: TORQUELEADER, model N 2000, opseg 100 – 2000 Nm
- tenzimetar: STAHLWILLE, opseg do 300 kN (M16 – M27)
- moment ključ: RAHSOL DREMOMETER Typ D, opseg 140 – 760 Nm

Koeficijent k određen je za propisanu silu pritezanja $F_p=160$ kN što je vrednost između standardom propisanih vrednosti $F_{p1}=154$ kN (za $k>0,14$) i $F_{p2}=176$ kN (za $k\leq 0,14$).

U fazi I eksperimentalnog istraživanja koeficijent k je određen ispitivanjem tri zavrtnja iz iste šarže, jedan dužine 70 mm i dva dužine 90 mm. Zbog ograničenja tenziometra najkraći zavrtnjevi, dužine 50 mm, nisu mogli da se ispituju. Kako je koeficijent varijacije dobijenih rezultat C_v manji od 10 % (tabela 3.5), a s obzirom na ograničen broj raspoloživih zavrtnjeva, ovaj broj uzoraka je bio sasvim prihvatljiv.

Tabela 3.5: Vrednosti koeficijenta k za fazu I istraživanja

R.B	Zavrtnaj	$M_{u,i}$ [Nm]	$F_{p,i}$ [kN]	k_i	k_{sr}	S_k	C_v [%]
1	M20x70	500	164	0,152	0,154	0,006	3,91<10
2	M20x90	480	150	0,160			
3	M20x90	480	162	0,148			

Za željenu silu prednaprezanja u zavrtnjevima $F_{p,C}=171,5$ kN (prema [34]) optimalni moment pritezanja za HV zavrtnjeve faze I glavnog eksperimentalnog istraživanja određen je kao:

$$M_{r,opt,FI} = F_{p,C} \cdot d \cdot k_{sr} = 528 \text{ Nm} \quad 3.1$$

U fazi II glavnog eksperimentalnog istraživanja koeficijent k je određen ispitivanjem šest zavrtnjeva iz iste šarže, po tri dužine 70 mm i 90 mm. Kao i u fazi I, zbog ograničenja tenziometra najkraći zavrtnjevi, dužine 50 mm, nisu mogli da se ispituju. I u ovom slučaju dobijen je koeficijent varijacije C_v manji od 10 % (tabela 3.6), pa je ispitan broj zavrtnjeva usvojen kao prihvatljiv.

Tabela 3.6: Vrednosti koeficijenta k za fazu II istraživanja

R.B	Zavrtnanj	$M_{u,i}$ [Nm]	$F_{p,i}$ [kN]	k_i	k_{sr}	S_k	C_v [%]
1	M20x70	470	180	0,131	0,138	0,0088	6,38<10
2	M20x70	445	168	0,132			
3	M20x70	435	160	0,136			
4	M20x90	435	150	0,145			
5	M20x90	450	147	0,153			
6	M20x90	450	169	0,133			

Za željenu silu prednaprezanja u zavrtnjevima $F_{p,C}=171,5$ kN (prema [34]) optimalni moment pritezanja za HV zavrtnjeve faze II istraživanja određen je kao:

$$M_{r,opt,FI} = F_{p,C} \cdot d \cdot k_{sr} = 473 \text{ Nm} \quad 3.2$$

3.3 Cink-silikatni premaz RESIST 86 proizvođača „Jotun“

Još u fazi planiranja eksperimentalnog istraživanja za potrebe ove disertacije, doneta je odluka da se određivanje koeficijenta trenja čeličnih ploča zaštićenih cink-silikatnim premazom „Resist 86“ sprovede još jednom, na isti način kako je to urađeno u toku rekonstrukcije mosta „Gazela“ [27].

Postupak je sproveden u svemu prema važećim standardima i detaljno opisan u Aneksu A. Uzorci su izrađeni od istih materijala kao i uzorci za određivanje gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima, čelične ploče iz iste šarže i cink-silikatni premaz iz iste serije.

Dinamika ispitivanja prilagođena je slučaju izgradnje nove čelične konstrukcije. U ovom slučaju antikoroziorna zaštita elemenata konstrukcije vrši se pre njihove ugradnje i moguće je da između nanošenja premaza i ugradnje elementa u konstrukciju prođe značajan vremenski period. Zbog toga je premaz nanet na uzorke 10 dana pre pritezanja zavrtnjeva, a uzorci su ispitani 24 h nakon pritezanja. Dobijeni rezultati (tabela 3.7) jasno pokazuju da se primenom predmetnog premaza, u najnepovoljnijem slučaju, dobijaju spojevi kategorije hrapavosti B, prema EN 1993-1-8 [29].

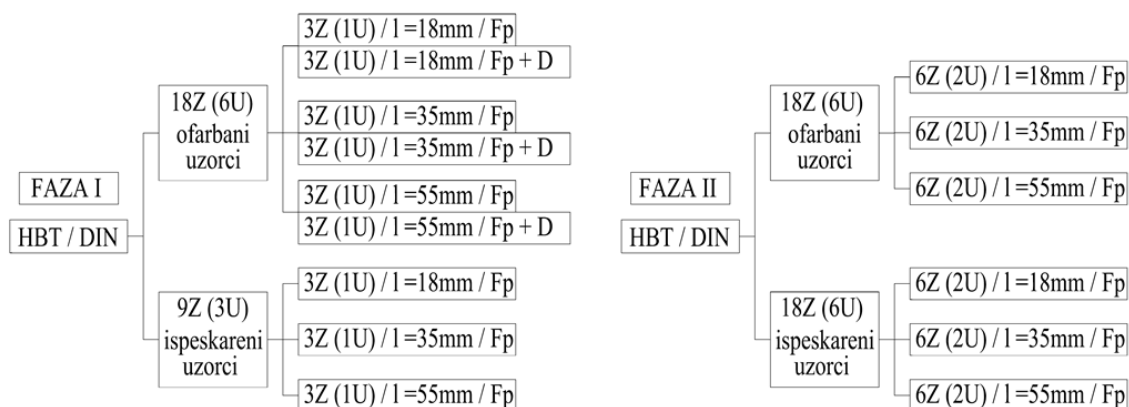
Tabela 3.7: Koeficijent trenja čeličnih ploča zaštićenih premazom Resist 86 – ispitivanje za potrebe disertacije

Zavrtnjevi u uzorku	Broj uzoraka	Srednja vrednost koef. trenja μ_{sr}	Standardna devijacija S_{μ}	Koeficijent varijacije C_v [%]
Epruvete pritegnute nakon 10 dana, a ispitane 24 h nakon pritezanja				
M16	3	0,50	0,020	3,9
M20	3	0,47	0,014	3,3

3.4 Opšte o eksperimentu

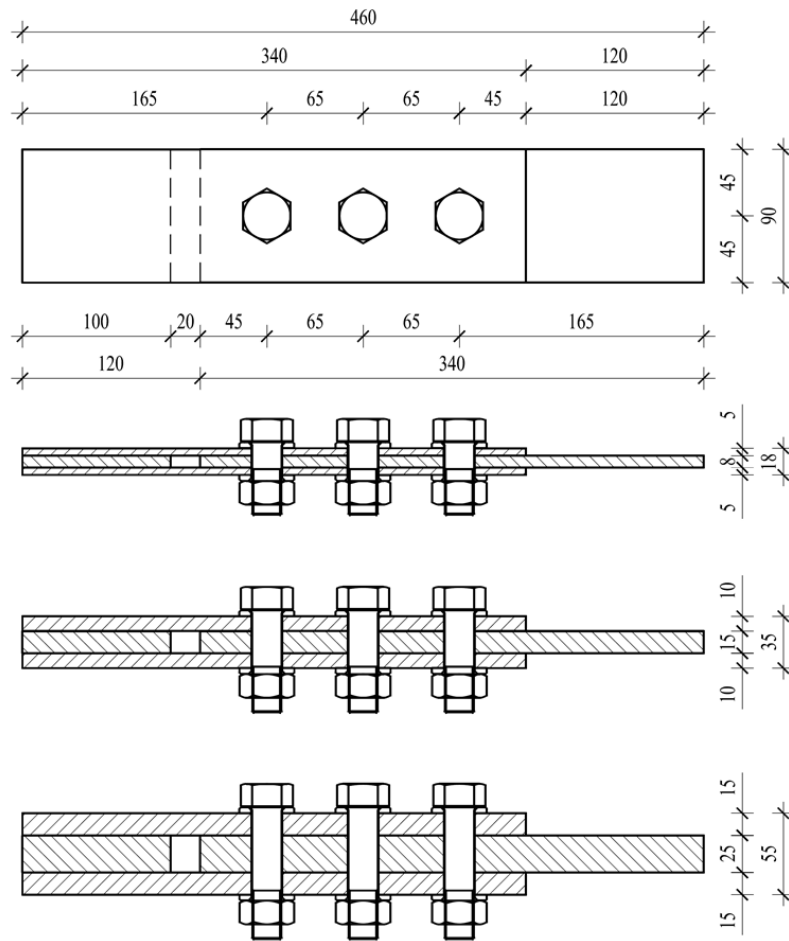
U prvoj fazi eksperimentalnog istraživanja formirano je i ispitano ukupno 18 uzoraka, a u drugoj fazi ukupno 24 uzorka. Uzorci sa i bez antikorozijske zaštite formirani su na način da se kroz njih variraju: vrsta i dužina zavrtnja, redosled ugradnje zavrtnjeva i vrsta opterećenja. Radi lakšeg sagledavanja sadržaja i obima eksperimenta formiran je šematski prikaz (slika 3.6). Oznake korišćene na šemi imaju sledeće značenje:

- Z – zavrtnaj
- U – uzorak
- l – stezna dužina
- F_p – uzorci izloženi sili prednaprezanja u zavrtnjevima
- D – uzorci izloženi dinamičkom opterećenju



Slika 3.6: Šematski prikaz eksperimentalnog istraživanja

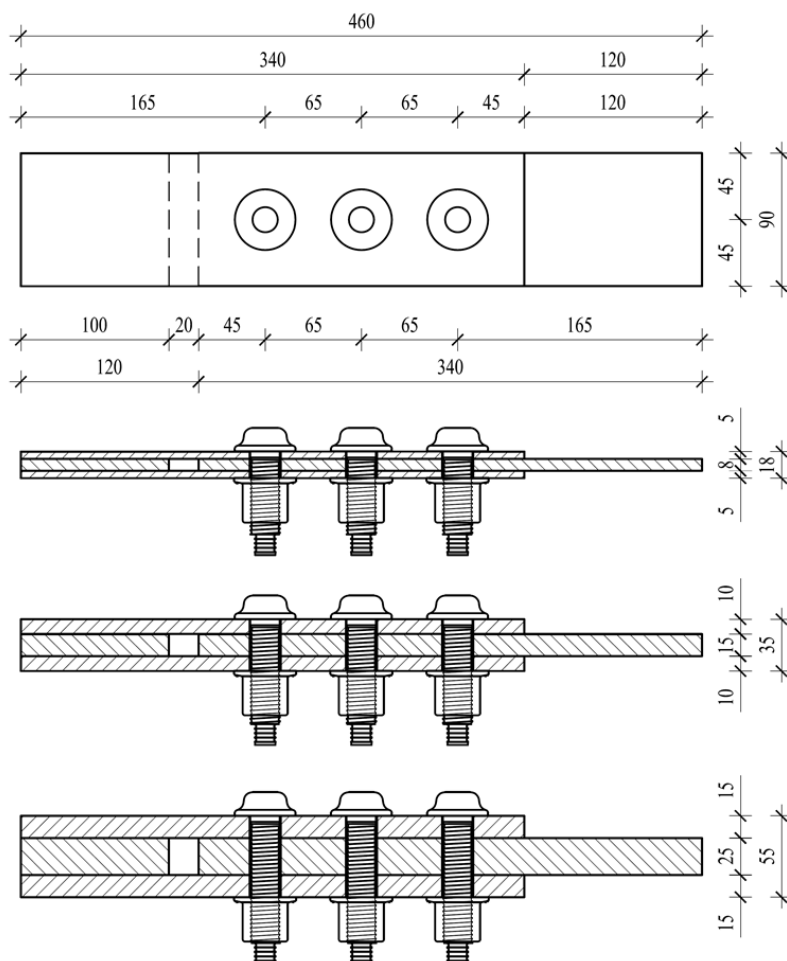
Svaki uzorak sastoji se od tri čelične ploče i tri zavrtnja koji zajedno formiraju simetričan nastavak na preklop. Dvadeset jedan uzorak formiran je sa visokovrednim HV zavrtnjevima izrađenim prema EN 14399-4 standardu (slika 3.7), isto toliko sa „Huck BobTail“ visokovrednim zavrtnjevima (slika 3.8).



Slika 3.7: Uzorci sa visokovrednim HV zavrtnjevima izrađenim prema EN 14399-4 standardu

Svi korišćeni zavrtnjevi su nazivnog prečnika 20 mm (M20). Za izradu uzoraka korišćeni su visokovredni HV zavrtnjevi dužina: 50 mm, 70 mm i 90 mm. Dužina korišćenih „Huck BobTail“ zavrtnjeva, koja odgovara usvojenoj debljini uzoraka (steznoj dužini) definisanih spojeva, su 55 mm, 70 mm i 85 mm.

Za formiranje uzoraka korišćene su čelične ploče debljine 5 mm, 8 mm, 10 mm, 15 mm i 25 mm i na taj način dobijeni su uzorci sa tri različite debljine paketa limova (stezne dužine), i to: 18 mm ($5+8+5=18$ mm), 35 mm ($10+15+10=35$ mm) i 55 mm ($15+25+15=55$ mm).



Slika 3.8: Uzorci sa „Huck BobTail“ visokovrednim zavrtnjevima

Od uzoraka formiranih u prvoj fazi eksperimentalnog istraživanja 12 uzoraka izloženo je samo dejstvu sile prednaprezanja u zavrtnjevima čiji se pad prati kroz vreme, a preostalih 6 uzoraka izloženo je samo dejstvu sile prednaprezanja u zavrtnjevima prvih mesec dana, a nakon toga dinamičkom opterećenju u 2×10^6 ciklusa. Za potrebe analiziranja uticaja postupka prednaprezanja zavrtnja na silu u susednim, već prednapregnutim zavrtnjevima, izvršena je ugradnja zavrtnjeva u uzorke prema kontrolisanom redosledu. Zbog toga je oznakom zavrtnja definisano i koji je on po redu ugrađen u uzorak, prvi, drugi ili treći. Usvojen je sistem označavanja zavrtnjeva (tabela 3.8) tako da je svaki od njih jednoznačno određen. Dakle, zavrtnj koji nosi oznaku H70C01 je „Huck BobTail“ zavrtnj dužine 70 mm koji se ugrađuje u uzorak sa antikorozijskom zaštitom, a izložen je samo dejstvu sile prednaprezanja u zavrtnjevima. Ovaj zavrtnj u uzorak se ugrađuje prvi po redu.

Tabela 3.8: Sistem označavanja zavrtnjeva

Deo oznake	Oznaka	Značenje oznake
Slovna oznaka na prvom mestu	D	Zavrtnjevi prema DIN standardu
	H	Zavrtnjevi „Huck BobTail“
Brojna oznaka na drugom i trećem mestu	50	Zavrtanj dužine tela 50 mm
	55	Zavrtanj dužine tela 55 mm
	70	Zavrtanj dužine tela 70 mm
	85	Zavrtanj dužine tela 85 mm
	90	Zavrtanj dužine tela 50 mm
Slovna oznaka na četvrtom mestu	B	Zavrtanj se ugrađuje u uzorak bez AKZ – „Blusted“
	C	Zavrtanj se ugrađuje u uzorak sa AKZ – „Coated“
Brojna oznaka na petom mestu	0	Zavrtanj se ugrađuje u uzorak koji je izložen samo sili prednaprezanja u zavrtnjevima
	1	Zavrtanj se ugrađuje u uzorak koji je izložen sili prednaprezanja u zavrtnjevima i dinamičkom opterećenju
Brojna oznaka na šestom mestu	1	Zavrtanj se ugrađuje u uzorak prvi po redu
	2	Zavrtanj se ugrađuje u uzorak drugi po redu
	3	Zavrtanj se ugrađuje u uzorak treći po redu
Brojna oznaka na sedmom mestu	1	Zavrtanj ponovljen prvi put (faza II)
	2	Zavrtanj ponovljen drugi put (faza II)

Nakon analize rezultata faze I eksperimenta zaključeno je da oni dobro oslikavaju posmatrane fenomene. Zbog toga su uzorci u fazi II isti kao i uzorci u fazi I, a sve sa ciljem da se poveća ukupan broj ispitanih zavrtnjeva i tako omogući pouzdanija statistička analiza rezultata. Uzorci u fazi II nose iste oznake kao i uzorci u fazi I, izuzev poslednjeg broja u oznaci koji služi da se zavrtnjevi ponovljeni prvi i drugi put razlikuju od svog para iz faze I istraživanja.

Zbog lakšeg praćenja rezultata celokupnog eksperimenta i lakšeg sprovođenja ispitivanja uzoraka na dejstvo dinamičkog opterećenja, uvedeno je i označavanje uzoraka (tabela 3.9 i tabela 3.10).

Tabela 3.9: Sistem označavanja uzoraka prve faze eksperimenta

Oznaka zavrtnja	Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Oznaka uzorka
D50B01	D1	D50C01	D2	D50C11	D3
D50B02		D50C02		D50C12	
D50B03		D50C03		D50C13	
D70B01	D4	D70C01	D5	D70C11	D6
D70B02		D70C02		D70C12	
D70B03		D70C03		D70C13	
D90B01	D7	D90C01	D8	D90C11	D9
D90B02		D90C02		D90C12	
D90B03		D90C03		D90C13	
H55B01	H1	H55C01	H2	H55C11	H3
H55B02		H55C02		H55C12	
H55B03		H55C03		H55C13	
H70B01	H4	H70C01	H5	H70C11	H6
H70B02		H70C02		H70C12	
H70B03		H70C03		H70C13	
H85B01	H7	H85C01	H8	H85C11	H9
H85B02		H85C02		H85C12	
H85B03		H85C03		H85C13	

Tabela 3.10: Sistem označavanja uzoraka druge faze eksperimenta

Oznaka zavrtnja	Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Oznaka uzorka
D50B01.1	D10	D50B01.2	D11	D50C01.1	D12
D50B02.1		D50B02.2		D50C02.1	
D50B03.1		D50B03.2		D50C03.1	
D50C01.2	D13	D70B01.1	D14	D70B01.2	D15
D50C02.2		D70B02.1		D70B02.2	
D50C03.2		D70B03.1		D70B03.2	
D70C01.1	D16	D70C01.2	D17	D90B01.1	D18
D70C02.1		D70C02.2		D90B02.1	
D70C03.1		D70C03.2		D90B03.1	
D90B01.2	D19	D90C01.1	D20	D90C01.2	D21
D90B02.2		D90C02.1		D90C02.2	
D90B03.2		D90C03.1		D90C03.2	
H55B01.1	H10	H55B01.2	H11	H55C01.1	H12
H55B02.1		H55B02.2		H55C02.1	
H55B03.1		H55B03.2		H55C03.1	
H55C01.2	H13	H70B01.1	H14	H70B01.2	H15
H55C02.2		H70B02.1		H70B02.2	
H55C03.2		H70B03.1		H70B03.2	
H70C01.1	H16	H70C01.2	H17	H85B01.1	H18
H70C02.1		H70C02.2		H85B02.1	
H70C03.1		H70C03.2		H85B03.1	
H85B01.2	H19	H85C01.1	H20	H85C01.2	H21
H85B02.2		H85C02.1		H85C02.2	
H85B03.2		H85C03.1		H85C03.2	

3.5 Metode merenja sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima

Jedno od osnovnih pitanja, na koje se mora odgovoriti u fazi osmišljavanja ovakvog eksperimentalnog istraživanja, je na koji način izmeriti maksimalnu silu prednaprezanja u zavrtnju, ali i njenu promenu u toku vremenskog perioda od dve godine. Detaljnim istraživanjem došlo se do zaključka da se sila u zavrtnju može meriti na jedan od sledećih načina:

- merenjem promene vremena potrebnog za prostiranje ultrasoničnog talasa kroz telo zavrtnja, uz pomoć nekog od komercijalnih uređaja dostupnih na tržištu,
- postavljanjem merne ćelije nalik podloški (*washer like load cell; donut load cell*) ispod glave svakog zavrtnja i
- uz pomoć mernih traka, zalepljenih na telo zavrtnja ili ugrađenih u telo zavrtnja.

U prvom slučaju radi se o kompaktnim uređajima prilagođenim za merenja na licu mesta. Na tržištu su dostupni uređaji nekoliko proizvođača, među kojima su najzastupljeniji „*Mini-MAX-Series Ultrasonic Bolt Meter*“ [30] proizvođača „*Qualitest North America*“ (slika 3.9a) i „*BoltScope Pro*“ [55] proizvođača „*Hidratight*“ (slika 3.9b).



Slika 3.9: Ultrasonični uređaji za merenje sile prednaprezanja u zavrtnjevima

Ovi uređaji mogu se koristiti za sve vrste materijala od kojih se izrađuju zavrtnjevi, a primena je ograničena na zavrtnjeve dužine od 1" do 48" (izuzetno do 96"). Njihova glavna namena je kontrolisanje ostvarene sile prednaprezanja u zavrtnju u postupku ugradnje (kontrola različitih načina unošenja sile prednaprezanja) bilo da se radi o autoindustriji, hidrogradnji ili primeni u građevinskim konstrukcijama.

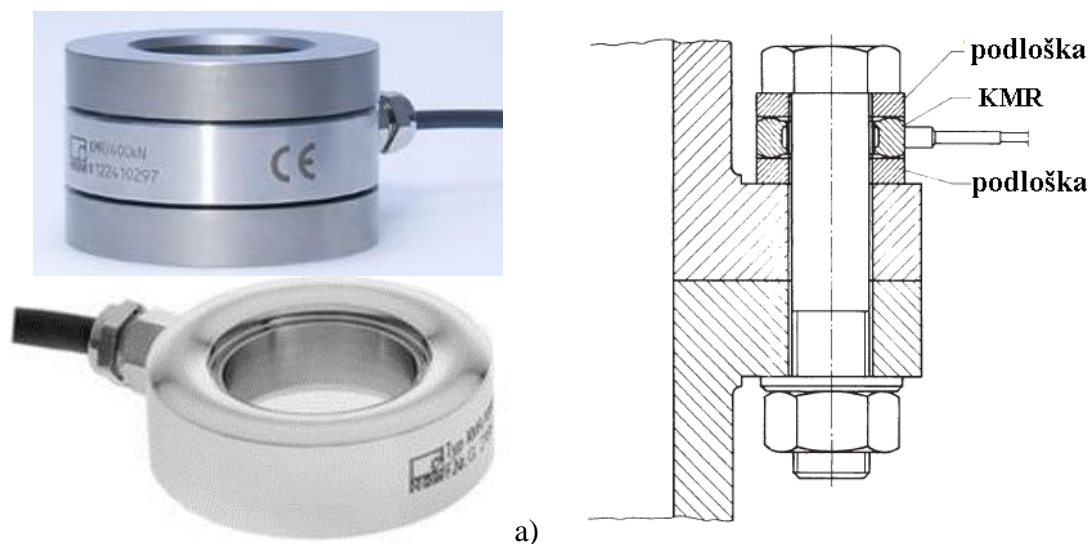
Međutim, primena za ovakvo istraživanje nije moguća iz dva razloga:

1. preciznost merenja je $\pm 10^{-4}$ mm/mm što je nedovoljno za praćenje promena od jedne mikrodilatacije (10^{-6} mm/mm),
2. princip rada uređaja, koji iziskuje da se jedan njegov deo (u kom se nalaze odašiljač i prijemnik signala) prisloni na glavu zavrtnja, onemogućava njegovu primenu u slučaju velikog broja zavrtnjeva i merenje sile za velikom učestalošću (10 Hz).

Sa druge strane, primenom ovih uređaja moguće je dovoljno pouzdano odrediti vrednost sile prednaprezanja u zavrtnju neposredno nakon njegove ugradnje.

Merne ćelije nalik podloški su uređaji koji rade na jednom od dva principa: uz pomoć mernih traka (*strain gauge load cell*) ili kao najnovije rešenje, na bazi piezoelektričnog materijala (*piezoelectric load cell*).

U prvom slučaju (slika 3.10), limitirajući faktor je preciznost merenja. Naime, što je manja debljina merne ćelije to su i kraće merne trake čija se promena dužine meri, što rezultuje manjim opsegom merenja, ali i manjom preciznošću. U slučaju mernih ćelija veće debljine dolazi do povećanja dužine steznog paketa, pa je samim tim potrebno ugraditi duži zavrtnj od onog koji odgovara ukupnoj debljini elemenata u vezi. Konkretno, za zavrtnjeve M20 odgovarajuća je merna ćelija KMR300 ukupne debljine 10,5 mm i mernog opsega do 300 kN [56].



Slika 3.10: a) Merne ćelije na bazi mernih traka tip KMR, proizvođača HBM, b) Način ugradnje mernih ćelija tipa KMR

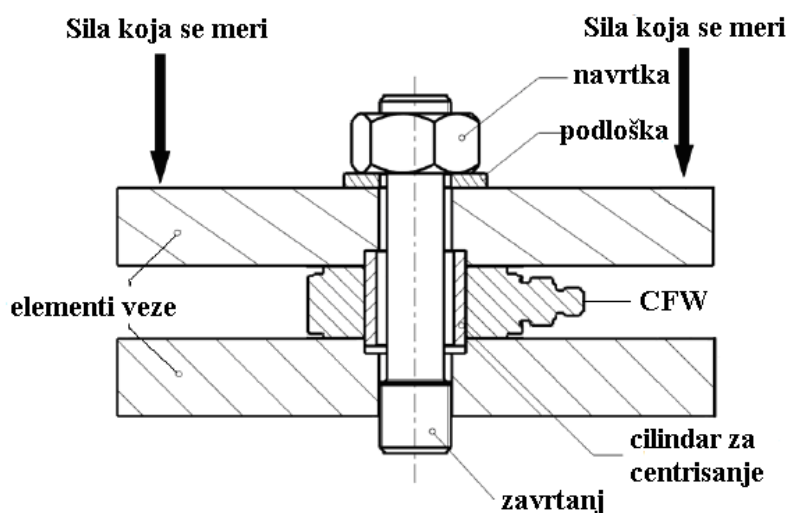
Piezoelektrične merne ćelije (slika 3.11) rade na principu stvaranja elektrostatičkog naboja koji generiše kvarcni kristal ili keramika, a proporcionalan je sili

koja deluje na mernu ćeliju. Ovaj naboj se sakuplja na pločastim elektrodama koje se nalaze između dva kvarcna (keramička) elementa i konvertuje u signal koji se šalje na pojačivač i dalje očitava merno akvizicionim sistemom. Opseg merenja između ostalog zavisi i od dimenzija ćelije. Tako, one ćelije čija je debljina jednaka debljini podloške nemaju dovoljan kapacitet (tip CLP/62 kN). Sa druge strane, ćelije prilagođene primeni kod zavrtnjeva prečnika M20 (i prečnikom otvora od 21 mm i kapacitetom od 190 kN) imaju debljinu 13 mm, što je značajno veće od debljine standardne podloške [57].



Slika 3.11: Piezoelektrične merne ćelije tip CLP i CFW, proizvođača HBM

Takođe, proizvođač preporučuje ugradnju mernih ćelija između čeličnih ploča koje se pritežu visokovrednim zavrtnjevima (slika 3.12), što dodatno otežava njihovu primenu u ovom slučaju.



Slika 3.12: Način primene CFW mernih ćelija

Iako bi se navedeni problemi primene mernih ćelija dali prevazići, ne može se zanemariti njihova cena. Naime, u ovom trenutku, na tržištu Republike Srbije ove merne ćelije mogu se dobiti po sledećim cenama. Primena mernih ćelija CFW330 je nekoliko puta skuplje rešenje, a uzimajući u obzir broj zavrtnjeva koji se koriste za ovo istraživanje (126 komada), u oba slučajeva, neophodna su značajna, praktično nedostupna,

finansijska sredstva. Ipak, ovakve merne ćelije mogle bi imati značajnu ulogu u postupku kalibracije zavrtnjeva jer bi se u tom slučaju sa jednom mernom ćelijom mogao kalibrisati neograničen broj zavrtnjeva, bilo da se ona koristi u svrhu kontrole sile na kidalici ili da se sa nje očitavaju vrednosti sile u zavrtnjevima.

Na kraju, primena mernih traka, bez obzira na dugotrajno ispitivanje, trenutno predstavlja najbolji način za kontinuirano merenje sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima. One su od navedenih metoda najpristupačnije, a od skora, najveći svetski proizvođači imaju i merne trake namenjene baš za ugradnju u zavrtnjeve. O prednostima ugradnje mernih traka u zavrtnjeve u odnosu na lepljenje traka na telo zavrtnjeva, kao i o samom postupku ugradnje više reči će biti u poglavlju 4.4.2.

3.6 Primenjeni merno-akvizicioni sistemi za prikupljanje podataka

Merenje sile prednaprezanja u zavrtnjevima, korišćenim za ovo eksperimentalno istraživanje, vrši se uz pomoć mernih traka. Shodno tome, izvršen je i izbor merno-akvizicionih sistema za merenje i sakupljanje podataka. Ovaj izbor uslovljen je raspoloživim resursima i predviđenim vremenom korišćenja opreme kao i brojem zavrtnjeva i zahtevanom učestalošću očitavanja vrednosti.

U ovom istraživanju korišćena su dva merno-akviziciona sistema: „*MGCplus*“ [58] proizvođača „*HBM*“ i logger „*DT85G*“ [59] proizvođača „*Data Taker*“ u kombinaciji sa multiplekserima „*CEM20*“ [60] istog proizvođača.

„*MGCplus*“ je sistem za akviziciju primenljiv kod gotovo svake industrijske, laboratorijske ili istraživačke aplikacije. Njegova primena opravdana je, bilo da se meri sila, pomeranje, pritisak, temperatura, obrtni momenat, ubrzanje, dilatacija, mehanički napon, električni napon, struja, frekvencija, ili otpor, sa manjom ili većom učestalošću. Ovaj merni sistem može da vrši očitavanja sa punog, polu i četvrtinskog mosta kod elektrootpornih senzora uz pomoć ugrađenih otpornika, što je od posebnog značaja za predmetno istraživanje. Za statička ispitivanja i merenja, gde se traži visoka rezolucija, dugotrajna stabilnost, i imunost sistema na smetnje i šum, kao kod procesa vaganja ili kalibracije ostvaruje se klasa tačnosti do 0,0025%. Dinamička merenja moguće je vršiti frekvencijom do 50 kHz. Uređaj vrši kompletnu kompenzaciju uticaja kablova i temperature na osetljivost i drift. Kako je „*MGCplus*“ modularan i proširiv sistem, moguće je izabrati tačno ono što je potrebno za aplikaciju, uz mogućnost nadogradnje u budućnosti. Instrument je moguće u potpunosti kontrolisati preko računara, međutim

postoji mogućnost i autonomnog rada i podešavanja preko kontrolnog displeja sa tastaturom.

Za ova istraživanja korišćena su dva sistema “MGCplus” (slika 3.13) koji su u tom trenutku nadograđena u skladu sa zahtevima određene faze eksperimenta. Tačnije, jedan sistem je imao mogućnost istovremenog očitavanja sa 48 kanala (zavrtnjeva), a drugi sa 88 kanala. Kalibracija zavrtnjeva po fazama vršena je na onom sistemu kojim su kasnije praćeni ugradnja, inicijalni i kratkoročni gubici sile prednapreznja, uz upotrebu istih kanala u toku celog postupka ispitivanja. Široki spektar mogućnosti primene (koristi se za više istraživanja istovremeno) kao i velika cena ovog mernog sistema, svakako su bila ograničavajući faktor za njegovu primenu, pa je ona svedena na praćenje sile prednapreznja u zavrtnjevima u prve 4 odnosno 8 nedelja nakon ugradnje (tabela 3.11). Na ovaj način za merenje sile prednapreznja u fazi njene najbrže i najveće promene primenjen je adekvatan merni sistem.



a)



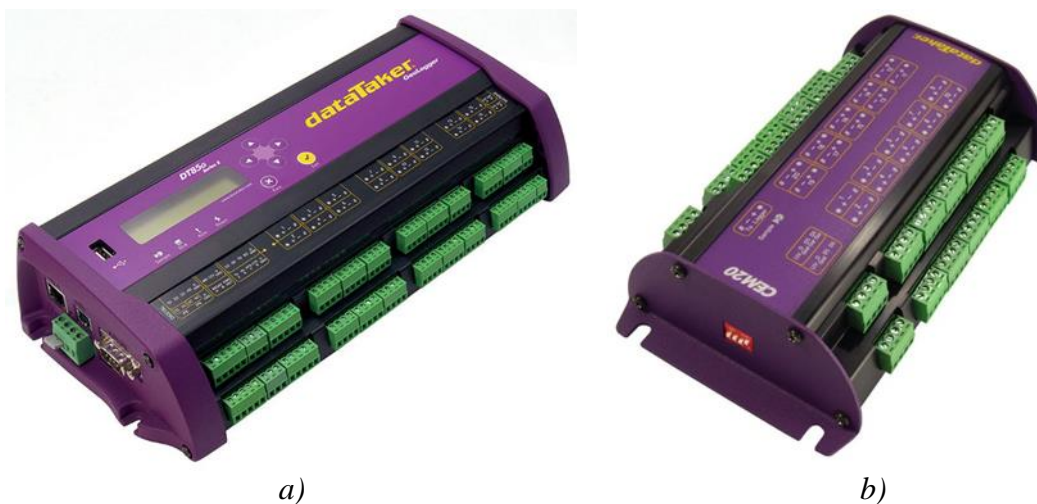
b)

Slika 3.13: a) Merno-akvizicioni sistem MGCplus, b) primena za predmetno istraživanje

Analogno digitalni A/D konverteri, kakav je korišćeni loger, služe za konverziju analognog napona ili struje u digitalni ekvivalent. Analogno-digitalni (A/D) konvertori konvertuju kontinualni analogni signal u digitalno kodovan broj. Osnovna dinamička karakteristika A/D konvertera je vreme konverzije, koje predstavlja vreme koje protekne od trenutka konverzije do pojave digitalnog ekvivalenta na izlazu A/D konvertora. Simultano čitanje više analognih kanala nije moguće. Da bi se postiglo ekonomično korišćenje komponenti merno-upravljačkog sistema, jedan A/D konverter koristi se često za analogno-digitalnu konverziju signala iz više izvora. Analogni multiplexer služi da omogući povezivanje više ulaznih signala na jedan A/D konvertor.

Na osnovu digitalnog koda koji primi, multiplekser selektuje jedan od priključenih ulaznih signala i povezuje ga sa izlazom [61].

Loger „DT85g“ (slika 3.14a) koristi se za merenje i praćenje širokog spektra vrednosti i veličina u realnom vremenu. Podržava veliki broj senzora, kompaktne je veličine i oblika sa veoma malom potrošnjom energije, što ga čini vrlo fleksibilnim i praktičnim za upotrebu. „DT85g“ ima 16 analognih ulaznih kanala sa „4-wire“ konekcijom koja omogućava merenje napona, struje, otpornosti i frekvencije [62]. Rezultati merenja mogu se očitavati u realnom vremenu ili se prikupljati na memorijskoj kartici logera. Moguće je memorisati do 10.000.000 podataka koji se preuzimaju preko postojećeg USB priključka [63]. Napajanje se vrši direktno preko elektro mreže (sastavni deo je adapter). Neophodno je obezbediti rezervno napajanje za slučaj nestanka struje (UPS, baterija, akumulator ili slično). Loger ima mogućnost da čita $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i pun Vitstonov most (*Wheatstone bridge*). Analogni ulazni kanali logera su multipleksirani, pa u kombinaciji sa „dataTaker“ multiplekserima „CEM20“ (slika 3.14b) ovaj sistem može da vrši očitavanje sa ukupno 320 mernih mesta. Napajanje multipleksera vrši se direktno sa logera, preko izlaza od 12V, pa nije potrebno obezbediti poseban izvor napajanja za CEM20



Slika 3.14: a) Loger DT85g, b) multiplekser CEM20

Za sprovođenje eksperimenta primenjeno je ukupno 6 multipleksera, uz pomoć kojih se vršilo očitavanje vrednosti sa 108 zavrtnjeva. Maksimalna frekvencija čitanja rezultata iznosi 12Hz i može se podešavati i menjati u toku ispitivanja, pri čemu se ova frekvencija deli sa brojem mernih mesta. Iz pomenutog razloga ovaj sistem nije adekvatan za praćenje dinamičkih promena, a u ovom istraživanju korišćen je za

praćenje dugotrajnih gubitaka sile prednaprezanja (tabela 3.11). Zbog variranja napona kojem bi loger bio izložen za slučaj direktnog napajanja električnom energijom sa mreže, električna energija potrebna za rad sistema obezbeđuje se sa akumulatora koji se periodično dopunjava.

Tabela 3.11: Pregled primenjenih merno-akvizicionih sistema po fazama eksperimenta

Faza ispitivanja	Broj zavrtnjeva	Aktivnost	Dužina trajanja aktivnosti	Učestalost merenja [Hz]	Merno-akvizicioni sistem	
					HBM MGCplus	Loger DT85g + CEM20
Faza I	36	Kalibracija zavrtnjeva	10 min po zavrtnju	5	+	
		Ugradnja zavrtnjeva	10 h	10	+	
		Test relaksacije	4 nedelje	1	+	
		Test relaksacije	4 meseca	1/60		+
		Test relaksacije	do isteka 2 godine	1/120		+
	18	Kalibracija zavrtnjeva	10 min po zavrtnju	5	+	
		Ugradnja zavrtnjeva	10 h	10	+	
		Test relaksacije	4 nedelje	1	+	
		Dinamičko ispitivanje	55 h 33 min po uzorku	1	+	
Faza II	36	Kalibracija zavrtnjeva	10 min po zavrtnju	5	+	
		Ugradnja zavrtnjeva	10 h	10	+	
		Test relaksacije	8 nedelja	1	+	
		Test relaksacije	3 meseca	1/60		+
		Test relaksacije	do isteka 2 godine	1/120		+
	36	Kalibracija zavrtnjeva	10 min po zavrtnju	5	+	
		Ugradnja zavrtnjeva	10 h	10	+	
		Test relaksacije	8 nedelja	1	+	
		Test relaksacije	3 meseca	1/60		+
		Test relaksacije	do isteka 2 godine	1/120		+

3.7 Postupak formiranja uzoraka

Postupak formiranja uzoraka sproveden je u nekoliko faza. Na prvom mestu je izrada čeličnih ploča i njihova antikoroziorna zaštita. Nakon perioda sušenja antikorozijske zaštite neophodno je odrediti njenu debljinu na svakoj strani svake od čeličnih ploča. Uporedo sa ovim sprovedena je ugradnja mernih traka u zavrtneve i njihova kalibracija, nakon čega je pristupljeno formiranju uzoraka. Svaka od faza biće detaljno opisana jer njihovo pravilno sprovođenje ima veliki uticaj na tačnost rezultata eksperimentalnog istraživanja.

3.7.1 Izrada čeličnih ploča i njihova antikoroziorna zaštita

Sečenje, bušenje, peskarenje i antikoroziorna zaštita čeličnih ploča izvršeni su u „Profitnom centru Batajnica“ firme „Mostogradnja“ iz Beograda.

Sve ploče za uzorke izrađene su od čelika klase čvrstoće S355JRG2. Peskarenje čeličnih ploča izvršeno je u automatskoj peskari primenom kvarcnog peska kao abrazivnog sredstva, i to do stepena čistoće Sa21/2, u svemu prema odredbama standarda ISO 8501-1 [37]. Nakon sprovedenog čišćenja mlazom abraziva očišćene površine se otprašuju mlazom komprimovanog vazduha i ručno uz pomoć četki, čime je izvršena priprema za nanošenje antikorozijske zaštite (slika 3.15).



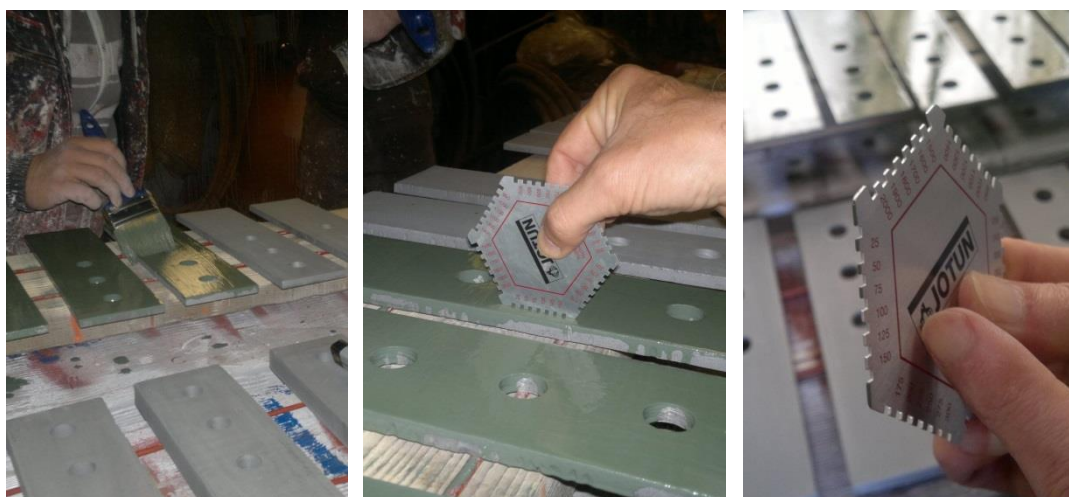
Slika 3.15: Čišćenje čeličnih ploča nakon peskarenja

U toku nanošenja cink-silikatnog premaza neophodno je da temperature podloge bude najmanje 5 °C, ali i najmanje 3 °C iznad tačke rošenja vazduha. U načelu, za sazrevanje cink-silikatnih premaza potrebna je vlaga. Pri niskoj relativnoj vlažnosti vazduha, sazrevanje se poboljšava lakim prskanjem filma premaza svežom vodom ili veštačkim vlaženjem okolne atmosfere (slika 3.16).



Slika 3.16: Prskanje filma svežom vodom u uslovima smanjene vlažnosti

U prvom pokušaju premaz je nanošen uz pomoć pištolja i kompresora, u jednom prolazu, što se ispostavilo pogrešno iz dva razloga. Prvo, dobijena debljina suvog premaza iznosila je između 200 μm i 300 μm , a drugo, nije bilo moguće sprečiti kapljanje premaza pri izlasku iz kompresora, što je na čeličnim pločama dovelo do formiranja zona sa njegovom debljinom od nekoliko milimetara. Zbog svega navedenog, postupak peskarenja je ponovljen, a premaz je nanet četkom, u dva sloja, što je dalo zadovoljavajuće rezultate. Da bi se ostvarila željena debljina u suvom stanju, vršeno je merenje debljine premaza u vlažnom stanju (odmah nakon nanošenja) uz pomoć češlja za merenje debljine vlažnih premaza (slika 3.17).



Slika 3.17: Merenje debljine premaza u vlažnom stanju

Svaka od tehnika nanošenja premaza, bilo kompresorom ili ručno, zahteva kontinuirano mešanje, kako bi se izbeglo taloženje teških čestica cinka koje se veoma brzo odvija. U trenutku nanošenja svakog od dva sloja antikorozijske zaštite atmosferski

uslovi (tabela 3.12) bilu su u skladu sa uslovima propisanim od strane proizvođača, što je ustanovljeno merenjem na licu mesta i uneto u zapisnik.

Tabela 3.12: Atmosferski uslovi u trenutku nanošenja cink-silikatnog premaza

Sloj	Datum	Temperatura vazduha [°C]	Temperatura podloge [°C]	Tačka rose [°C]	Relativna vlažnost [%]
Faza I eksperimentalnog istraživanja					
Prvi	13.03.2013.	16,7	16,5	6,7	51,4
Drugi	14.03.2013.	10,3	11,8	8,8	87,0
Faza II eksperimentalnog istraživanja					
Prvi	21.11.2013.	14,7	12,1	11,2	82,5
Drugi	22.11.2013.	17,1	16,0	8,5	57,5

Proizvođač propisuje minimalne, maksimalne i optimalne debljine premaza (tabela 3.13). Posebno se naglašava da za debljine filma veće od 120 µm postoji velika mogućnost da film “ispuca”.

Tabela 3.13: Propisane debljine filma za premaz u vlažnom i suvom stanju [31]

Stanje premaza	Debljina filma [µm]		
	Minimalno	Maksimalno	Optimalno
Suv	50	90	75
Vlažan	75	135	115

Nakon nanošenja antikorozijske zaštite i njenog sušenja izvršeno je numerisanje svake strane svake od ploča i merenje debljine suvog filma. Ploče su numerisane tako da prvi deo oznake predstavlja debljinu ploče, drugi deo redni broj ploče i na kraju se nalazi oznaka strane ploče “a” ili “b”. Prvo merenje debljine nanetog filma izvršeno je na licu mesta u firmi “Mostogradnja”. U fazi I eksperimenta uz pomoć elkometra “Easy-check Fe-S” [64], a u fazi II uz pomoć elkometra “Elcometer 456” [65]. U pitanju su elkometri prilagođeni određivanju debljine premaza na gradilištu. Ovo merenje neophodno je kako bi se uverili da se debljina nanete antikorozijske zaštite nalazi u prihvatljivim granicama, s obzirom na prvi pokušaj koji nije dao željene rezultate. Nakon transporta čeličnih ploča u laboratoriju, izvršeno je drugo merenje debljine premaza, u laboratoriji Tehnološko metalurškog fakulteta i u Laboratoriji za beton i reologiju Građevinskog fakulteta u Beogradu. U obe faze eksperimenta za merenje je korišćen laboratorijski elkometar „Dualscope MPOR“ proizvođača “Fisher” (slika 3.18) [66]. Ovaj elkometar zahteva baždarenje pre svake prve upotrebe na novom materijalu, a ono se vrši uz pomoć čelične ploče na koju nije nanet premaz. Nakon baždarenja elkometra pristupilo se određivanju debljine suvog premaza.



Slika 3.18: Laboratorijski elkometar proizvođača „Fischer“ i raspored mernih mesta za određivanje debljine premaza

Debljina suvog premaza određena je kao srednja vrednost merenja u osam referentnih tačaka (slika 3.18), za obe strane svake od ploča. Dobijene su debljine premaza u propisanim granicama, između 50 μm i 100 μm (tabela 3.14, Tabela 3.15, Tabela 3.16 i tabela 3.17). U fazi I eksperimenta na uzorke je nanet premaz ukupne debljine između 360 μm i 420 μm , dok su uzorci faze II zaštićeni premazom ukupne debljine između 290 μm i 350 μm .

Tabela 3.14: Debljina premaza na uzorcima sa HBT zavrtjnjevima faze I eksperimenta

Oznaka uzorka	Oznaka ploče	Debljina AKZ na strani a [μm]	Debljina AKZ na strani b [μm]	Ukupno AKZ na ploči [μm]	Ukupno AKZ na uzorku [μm]
H2	5.7	60.8	62.9	123.7	381
	5.8	63.5	55.4	118.9	
	8.4	64.9	73.1	138.0	
H3	5.1	63.8	61.6	125.4	422
	5.2	69.5	75.9	145.4	
	8.1	75.5	75.8	151.3	
H5	10.7	66.6	61.4	128.0	361
	10.8	60.4	48.1	108.5	
	15.7	58.4	66.5	124.9	
H6	10.3	59.0	63.0	122.0	373
	10.4	64.4	57.5	121.9	
	15.2	62.0	66.9	128.9	
H8	15.11	62.8	70.5	133.3	395
	15.12	60.6	63.9	124.5	
	25.4	63.4	73.9	137.3	
H9	15.3	72.5	63.0	135.5	403
	15.4	75.5	60.6	136.1	
	25.1	73.6	57.3	130.9	

Tabela 3.15: Debljina premaza na uzorcima sa HBT zavtnjevima faze II eksperimenta

Oznaka uzorka	Oznaka ploče	Debljina AKZ na strani <i>a</i> [μm]	Debljina AKZ na strani <i>b</i> [μm]	Ukupno AKZ na ploči [μm]	Ukupno AKZ na uzorku [μm]
H12	5.9	47.0	91.9	138.9	347
	5.10	48.3	52.0	100.3	
	8.5	55.4	52.3	107.7	
H13	5.11	51.5	50.3	101.8	332
	5.12	68.8	49.5	118.3	
	8.6	53.5	58.1	111.6	
H16	10.9	58.9	43.3	102.2	329
	10.10	47.1	46.8	93.9	
	15.13	72.5	60.8	133.3	
H17	10.11	49.3	56.1	105.4	340
	10.12	56.6	52.9	109.5	
	15.14	59.9	65.6	125.5	
H20	15.15	59.0	44.8	103.8	334
	15.16	66.3	50.0	116.3	
	25.5	53.8	60.5	114.3	
H21	15.17	50.5	57.3	107.8	315
	15.18	41.5	52.5	94.0	
	25.6	53.8	59.8	113.6	

Tabela 3.16: Debljina premaza na uzorcima sa HV zavtnjevima faze I eksperimenta

Oznaka uzorka	Oznaka ploče	Debljina AKZ na strani <i>a</i> [μm]	Debljina AKZ na strani <i>b</i> [μm]	Ukupno AKZ na ploči [μm]	Ukupno AKZ na uzorku [μm]
D2	5.5	60.8	62.0	122.8	394
	5.6	73.9	59.8	133.7	
	8.3	66.1	71.6	137.7	
D3	5.3	65.3	72.9	138.2	432
	5.4	71.5	80.4	151.9	
	8.2	70.9	70.6	141.5	
D5	10.1	51.4	60.5	111.9	369
	10.6	57.8	67.6	125.4	
	15.5	63.8	67.8	131.6	
D6	10.2	64.3	62.9	127.2	383
	10.5	63.9	76.1	140.0	
	15.1	60.5	55.1	115.6	
D8	15.9	58.6	73.9	132.5	368
	15.1	60.5	55.1	115.6	
	25.3	66.9	53.1	120.0	
D9	15.6	95.1	64.8	159.9	400
	15.8	68.0	57.5	125.5	
	25.2	60.3	54.3	114.6	

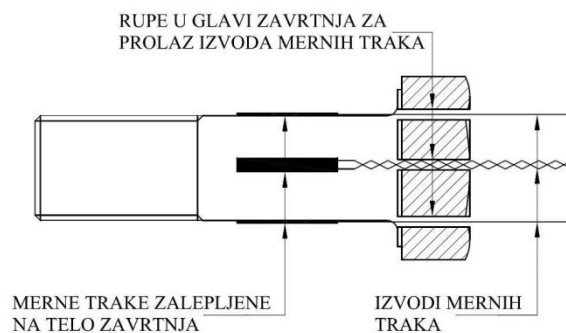
Tabela 3.17: Debljina premaza na uzorcima sa HV zavrtnevim fazama II eksperimenta

Oznaka uzorka	Oznaka ploče	Debljina AKZ na strani a [μm]	Debljina AKZ na strani b [μm]	Ukupno AKZ na ploči [μm]	Ukupno AKZ na uzorku [μm]
D12	5.13	50.3	64.6	114.9	294
	5.14	46.8	38.8	85.6	
	8.7	46.4	47.5	93.9	
D13	5.15	63.8	43.3	107.1	317
	5.16	56.5	47.9	104.4	
	8.8	50.9	54.1	105.0	
D16	10.13	50.0	45.8	95.8	305
	10.14	60.5	60.5	121.0	
	15.19	43.6	44.3	87.9	
D17	10.15	62.5	50.4	112.9	338
	10.16	57.8	59.8	117.6	
	15.20	59.6	48.0	107.6	
D20	15.21	54.9	66.0	120.9	343
	15.22	56.6	63.3	119.9	
	25.7	40.9	61.3	102.2	
D21	15.23	58.9	52.6	111.5	341
	15.24	53.6	71.3	124.9	
	25.8	48.6	55.8	104.4	

3.7.2 Priprema zavrtneva i ugradnja mernih traka

Merenje sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnevim uz pomoć mernih traka može se izvesti na dva načina. Merne trake se mogu lepiti spolja, na telo zavrtnja, i to na deo tela koji se nalazi u zoni spoja, ili se mogu ugraditi u rupu izbušenu u osi zavrtnja.

U prvom slučaju neophodno je zalepiti najmanje dve merne trake (idealno četiri) na telo zavrtnja i obezbediti način da se izvodi mernih traka dovedu do merne opreme. U tom slučaju najčešće se na glavi zavrtnja buše dve rupe kroz koje se izvodi sa mernih traka sprovode izvan spoja (slika 3.19).



Slika 3.19: Lepljenje mernih traka na telo zavrtnja

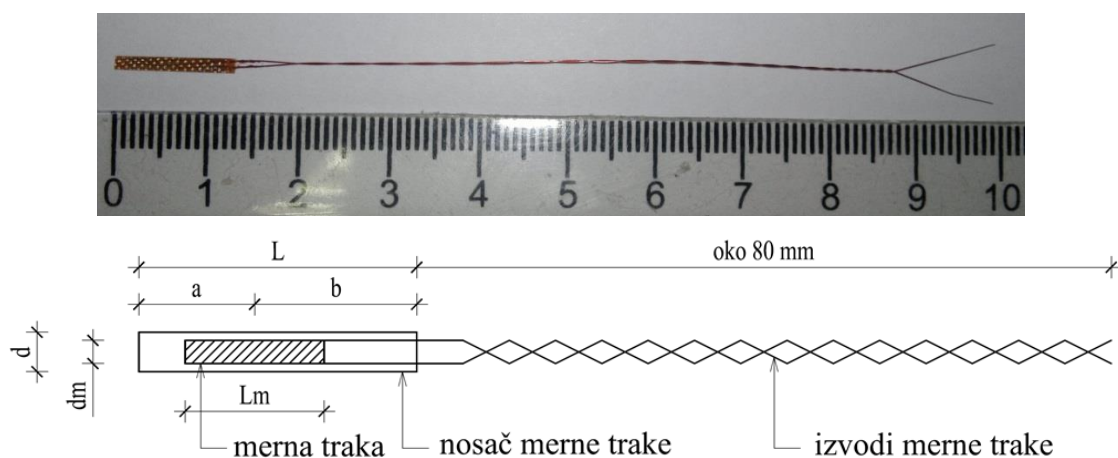
Problem se javlja u slučaju spojeva male debljine zbog ograničenog prostora na delu zavrtnja na koji treba zalepiti mernu traku. Takođe, u slučaju ispitivanja smičućih spojeva i nakon proklizavanja veze, postoji velika mogućnost da dođe do oštećenja mernih traka usled njihovog nagnječenja pri naleganju tela zavrtnja na okolni osnovni materijal.

Zbog svega navedenog, u ovom eksperimentalnom istraživanju vrednost i promena sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima mereni su uz pomoć mernih traka tipa BTM-6C (tabela 3.18) proizvođača „Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.“ iz Japana, koje su ugrađene u telo zavrtnja. Ove merne trake mogu se koristiti u opsegu temperature od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, a njihov ukupni merni opseg je $5000 \times 10^{-6}\text{ }\mu\text{m/m}$.

Tabela 3.18: Karakteristike primenjene merne trake BTM-6C prema [67]

Tip merne trake	Merna traka [mm]		Nosaoč merne trake [mm]		Centar merne trake [mm]		Otpor [Ω]	Prečnik rupe [mm]
	Dužina L_m	Širina d_m	Dužina L	Širina d	a	b		
BTM – 6C	6	1,0	12,0	1,7	5	7	120	$\text{Ø } 2,0$

Primena ovih traka moguća je samo u slučajevima kada gubitak površine poprečnog preseka zavrtnja, usled bušenja rupe za ugradnju merne trake, nije veći od 5%. Za zavrtnaj M20 (prečnik tela zavrtnja 20 mm) bušenje rupe prečnika $\text{Ø}2\text{ mm}$ predstavlja gubitak površine od tačno 1%, pa je, sa ovog aspekta, primena mernih traka BTM-6C potpuno opravdana. Instalacije merne trake izrađene su od bakarne žice koja ima poliuretansku izolaciju i čiji je prečnik $\text{Ø}0,14\text{ mm}$, a približna dužina 80 mm (slika 3.20).



Slika 3.20: Merna traka BTM-6C

3.7.2.1 Bušenje zavrtnjeva i priprema rupe za ugradnju merne trake

Merne trake ugrađuju se u rupu prečnika $\varnothing 2$ mm izbušene u osi zavrtnja. Nakon ugradnje merne trake, rastojanje između kraja nosača merne trake i dna rupe treba da bude 3–5 mm [67] (slika 3.21). Na primer, u slučaju kada se centar merne trake nalazi na 30 mm od vrha glave zavrtnja, dubina rupe koju treba izbušiti je $30 \text{ mm} + 5 \text{ mm} + (3 \text{ do } 5) \text{ mm} = 38 \text{ do } 40 \text{ mm}$.

Kako bi se prilikom ugradnje mernih traka one mogle tačno pozicionirati na određenu dubinu, na HV zavrtnjevima prvo je izvršena površinska obrada glave zavrtnja kojom je uklonjen logo proizvođača, a površina glave zavrtnja postala idealno ravna (slika 3.21). Ovakvom obrade glave zavrtnja svakako se povećava preciznost pri ugradnji mernih traka, ali je iskustvo pokazalo da se zahtevana preciznost može ostvariti i bez ove operacije. Postupak se završava bušenjem rupa u zavrtnjevima.



Slika 3.21: Zavrtnjevi sa izbušenim rupama za ugradnju merne trake i položaj merne trake u odnosu na dno rupe

Unutrašnjost rupe u koju se ugrađuje merna traka, pre ugradnje treba očistiti na sledeći način:

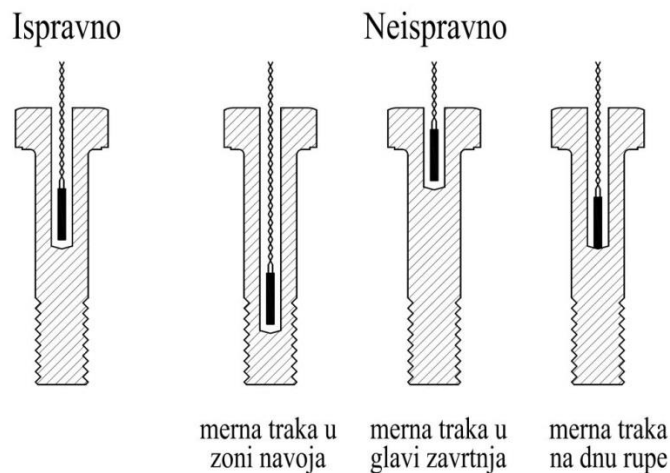
- čišćenje rupe rastvaračem (acetom i sl.) – s obzirom da se prilikom bušenja (ručnom bušilicom, ili na strugu) koristi emulzija koju je neophodno isprati rastvaračem, uz pomoć šprica. Ovim postupkom će se ukloniti i zaostala prašina ili metalni opiljci;
- brisanje rupe – temeljno čišćenje rupe vrši se uz pomoć tkanine natopljene rastvaračem i obmotane oko burgije. Postupak je neophodno ponavljati dok tkanina ne ostane čista i nakon upotrebe;

- uklanjanje rastvarača – preostali rastvarač uklanja se iz rupe uz pomoć čiste tkanine obmotane oko burgije.

Ukoliko ulje, prašina ili rastvarač ostanu u rupi, može doći do gubitka funkcije lepka. Takođe, neophodno je očistiti spoljašnjost zavrtnja i to glavu i telo zavrtnja. Mernu traku treba ugraditi odmah nakon čišćenja kako bi se izbeglo ponovno prljanje rupe ili formiranje filma usled oksidacije. U suprotnom neophodno je ponoviti postupak čišćenja neposredno pre ugradnje mernih traka.

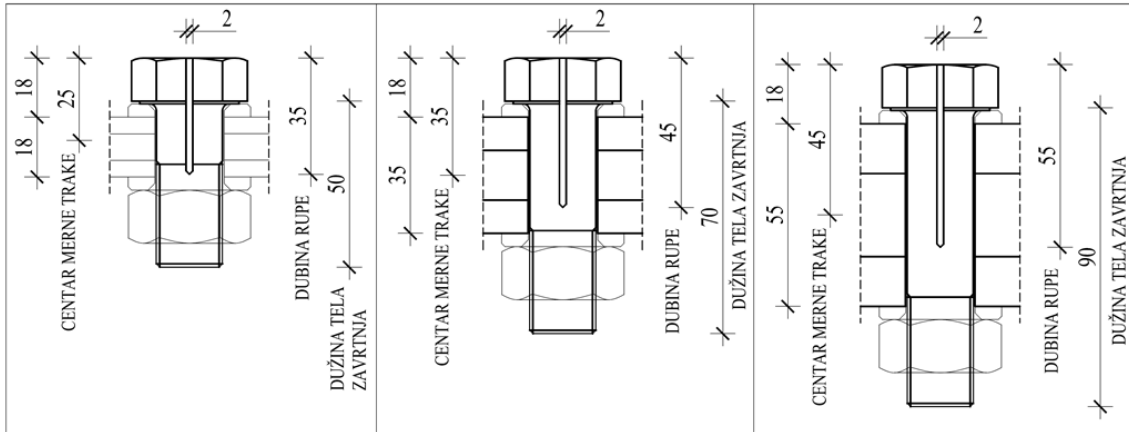
3.7.2.2 Ugradnja mernih traka i njihovo pravilno pozicioniranje

Što se tiče pravilnog pozicioniranja merne trake po dubini, treba je postaviti u zoni u kojoj je varijacija poprečnog preseka zavrtnja najmanja, odnosno u zonu tela zavrtnja u kojoj nema navoja. Merna traka koja se ugradi u deo zavrtnja na kome se nalazi navoj ili u glavu zavrtnja, izložena je uticaju širine poprečnog preseka i može izgubiti svoju funkciju delimično ili u potpunosti (slika 3.22). Ovaj zahtev nije moguće ostvariti kod „Huck BobTail“ zavrtnjeva, s obzirom da se kod njih navoj pruža gotovo celom dužinom tela zavrtnja. U tom slučaju potrebno je da se centar merne trake, nakon ugradnje, nalazi u sredini stezne zone (u sredini debljine paketa limova koji se pritežu).



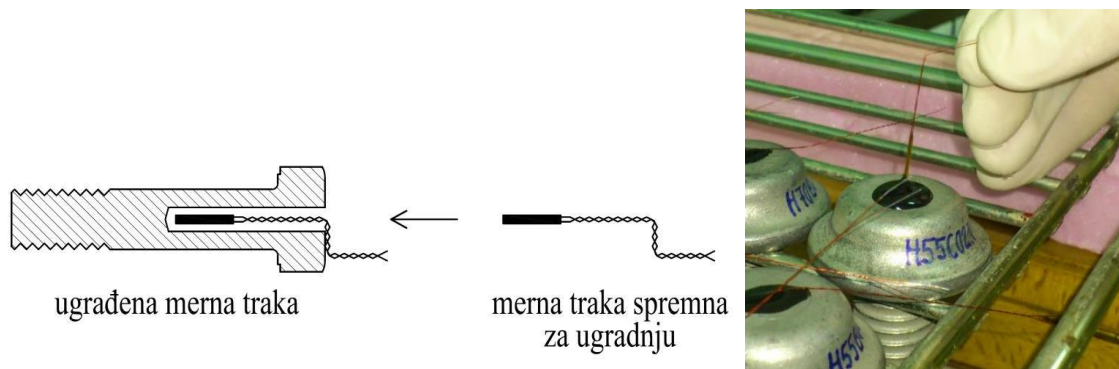
Slika 3.22: Pozicioniranje merne trake po dubini rupe

Za svaku dužinu i tip zavrtnja koji su korišćeni u ovom eksperimentalnom istraživanju definisan je tačan položaj merne trake i dubina rupe koje treba izbušiti uvažavajući sva navedena pravila (slika 3.23). Minimalno odstupanje od idealnog položaja merne trake rezultat je težnje da se izvrši unificiranje dubina rupe.



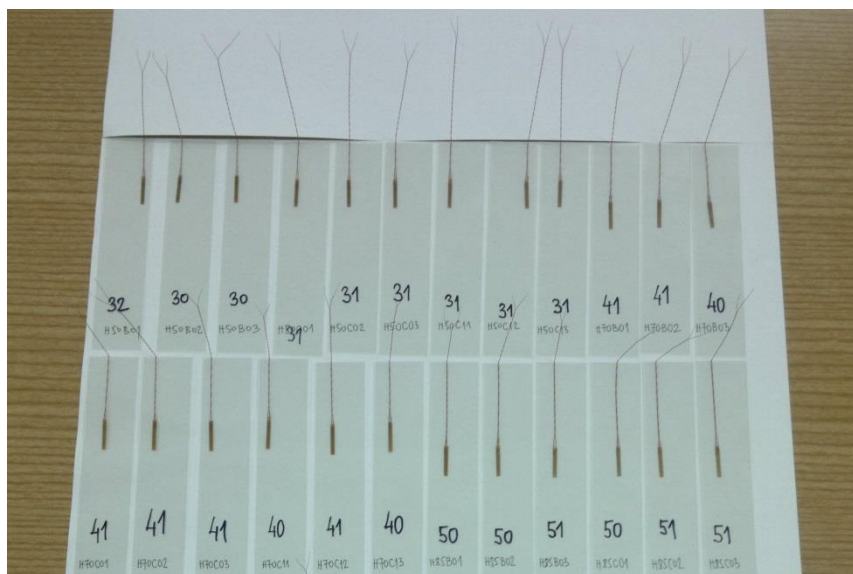
Slika 3.23: Pozicioniranje mernih traka u HV zavrtnjevima dužine 50, 70 i 90 mm

Najefikasniji način za ugradnju merne trake na željeno mesto je da se nosač merne trake obeleži prema željenom položaju merne trake. Na obeleženim mestima nosač merne trake previja se pod pravim uglom, vodeći računa da se ne ošteti izolacioni materijal, a tako dobijeni oblik merne trake osigurava da će merna traka biti ugrađena na željeno mesto (slika 3.24).



Slika 3.24: Previjanje instalacije merne trake radi precizne ugradnje

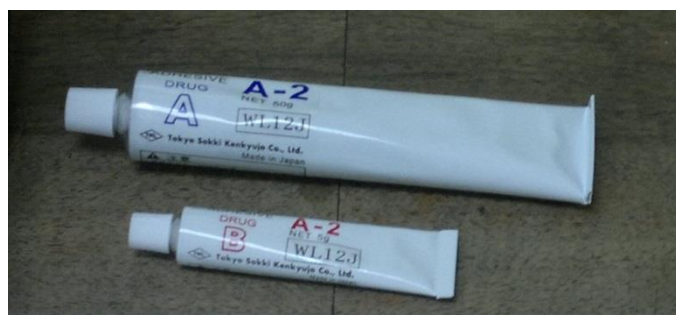
Kod zavrtnjeva koji su bušeni stubnom stonom bušilicom (poluautomatski) ostvarena dubina rupe u određenom broju slučajeva odstupa od željene vrednosti i to najviše ± 2 mm. Zbog toga je pre ugradnje mernih traka izmerena dubina rupe u svakom zavrtnju, a nakon toga je, vodeći računa o potrebnom rastojanju između merne trake i dna rupe, izvršeno previjanje instalacija mernih traka za svaki zavrtanj posebno (slika 3.25).



Slika 3.25: Merne trake pripremljene za ugradnju

3.7.2.3 Pripremanje i ugradnja adhezionog sredstva

Adheziono sredstvo koje se koristi za ugradnju mernih traka BTM-6C nosi proizvođačku oznaku A-2 [68]. U pitanju je dvokomponentni lepak (slika 3.26) koji se sastoji se od komponente A (glavni činilac) i komponente B (očvršćivač). Ove komponente mešaju se u masenom odnosu A:B = 1:10 u količini koja je potrebna za ugradnju mernih traka.



Slika 3.26: Adheziono sredstvo A-2 proizvođača „Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.“

Originalno pakovanje, prema proizvođačkoj deklaraciji, sastoji se od 5 g komponente A i 50 g komponente B. S obzirom da se ugradnja mernih traka vrši u fazama, neophodno je komponente iz jednog pakovanja koristiti u više navrata. Ovo je moguće upotrebom precizne elektronske vage preciznosti 0,1 g (slika 3.27). Na taj način postignuta je racionalna potrošnja lepka. Iskustvo korišćenja ovog lepka pokazalo je da se upotrebom celokupnog sadržaja obe komponente odjednom, ne dobija željeni maseni odnos, jer se ispostavilo da je ukupan sadržaj komponente A bio 44,7 g, a komponente B 4,8 g.



Slika 3.27: Primena digitalne vage i ručnog fena u postupku pripreme lepka

Komponente je neophodno dobro pomešati, najbolje na metalnoj špatuli, ili u pogodnoj posudi. Ako je viskozitet komponenti veliki da ih nije moguće dobro pomešati, neophodno je izvršiti njihovo zagrevanje do temperature između 50 °C i 60 °C i temperaturu održavati 30 minuta. Takođe, ukoliko se u toku mešanja u smesi pojave mehurići vazduha, zagrevanje se nastavlja sve dok mehurići ne nestanu. Zagrevanje komponenti lepka u ovoj fazi najbolje je vršiti ručnim fenom (slika 3.27). Prema proizvođačkoj deklaraciji, rok za ugradnju lepka nakon mešanja komponenti „*pot life*“ je 2 – 3 sata. Međutim, iskustvo je pokazalo da već nakon nepunih 2 sata lepak počinje da vezuje. Pogrešno je u tom trenutku izlagati lepak temperaturi većoj od propisanih 60 °C, jer će se na taj način postupak očvršćavanja lepka samo ubrzati. Zbog svega navedenog, ispravno je ugradnju mernih traka vršiti u nekoliko faza (na primer po 25 zavrtnjeva) i na taj način sprečiti da ugradnja traje duže od 2 sata.

Pre same ugradnje neophodno je izvršiti predgrevanje zavrtnja i lepka. Zavrtnjeve i lepak potrebno je zagrejati na 50 – 60 °C i držati ih na toj temperaturi 30 min. Na ovaj način smanjuje se viskoznost lepka (što je neophodno da bi se merne trake mogle ugraditi) i obezbeđuje da se viskoznost ne poveća u trenutku kontakta lepka i zavrtnja (zavrtanj je takođe zagrejan). Da bi se ostvario ovaj zahtev korišćen je laboratorijski rešo i dve temperaturne sonde (slika 3.28), jedna koja je kontrolisala temperaturu u zavrtnju (postavljena u rupu za mernu traku), i druga koja je kontrolisala temperaturu ploče rešoa.



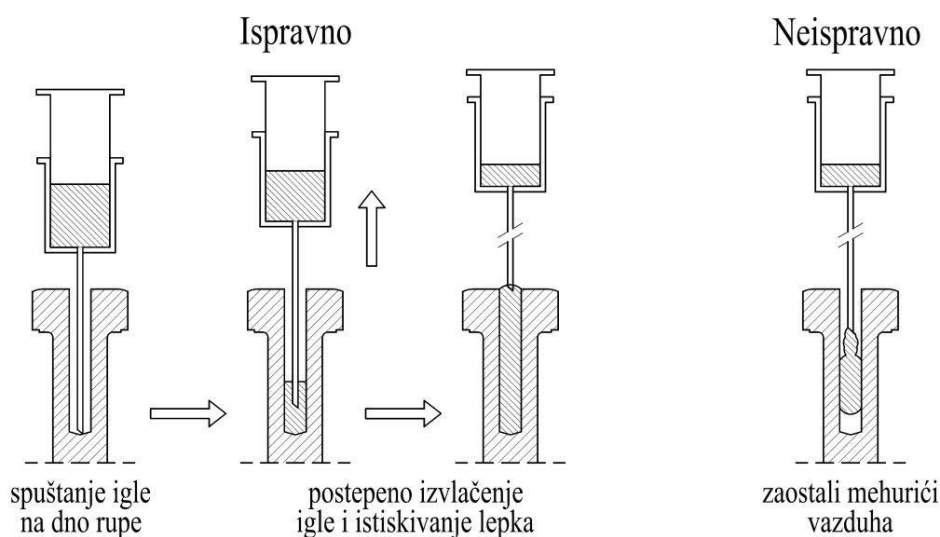
Slika 3.28: Predgrevanje zavrtnjeva pre ugradnje lepka i mernih traka

Lepak se može ugraditi u zavrtnj na dva načina:

- uz pomoć šprica i igle i
- uz pomoć vakuum pumpe.

Prilikom sipanja lepka u rupu u telu zavrtnja uz pomoć šprica i igle treba se pridržavati sledećih koraka (slika 3.29):

- uneti pripremljeni lepak u špic,
- postaviti špic tako da igla dotakne dno rupe za ugradnju merne trake,
- istisnuti lepak iz šprica i utisnuti ga u rupu od dna do vrha. Pri tome voditi računa da se ne naprave mehurići varduha tako što će se prilagoditi brzina izvlačenja igle i brzina istiskivanja lepka. Za ugradnju lepka za merne trake BTM-6C koristi se igla prečnika $\text{Ø}1,8$ mm.



Slika 3.29: Postupak ugradnje lepka u rupu u zavrtnju

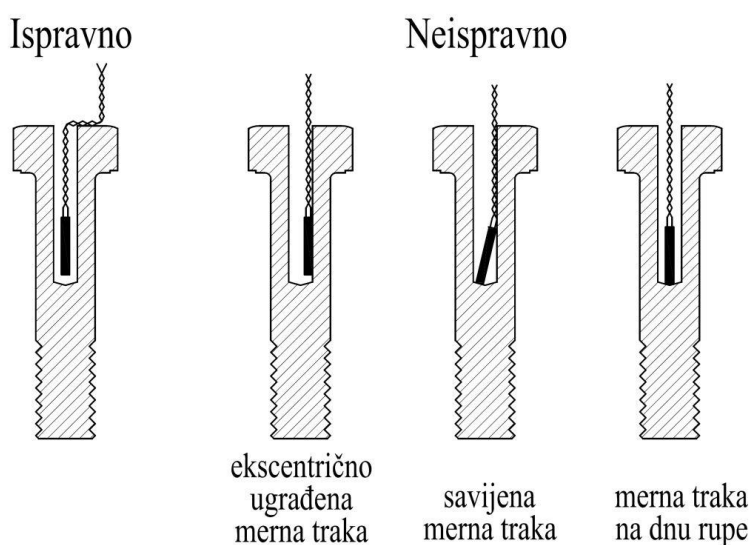


Slika 3.30: Probna ugradnja lepka u rupe izbušene u komadu pleksiglasa

Zbog veoma osetljivog postupka ugradnje lepka koji zahteva određenu brzinu injektiranja lepka i izvlačenja igle kako bi se izbegla pojava mehurića vazduha, pre ugradnje lepka u zavrtnjeve izvršena je probna ugradnja u ploču pleksiglasa. U komadu pleksiglasa debljine 5 mm izbušene su rupe prečnika 2 mm različitih dužina i u njih je izvršena ugradnja lepka (slika 3.30). Kako je korišćen providan pleksiglas zaostali mehurići vazduha bili su lako uočljivi.

3.7.2.4 Ugradnja mernih traka u zavrtnjeve i termički tretman lepka

Pre same ugradnje merne trake potrebno je na istu naneti pripremljeni lepak koji je ugrađen i u rupu u telu zavrtnja. Nakon toga ugraditi mernu traku u telo zavrtnja tako da previjeni deo nosača merne trake naleže na glavu zavrtnja. Merna traka treba da bude ugrađena vertikalno u centar rupe (slika 3.31). Ne sme se postaviti na dno rupe ili uz ivicu rupe, niti se sme presaviti. U toku ugradnje merne trake posebno se mora voditi računa da ne dođe do stvaranja mehurića vazduha u lepku. Nakon ugradnje treba omogućiti da lepak odstoji 12 sati na sobnoj temperaturi. U ovom periodu ne dolazi do potpunog očvršćavanja lepka.



Slika 3.31: Ugradnja merne trake u zavrtnj

Nakon 12h od ugradnje merne trake zavrtnj se unosi u električnu peć gde se drži na temperaturi od 140 °C u trajanju od 3 sata. Temperatura se postepeno povećava nakon unošenja zavrtnjeva u peć. Treba izbegavati brzu promenu temperature jer se mogu pojaviti mehurići vazduha, ili može doći do pucanja lepka. Za ovaj termički tretman zavrtnjeva korišćena je laboratorijska sušnica (slika 3.32). Brzina zagrevanja je bila oko 3 °C/min, što se pokazalo kao dovoljno sporo zagrevanje koje garantuje kvalitetno očvršćavanje lepka. Temperatura u sušnici kontrolisana je termometrom na sušnici, ali i primenom temperaturne sonde (slika 3.32).



Slika 3.32: Zavrtnjevi pripremljeni za termički tretman lepka u laboratorijskoj sušnici sa temperaturom kontrolisanom uz pomoć temperaturne sonde

Nakon završetka postupka očvršćavanja lepka termičkim tretmanom i nakon hlađenja zavrtnjeva, instalacija merne trake može se povezati sa mernom opremom kako bi se utvrdila ispravnost mernih traka (slika 3.33). Zavrtnjeve u kojima se nalaze merne trake koje ne ostvaruju specificirani otpor od 120 Ω ne treba dalje koristiti, jer je došlo do oštećenja merne trake. Svi zavrtnjevi korišćeni za ovo eksperimentalno istraživanje imali su, u ovoj fazi, ispravne merne trake.

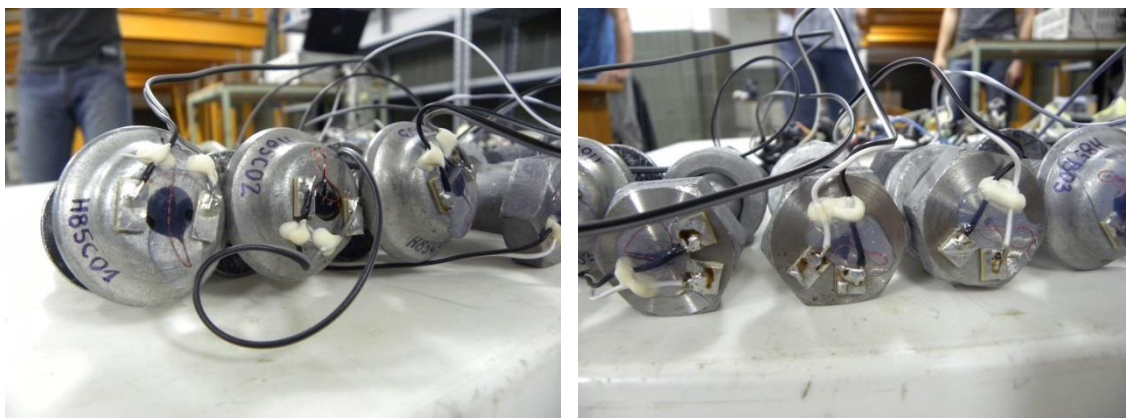


Slika 3.33: Kontrola otpornosti mernih traka nakon postupka očvršćavanja lepka

3.7.2.5 Kabliranje zavrtnjeva i ugradnja kompenzacionih mernih traka

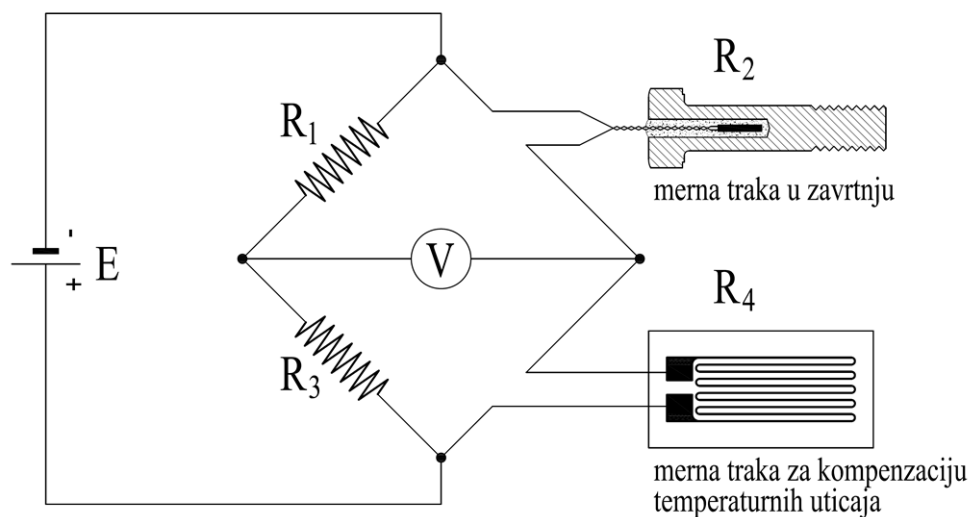
Veoma osetljiva instalacija (žičani izvod) mernih traka iziskuje da se obezbedi njena adekvatna zaštita od oštećenja i kidanja u toku ispitivanja. Zbog toga se na glavu zavrtnjeva lepe dve pločice pertineksa za koje se leme instalacije merne trake, ali i kablovi kojima se merna traka povezuje u merno akvizicioni sistem za očitavanja

dilatacije merne trake. Provodnici iz kabla i sa kompenzacione merne trake osiguravaju se dvokomponentnim lepkom, a sve zajedno se štiti silikonom (slika 3.34).



Slika 3.34: Zaštita žičanih izvoda mernih traka

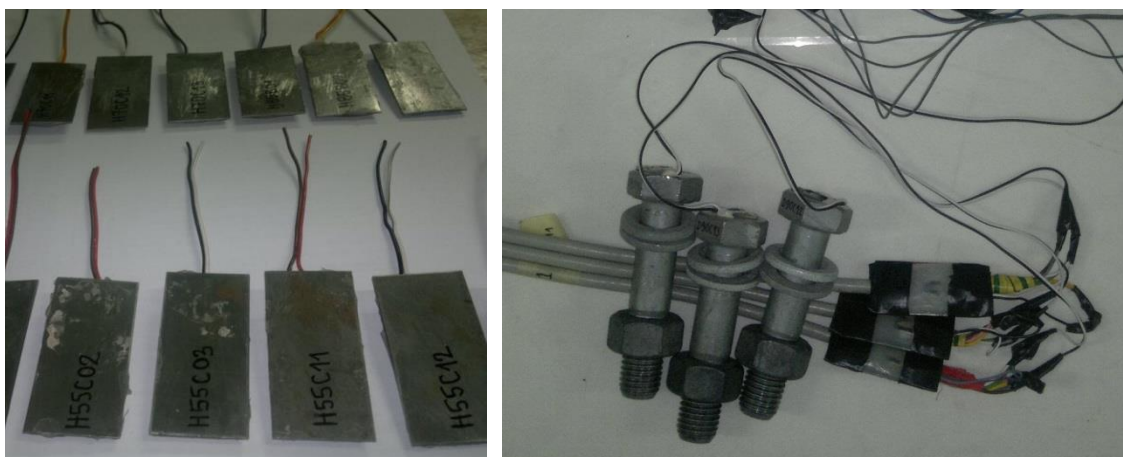
Merno akvizicioni sistemi (primenjeni u ovom istraživanju) koji se koriste za merenje dilatacije mernih traka u zavrtnjevima, podržavaju dopunu do „čtvrta mosta sa temperaturnom kompenzacijom“. Dakle, akvizicioni sistem u sebi sadrži dva otpornika poznate otpornosti R_1 i R_3 , pa je do punog Vitstonovog mosta neophodno uvezati u sistem još dva otpornika. Jedan je merna traka u zavrtnju R_2 , a drugi je kompenzaciona merna traka R_4 (slika 3.35).



Slika 3.35: Način vezivanja mernih traka u Vitstonov most

Za kompenzaciju temperaturnih uticaja razmatrana je mogućnost upotrebe kompenzacionih zavrtnjeva „dummy bolts“ u kojima bi se takođe nalazila merna traka i koji bi bili izloženi istim atmosferskim uslovima kao i ostali zavrtnjevi. U tom slučaju merna akvizicija bi uz pomoć jedne kompenzacije očitavala vrednosti u više zavrtnjeva povezujući pri svakom očitavanju drugu mernu traku u Vitstonov most. S obzirom da je

u pitanju dinamička promena dilatacije u prvih 10 min nakon ugradnje zavrtnja u uzorak, kao i u toku izlaganja uzoraka dinamičkom opterećenju, i da je neophodna učestalost merenja od 10Hz, korišćeni merno akvizicioni sistem nije u mogućnosti da vrši merenje na ovaj način. Zbog svega navedenog, za svaku mernu traku ugrađenu u zavrtnj obezbeđena je jedna kompenzaciona traka zalepljena na metalnu pločicu (slika 3.36).



Slika 3.36: Kompenzacione merne trake

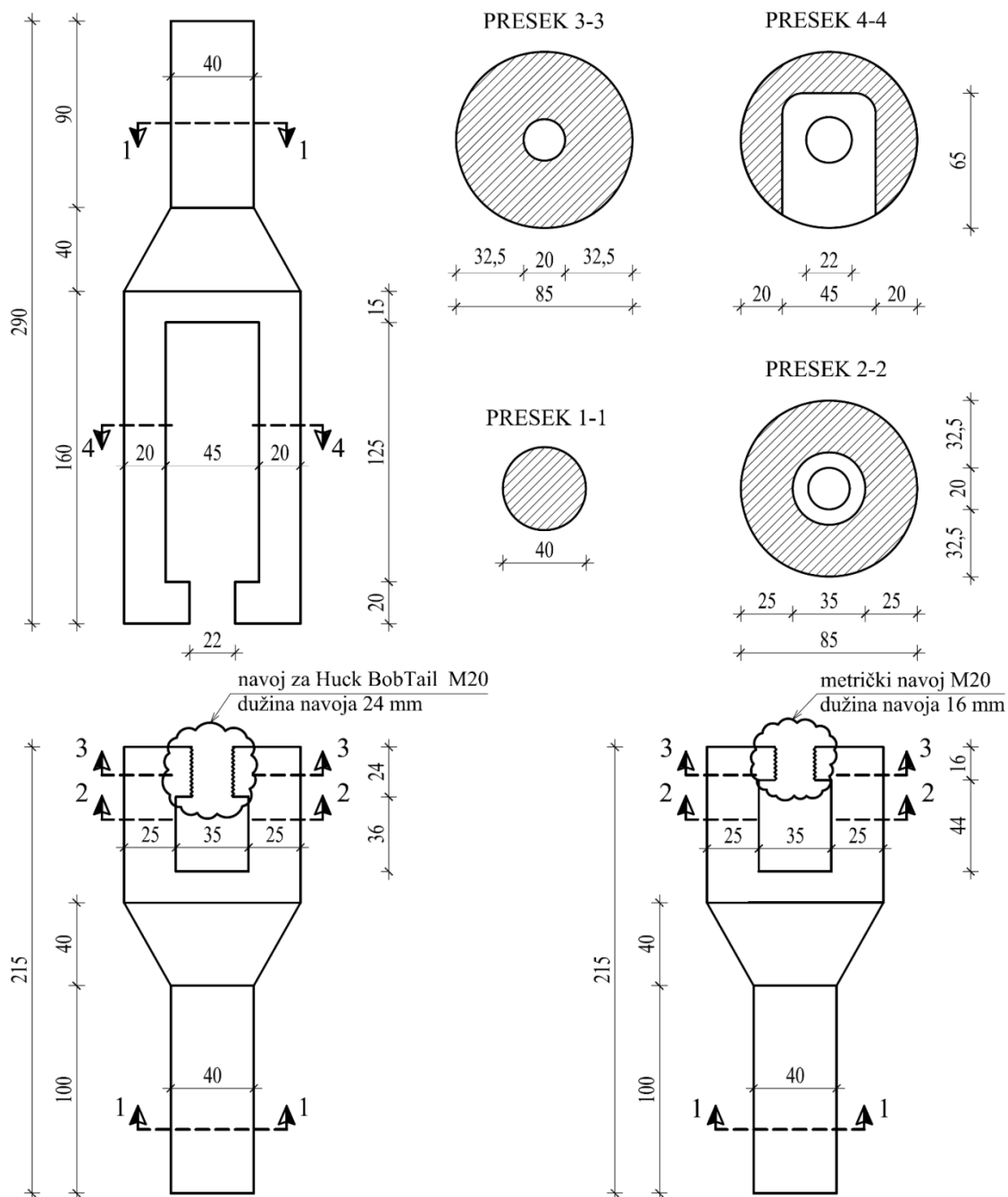
Svaki zavrtnj, pored navedenog, opremljen je i kablom dužine 5 m. Ova dužina određena je iz uslova mogućnosti sprovođenja svih faza istraživanja, ugradnje zavrtnjeva u uzorke, transporta uzoraka, dinamičkog ispitivanja uzoraka i njihovog skladištenja za dugotrajni monitoring.

3.7.3 Kalibracija zavrtnjeva

Postupak kalibracije mernih traka ugrađenih u telo zavrtnja jedan je od najvažnijih delova pripreme i sprovođenja eksperimenta. Naime, da bi se uopšte mogao sprovesti eksperiment neophodno je utvrditi koliki je odziv svake merne trake ugrađene u zavrtnj, odnosno kojoj veličini sile odgovara promena dužine merne trake od jedne mikrodilatacije (rezolucija merne trake je jedna mikrodilatacija). Pored ovoga, kalibracija služi da bi se proverila ispravnost merne trake. Kalibracija zavrtnjeva izvršena je u Laboratoriji za eksperimentalnu čvrstoću Vojnotehničkog instituta u Beogradu, na elektromehaničkoj kidalici „*Schenck*“ kapaciteta 400kN.

Za potrebe kalibracije zavrtnjeva korišćenih u ovom eksperimentalnom istraživanju konstruisan je i napravljen odgovarajući alat (slika 3.37), koji omogućava fiksiranje zavrtnja u kidalici i njegovo naprezanje prema definisanom spektru

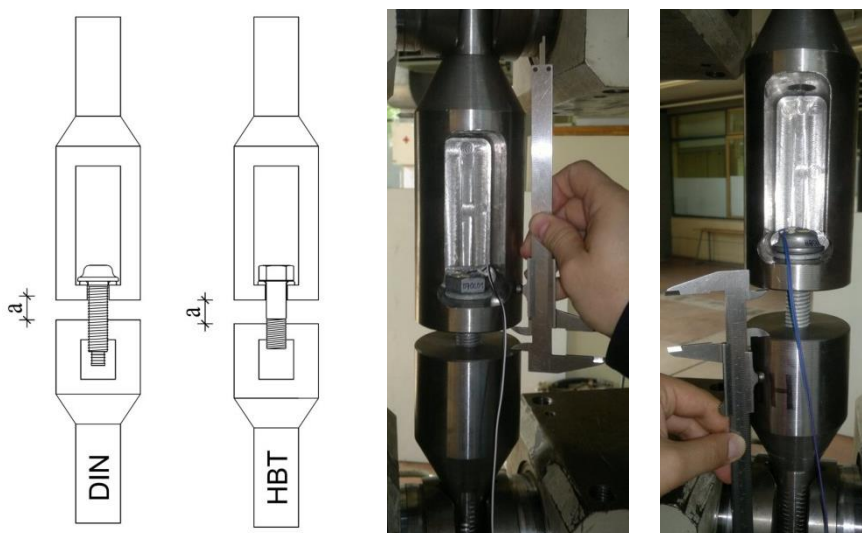
opterećenja. Alat je konstruisan na osnovu dimenzija čeljusti kidalice i na osnovu dimenzija zavrtnjeva koji se kalibrišu. Čeljust kidalice je prečnika $\text{Ø}40$ mm i dužine 100 mm.



Slika 3.37: Alat za kalibraciju zavrtnjeva

Alat se sastoji iz tri dela, jednog koji služi da pridržava glavu zavrtnja (univerzalan za sve zavrtnjeve) i po jednog za svaku vrstu zavrtnjeva (HV i HBT) koji u sebi ima odgovarajući navoj. Dužina navoja na alatu određena je tako da odgovara

dužini navoja na navrtkama (debljini navrtke). Takođe, za svaku vrstu i dužinu zavrtnja definisan je potreban zazor između alata za kalibraciju (tabela 3.19). Ovim zazorom se garantuje da će naprezanje zavrtnja u toku kalibracije u potpunosti odgovarati naprezanju nakon ugradnje u uzorak (na taj način ostvaruje se rastojanje između glave zavrtnja i alata sa navojem koji odgovara debljini uzoraka). Željeni položaj alata postiže se okretanjem alata sa navojem, a kontroliše pomičnim kljunastim merilom (slika 3.38).



Slika 3.38: Postavljanje alata za kalibraciju u željeni položaj

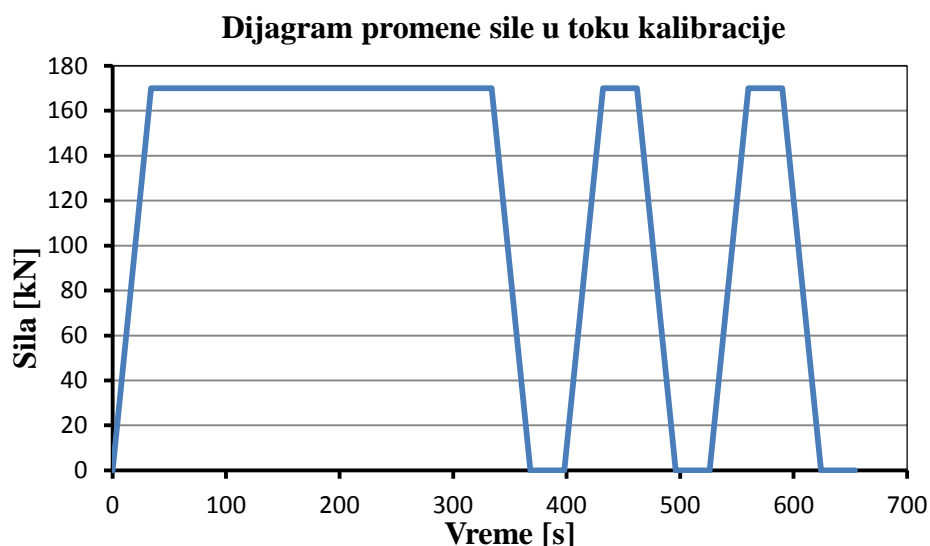
Iako se za „Huck BobTail“ zavrtnjeve ne koriste podloške, one su bile postavljane ispod glave zavrtnja u toku kalibracije, kako bi se omogućilo pravilno naleganje glave zavrtnja na alat i centrisanje.

Tabela 3.19: Rastojanje između alata nakon ugradnje u kidalicu

Oznaka zavrtnja	Rastojanje između alata a [mm]
D50	2
D70	19
D90	39
H55	0
H70	16
H85	36

Opterećenje je u toku kalibracije nanošeno postepeno, u najmanje tri ciklusa opterećenje – rasterećenje, pri čemu se nakon prvog ciklusa opterećenja sila zadržava na maksimalnoj vrednosti u dužini od oko 300 sekundi (slika 3.39). U svim ostalim slučajevima kada aplicirana sila na zavrtnj dostigne maksimalnu ili minimalnu vrednost, zadržava se konstantnom 30 sekundi. Zadržavanje sile na maksimalnoj

vrednosti, nakon prvog ciklusa opterećenja, omogućava kontrolu ispravnosti merne trake praćenjem stabilnosti rezultata koji se sa nje očitavaju. Ako dođe do „klizanja“ merne trake (smanjenje dilatacije pri konstantnoj sili) to je siguran pokazatelj da merna traka nije dobro ugrađena u zavrtnaj. Brzina opterećenja i rasterećenja je uvek ista 5 kN/s.



Slika 3.39: Dijagram promene sile na kidalici u toku kalibracije zavrtnjeva [48]

Vrednost maksimalne sile zatezanja kojoj se zavrtnjevi izlažu u postupku kalibracije određena je tako da bude približna vrednosti očekivane sile prednaprezanja, ali i da bude unificirana za sve zavrtnjeve. Bojazan da u toku kalibracije može doći do oštećenja navoja na zavrtnjevima [36], svakako je neopravdana.

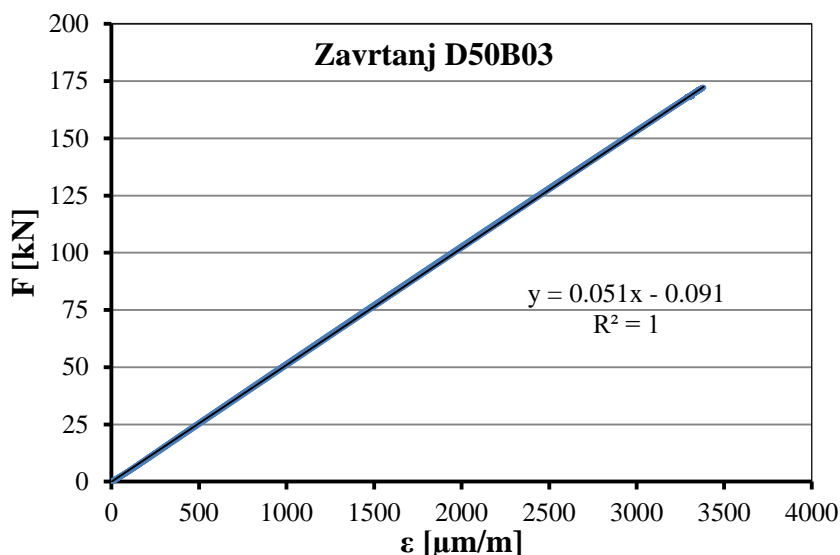
U toku celog procesa kalibracije očitavane su dilatacije sa merne trake frekvencijom od 5 Hz. Ukoliko je ovakvim postupkom dobijena linearna zavisnost između sile koja deluje na zavrtnaj i dilatacije merne trake (za ceo opseg sile i za sve cikluse opterećenje-rasterećenje), smatrano je da je merna traka ispravna i da je zavrtnaj spreman za ugradnju u uzorak.

3.7.3.1 Rezultati kalibracije zavrtnjeva

Izvršena je kalibracija 126 zavrtnjeva i na taj način definisana veza između dilatacije merne trake i sile u svakom od zavrtnjeva. Iz dobijenih rezultata određena je veza između sile i dilatacija primenom metode najmanjih kvadrata. Na taj način ponašanje svakog zavrtnja je određeno kalibracionom krivom i koeficijentom korelacije.

U toku kalibracije uočeno je da se dobijene kalibracione krive mogu svrstati u tri kategorije: idealno linearna zavisnost sile i dilatacije, krive koje imaju izvesnu nelinearnost u zoni malih naprezanja i krive kod kojih je uočljivo histerezisno ponašanje, zbog čega se zavrtnjevi moraju zameniti novim.

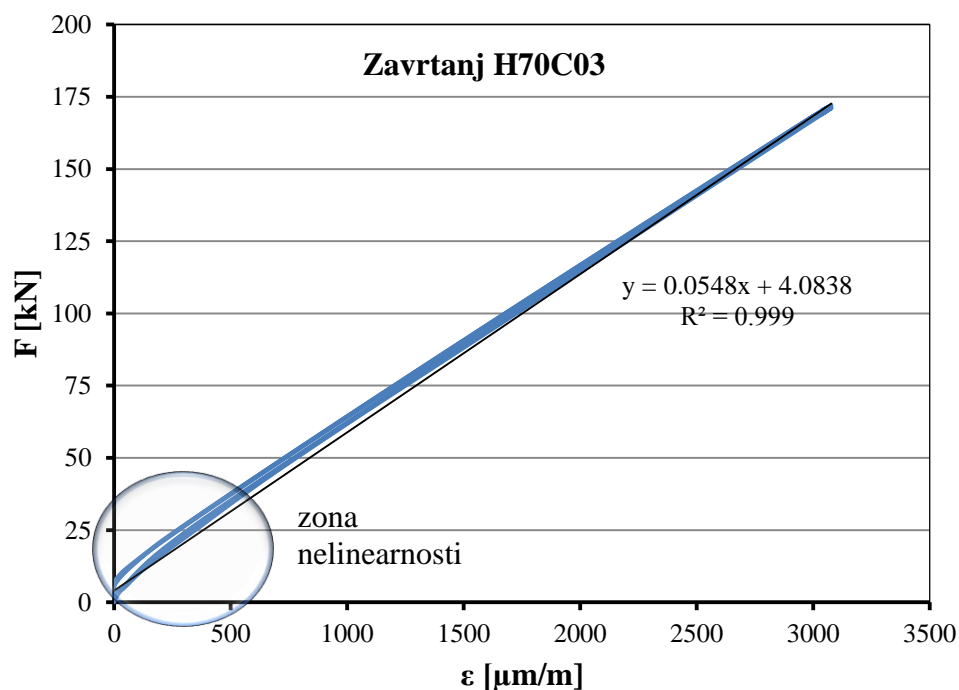
Linearna zavisnost sile na kidalici i dilatacije merne trake u zavrtnju garantuje da je merna traka pravilno ugrađena u zavrtnj i da je lepak obezbedio da se traka ponaša isto kao i zavrtnj, tj. da se dilatacije zavrtnja u zoni merne trake podudaraju sa dilatacijom merne trake. Kao primer prikazana je kalibraciona kriva za zavrtnj D50B03 (slika 3.40). Na dijagramu je prikazana i jednačina krive dobijena metodom najmanjih kvadrata, kao i koeficijent korelacije.



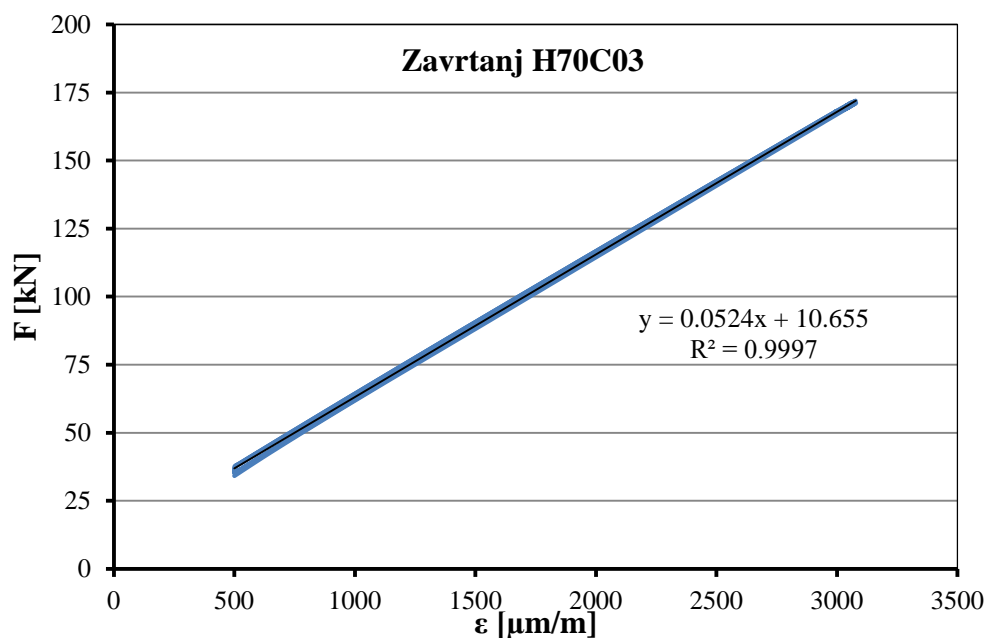
Slika 3.40: Dijagram sila-dilatacija za zavrtnj D50B03

Rezultati kalibracije (slika 3.41) pokazali su da se za male vrednosti sile može javiti nelinearnost u vezi sile i dilatacija, pa se ekstrapolacija može vršiti samo u zoni gde je ova veza linearna. Kod određenog broja zavrtnjeva primećena je nelinearnost u vezi između sile u kidalici i dilatacije merne trake u zavrtnju koja se javlja u zoni malih naprezanja, za sile do 20 kN, sa izuzetkom zavrtnja H70C03 (slika 3.41) kod kojeg se nelinearnost javlja do sile od oko 35 kN. Uočena nelinearnost posledica je zazora koji se javlja između glave zavrtnja i alata za kalibraciju, nakon fiksiranja alata u čeljust kidalice, kao i odstupanja rupe za ugradnju merne trake od ose zavrtnja. S obzirom da se u toku eksperimentalnog istraživanja meri gubitak sile prednaprezanja u zavrtnjevima odnosno smanjenje dilatacije merne trake kroz vreme, zona malih naprezanja nije od posebnog interesa. Zbog toga je u ovim slučajevima odstranjen deo krive u kojem se

javlja nelinearnost. Na taj način dobijene su krive koje tačnije opisuju vezu sile i dilatacije u zonama naprežanja u kojima se sprovodi eksperimentalno istraživanje (slika 3.42).



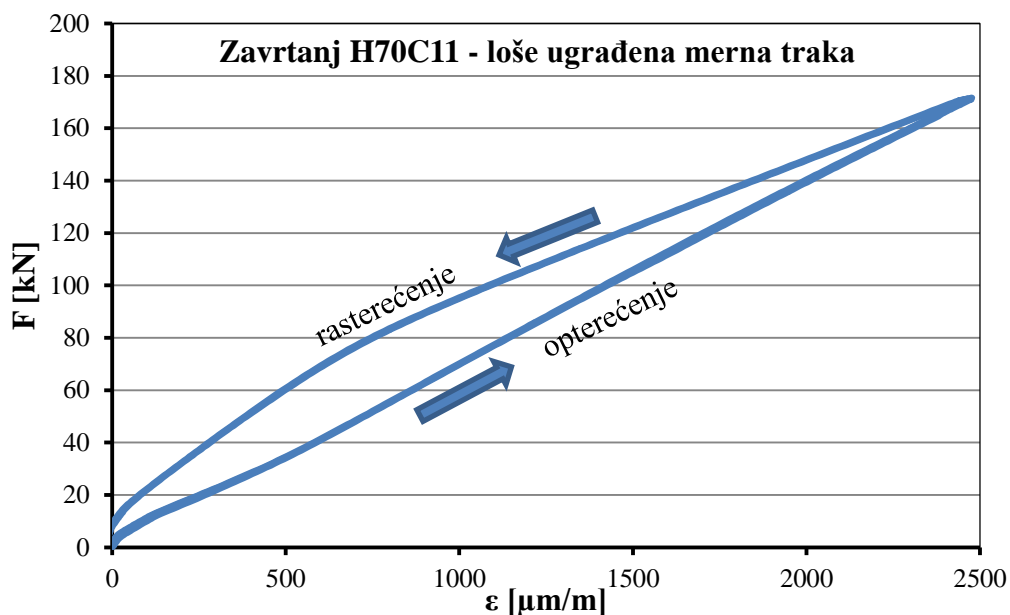
Slika 3.41: Kalibraciona kriva za zavrtnaj H70C03



Slika 3.42: Kalibraciona kriva za zavrtnaj H70C03 nakon uklanjanja nelinearnog dela

Treća grupa kalibracionih krivih, kod kojih je izraženo histerezisno ponašanje, uočena je u slučaju 3 zavrtnja od ukupno 54, koliko je ugrađeno u uzorke u prvoj fazi

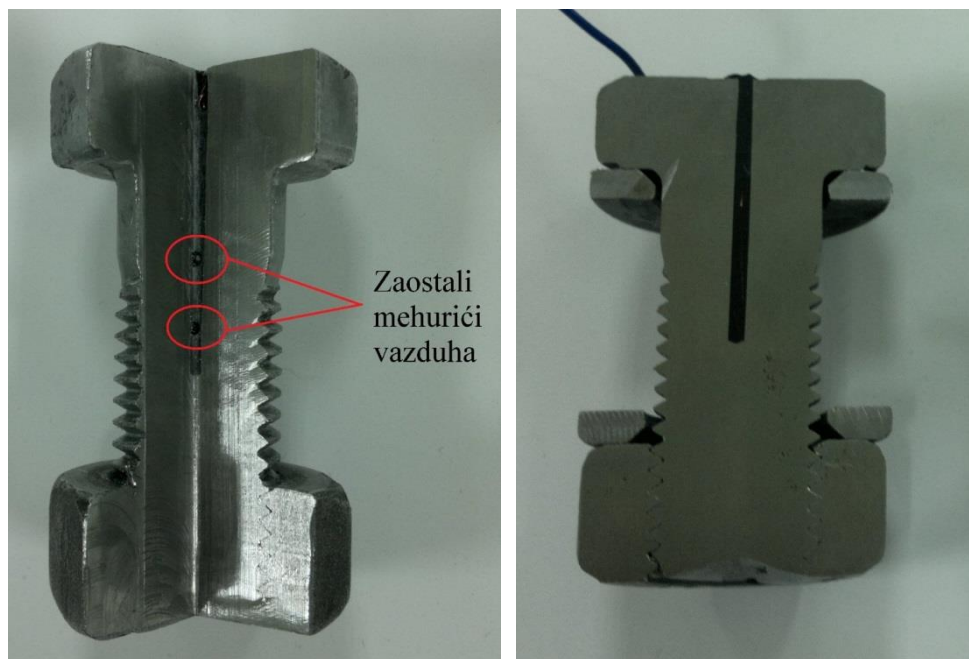
eksperimenta. Na primeru kalibracione krive za zavrtnaj H70C11 (slika 3.43) jasno je uočljivo da se delovi kalibracione krive pri opterećenju i rasterećenju ne podudaraju.



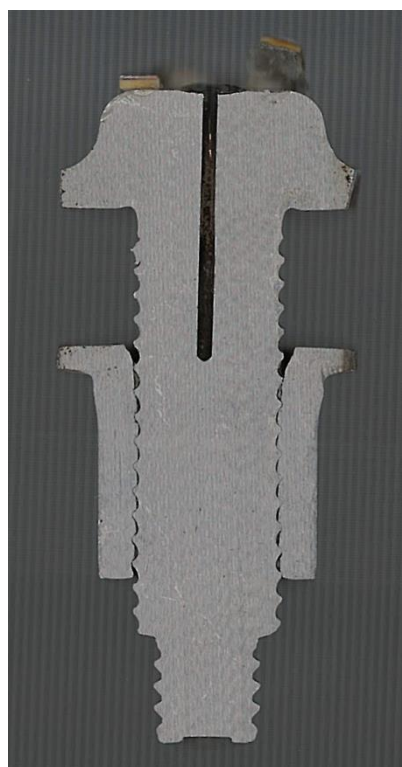
Slika 3.43: Kalibraciona kriva za zavrtnaj H70C11 – primer loše ugrađene merne trake

Uzimajući u obzir činjenicu da je predmet istraživanja gubitak sile prednaprezanja, a da je u slučaju kalibracione krive za zavrtnaj H70C11 jasno uočljivo savršeno poklapanje uzlaznih odnosno silaznih delova krive, u sva tri ciklusa opterećenje-rasterećenje, u slučaju nepostojanja mogućnosti da se zavrtnaj zameni mogla bi se koristiti i ovakva kriva. U tom slučaju sila u zavrtnju u određenom trenutku računala bi se na osnovu silaznog dela kalibracione krive s obzirom da se nakon dostizanja pune sile prednaprezanja prati njen gubitak kroz vreme. Sva tri zavrtnja kod kojih se javio ovaj fenomen zamenjeni su novim za koje su dobijene linearne kalibracione krive. Najverovatniji uzrok nelinearnosti kalibracionih krivih su nepravilnosti pri ugradnji mernih traka kao što su zaostali mehurići vazduha (slika 3.44) ili odstupanje rupe za ugradnju merne trake od ose zavrtnja. U Prilogu C prikazane su sve kalibracione krive.

U daljem tekstu date su jednačine kalibracionih krivih dobijene za svaki zavrtnaj (tabela 3.20 do tabela 3.31), definisane koeficijentima krive i koeficijentom korelacije. Uz pomoć ovih krivih moguće je svako čitanje dilatacije merne trake jednostavno prevesti u vrednost sile prednaprezanja u zavrtnju.



Slika 3.44: Primer lepka sa i bez zaostalih mehurića vazduha



Slika 3.45: Primer rupe za ugradnju merne trake koja nije u osi zavrtnja

Tabela 3.20: Faza I - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 50 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
D1	D50B01	0,051	+5,964	0,9999
	D50B02	0,049	-1,948	1,0000
	D50B03	0,051	-0,091	1,0000
D2	D50C01	0,051	-0,314	1,0000
	D50C02	0,050	-0,173	1,0000
	D50C03	0,051	+0,011	0,9999
D3	D50C11	0,053	+1,654	0,9997
	D50C12	0,050	+0,585	0,9999
	D50C13	0,051	-0,123	0,9999

Tabela 3.21: Faza I - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 70 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
D4	D70B01	0,054	+3,760	1,0000
	D70B02	0,054	+0,056	1,0000
	D70B03	0,056	+3,274	1,0000
D5	D70C01	0,057	+3,641	1,0000
	D70C02	0,055	+2,666	1,0000
	D70C03	0,054	-1,843	1,0000
D6	D70C11	0,053	+2,663	1,0000
	D70C12	0,056	-0,047	0,9999
	D70C13	0,054	+0,212	0,9999

Tabela 3.22: Faza I - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 90 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
D7	D90B01	0,058	-0,956	0,9999
	D90B02	0,061	+1,684	0,9999
	D90B03	0,060	-0,397	1,0000
D8	D90C01	0,061	+1,437	0,9999
	D90C02	0,061	+7,020	1,0000
	D90C03	0,060	+0,636	1,0000
D9	D90C11	0,060	-5,056	0,9999
	D90C12	0,057	-5,960	1,0000
	D90C13	0,061	+1,927	0,9998

Tabela 3.23: Faza I - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 55 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
H1	H55B01	0,052	+5,802	1,0000
	H55B02	0,055	+3,979	1,0000
	H55B03	0,055	+0,997	0,9999
H2	H55C01	0,053	-0,264	1,0000
	H55C02	0,054	+0,285	1,0000
	H55C03	0,053	+0,521	1,0000
H3	H55C11	0,052	-1,143	1,0000
	H55C12	0,054	-0,462	0,9999
	H55C13	0,054	+9,822	0,9999

Tabela 3.24: Faza I - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 70 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
H4	H70B01	0,051	+0,718	0,9999
	H70B02	0,051	+3,575	1,0000
	H70B03	0,053	+5,795	0,9999
H5	H70C01	0,052	+4,381	0,9999
	H70C02	0,056	+1,855	0,9989
	H70C03	0,052	+10,655	0,9997
H6	H70C11	0,053	+0,617	1,0000
	H70C12	0,050	-6,776	1,0000
	H70C13	0,053	+7,349	1,0000

Tabela 3.25: Faza I - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 85 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
H7	H85B01	0,053	+5,847	0,9999
	H85B02	0,052	+1,258	1,0000
	H85B03	0,051	+0,289	1,0000
H8	H85C01	0,053	+6,855	0,9999
	H85C02	0,051	+0,342	1,0000
	H85C03	0,052	+1,211	0,9999
H9	H85C11	0,052	+6,621	0,9999
	H85C12	0,052	+3,623	1,0000
	H85C13	0,052	-0,112	1,0000

Tabela 3.26: Faza II - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 50 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ $\mu\text{m}/\text{m}$]	b [kN]	R^2
D10	D50B01.1	0,053	+3,760	0,9998
	D50B02.1	0,054	-3,294	1,0000
	D50B03.1	0,054	+1,257	1,0000
D11	D50B01.2	0,057	+1,229	1,0000
	D50B02.2	0,054	-1,543	0,9999
	D50B03.2	0,052	+2,555	1,0000
D12	D50C01.1	0,052	-10,125	0,9998
	D50C02.1	0,053	+7,290	0,9996
	D50C03.1	0,053	+10,806	0,9995
D13	D50C01.2	0,054	+0,416	0,9999
	D50C02.2	0,053	-0,765	0,9998
	D50C03.2	0,054	+3,829	0,9999

Tabela 3.27: Faza II - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 70 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ $\mu\text{m}/\text{m}$]	b [kN]	R^2
D14	D70B01.1	0,059	+0,325	0,9999
	D70B02.1	0,060	-2,692	1,0000
	D70B03.1	0,061	-0,572	1,0000
D15	D70B01.2	0,062	+1,551	1,0000
	D70B02.2	0,060	+0,593	1,0000
	D70B03.2	0,059	-1,398	0,9998
D16	D70C01.1	0,063	+0,780	0,9997
	D70C02.1	0,063	+0,011	1,0000
	D70C03.1	0,059	+0,440	1,0000
D17	D70C01.2	0,060	-0,849	0,9999
	D70C02.2	0,062	+0,143	1,0000
	D70C03.2	0,061	+0,119	0,9999

Tabela 3.28: Faza II - kalibracione krive za HV zavrtnjeve dužine 90 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ $\mu\text{m}/\text{m}$]	b [kN]	R^2
D18	D90B01.1	0,065	+1,584	0,9999
	D90B02.1	0,062	-1,111	0,9999
	D90B03.1	0,064	+2,585	1,0000
D19	D90B01.2	0,063	+0,768	1,0000
	D90B02.2	0,064	+1,103	1,0000
	D90B03.2	0,063	+0,066	1,0000
D20	D90C01.1	0,061	+0,000	1,0000
	D90C02.1	0,063	+0,153	1,0000
	D90C03.1	0,063	+0,076	1,0000
D21	D90C01.2	0,061	-0,586	1,0000
	D90C02.2	0,064	+0,863	1,0000
	D90C03.2	0,064	-0,103	1,0000

Tabela 3.29: Faza II - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 55 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ $\mu\text{m}/\text{m}$]	b [kN]	R^2
H10	H55B01.1	0,053	-1,113	0,9999
	H55B02.1	0,057	+0,845	0,9999
	H55B03.1	0,056	-0,612	1,0000
H11	H55B01.2	0,055	-1,193	1,0000
	H55B02.2	0,057	+0,006	1,0000
	H55B03.2	0,057	+0,273	1,0000
H12	H55C01.1	0,057	-0,343	0,9999
	H55C02.1	0,057	-0,863	1,0000
	H55C03.1	0,056	+0,512	1,0000
H13	H55C01.2	0,058	+7,781	0,9999
	H55C02.2	0,056	+1,775	0,9997
	H55C03.2	0,059	-1,297	0,9999

Tabela 3.30: Faza II - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 70 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
H14	H70B01.1	0,054	-2,797	1,0000
	H70B02.1	0,055	+0,849	1,0000
	H70B03.1	0,055	+1,420	1,0000
H15	H70B01.2	0,055	+0,236	1,0000
	H70B02.2	0,054	-5,811	0,9999
	H70B03.2	0,057	-0,768	1,0000
H16	H70C01.1	0,056	+1,252	0,9999
	H70C02.1	0,054	-10,621	0,9995
	H70C03.1	0,056	+0,982	0,9999
H17	H70C01.2	0,055	+6,550	1,0000
	H70C02.2	0,055	+1,173	0,9999
	H70C03.2	0,055	+6,104	0,9999

Tabela 3.31: Faza II - kalibracione krive za HBT zavrtnjeve dužine 85 mm

Oznaka uzorka	Oznaka zavrtnja	Kalibraciona kriva $y=ax+b$		
		a [kN/ μ m/m]	b [kN]	R ²
H18	H85B01.1	0,054	+0,491	1,0000
	H85B02.1	0,053	-4,684	0,9999
	H85B03.1	0,056	+0,747	0,9999
H19	H85B01.2	0,055	+1,082	0,9999
	H85B02.2	0,054	+0,594	0,9999
	H85B03.2	0,054	+7,481	0,9999
H20	H85C01.1	0,056	+6,479	0,9999
	H85C02.1	0,052	-0,894	0,9999
	H85C03.1	0,055	-0,300	1,0000
H21	H85C01.2	0,053	-1,237	0,9999
	H85C02.2	0,056	+0,959	0,9999
	H85C03.2	0,054	-4,348	1,0000

3.7.4 Ugradnja zavrtnjeva u uzorke

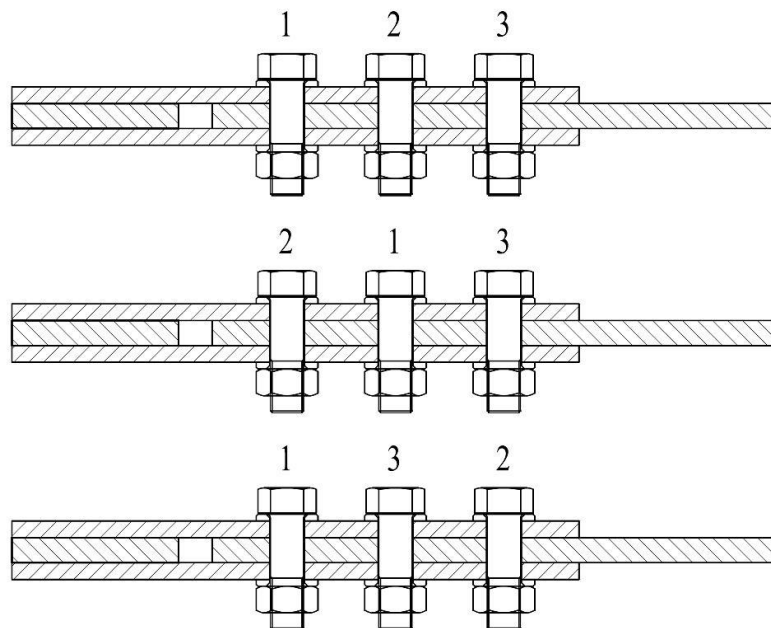
Postupak ugradnje zavrtnjeva i konačnog formiranja uzoraka sproveden je u Laboratoriji za beton i reologiju Građevinskog fakulteta u Beogradu.

Raspoloživi standardi propisuju minimalne vrednosti sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima:

- za HV zavrtnjeve M20, prema standardu [34] $F_{p,C}=171,5$ kN,
- za HBT zavrtnjeve M20, prema nacrtu standarda [20] $F_{p,C}=170,7$ kN.

Postupak ugradnje HV zavrtnjeva moment ključem definisan je standardom [23]. Ugradnja zavrtnjeva vrši se u dva koraka. U prvom, zavrtnjevi se pritežu na 75 % od vrednosti momenta pritezanja koja je određena za propisanu vrednost sile $F_{p,C}$. Nakon pritezanja svih zavrtnjeva u spoju, u drugom koraku oni se pritežu na 110 % od iste vrednosti momenta pritezanja, što je ujedno i kraj njihove ugradnje. U ovom istraživanju HV zavrtnjevi pritežani su odjednom, na punu vrednost momenta pritezanja. Procenjeno je da će se na taj način najbolje sagledati željeni fenomeni i dobiti rezultati uporedivi sa HBT zavrtnjevima.

Jedan od ciljeva ovog istraživanja je da se ispita uticaj ugradnje zavrtnja na gubitak sile prednaprezanja u već ugrađenim zavrtnjevima. Ovaj fenomen nije dovoljno istražen [36], pa mu je pažnja posvećena i u ovom eksperimentu, variranjem redosleda ugradnje HV i HBT zavrtnjeva. Na osnovu geometrije uzoraka i broja zavrtnjeva definisan je redosled ugradnje tako da sve mogućnosti budu obuhvaćene (slika 3.46):



Slika 3.46: Redosled ugradnje zavrtnjeva u uzorke

Planiranjem druge faze eksperimentalnog istraživanja predviđeno je da se polovina HV zavrtnjeva ugradi moment ključem, a polovina običnim ključem. Na ovaj način se želi utvrditi koliki je uticaj principa rada moment ključa na efekat samoodvrtanja navrtke zavrtnja (inicijalni gubitak sile prednaprezanja) nakon ugradnje i u toku uklanjanja moment ključa.

Zbog specifičnosti uzoraka bilo je neophodno osmisliti adekvatan način za ugradnju HV zavrtnjeva. S obzirom da se oni ugrađuju moment ključem, ili običnim ključem, neophodno je fiksirati glave zavrtnjeva za šta je upotrebljena paralelna stega (slika 3.47). Ovo se pokazalo kao dobro rešenje i omogućilo je brzu ugradnju zavrtnjeva. U slučaju ugradnje HV zavrtnjeva običnim ključem dostignuta sila prednaprezanja kontrolisana je zahvaljujući kontinuiranom merenju sile u realnom vremenu, što je omogućilo da se postupak pritezanja zaustavi u trenutku dostizanja željene sile.



Slika 3.47: Ugradnja zavrtnjeva u uzorke

Za ugradnju “*Huck BobTail*” zavrtnjeva nisu potrebni posebni uslovi, s obzirom na način funkcionisanja hidrauličke prese za ugradnju. Njihova ugradnja u potpunosti je potvrdila specificiranu brzinu od dve sekunde po zavrtnju, kao i veoma jednostavan i intuitivan postupak koji ne iziskuje kvalifikovanu radnu snagu.

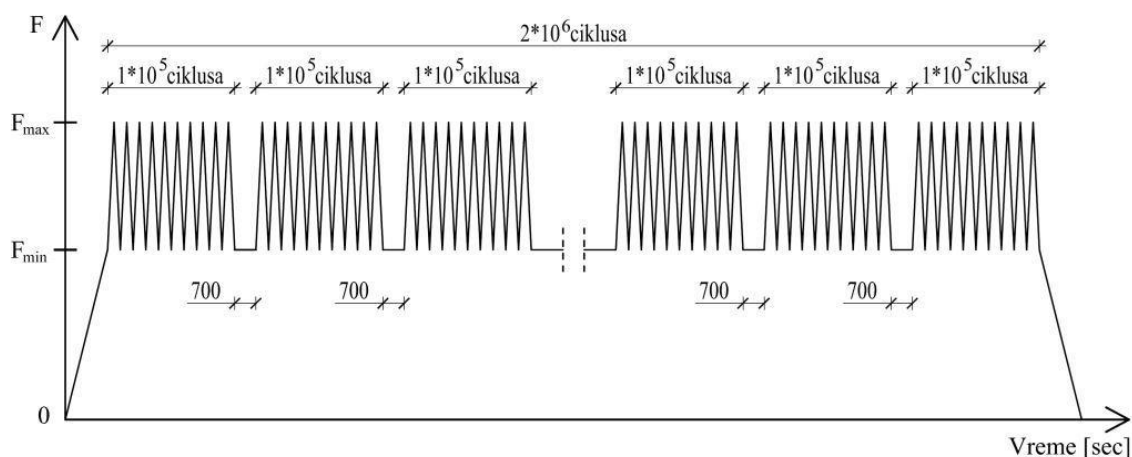
3.8 Ispitivanje uzoraka na dejstvo dinamičkog opterećenja

Šest uzoraka iz probne serije (faza I) izloženo je, nakon mesec dana praćenja inicijalnih i kratkoročnih gubitaka sile prednaprezanja, dejstvu dinamičkog opterećenja. Ovaj deo eksperimentalnog istraživanja sproveden je u Laboratoriji za eksperimentalnu

čvrstoću Vojnotehničkog instituta u Beogradu, na kidalici proizvođača MTS kapaciteta ± 500 kN.

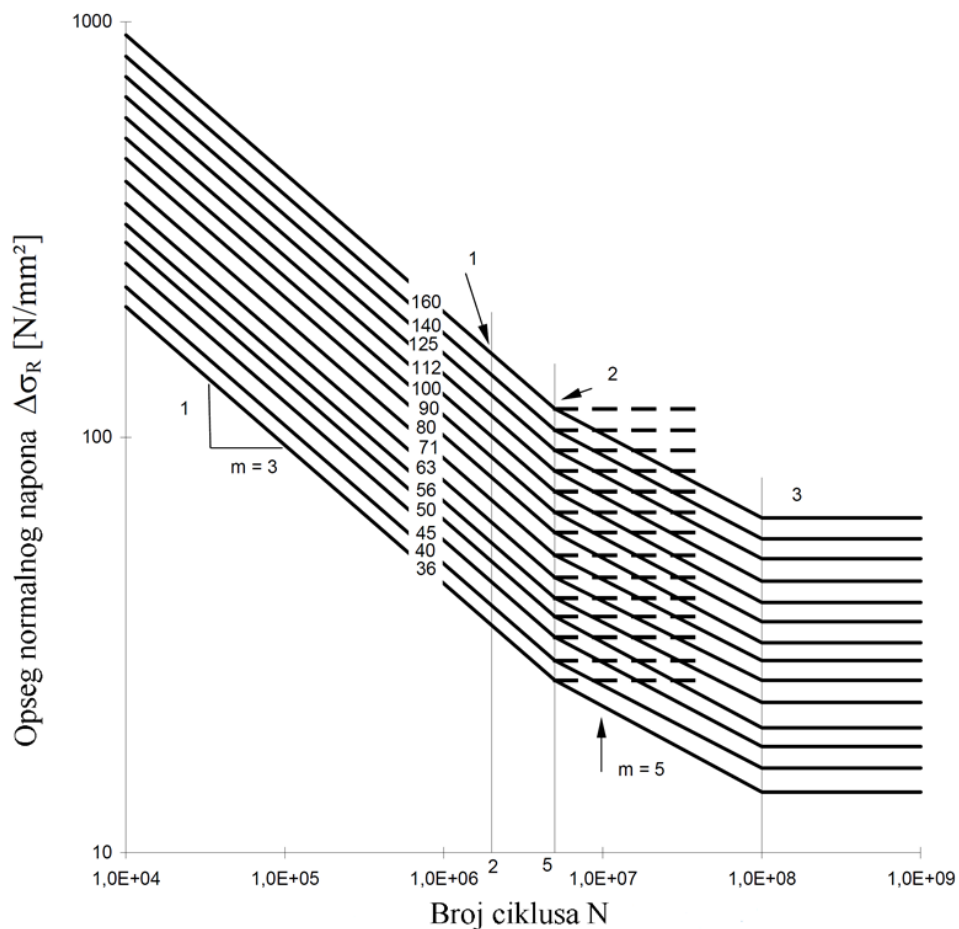
Svaki od uzoraka izložen je dejstvu 2×10^6 ciklusa opterećenje - rasterećenje. Spektar opterećenja definisan je frekvencijom, ali i minimalnom i maksimalnom vrednošću sile kojoj se uzorak izlaže u toku svakog ciklusa. Polazna pretpostavka pri određivanju opsega dinamičke sile koja deluje na uzorak je želja da se simulira eksploataciono opterećenje konstrukcije koja je projektovana tako da u toku njenog životnog veka ne dođe do proklizavanja veza.

U toku ispitivanja konstantno je vršeno merenje sile prednapreznja u zavrtnjevima i to učestalošću merenja od 1 Hz. Dinamičko opterećenje nanošeno je u serijama od 10^5 ciklusa, pri čemu se nakon svake serije pravi pauza od 700 sekundi u toku koje se takođe vrši monitoring sile prednapreznja u zavrtnjevima (slika 3.48). Pauza služi da se uzorak umiri i da se vrednosti sile prednapreznja u zavrtnjevima stabilizuju. U toku pauze opterećenje se drži konstantnim i to na vrednosti F_{\min} koja se određuje za svaki ispitani uzorak posebno.



Slika 3.48: Šematski prikaz spektra dinamičkog opterećenja

Prema standardu EN 1993-1-9 [69] simetrične veze na preklap sa prednapregnutim visokovrednim zavrtnjevima spadaju u kategoriju detalja 112 (slika 3.49), odnosno za njih je $\Delta\sigma_c=112$ MPa, računato za bruto poprečni presek. Dakle, ako se ovakva veza izloži dejstvu dinamičkog opterećenja koje izaziva promenu napona u bruto poprečnom preseku limova od $\Delta\sigma_c=112$ MPa do loma uzorka usled zamora doći će nakon 2×10^6 ciklusa.



Slika 3.49: Krive nosivosti na zamor za opseg normalnog napona [69]

Neposredno pred ugradnju uzorka u kidalicu za dinamičko ispitivanje očitavaju se vrednosti dilatacije mernih traka u zavrtnjevima i računa sila prednaprezanja F_p u svakom od zavrtnjeva:

$$F_p = a \cdot x(t_d) + b \quad 3.3$$

gde su:

a, b - koeficijenti kalibracione krive zavrtnja,

$x(t_d)$ - dilatacija merne trake u zavrtnju u trenutku početka dinamičkog ispitivanja,

t_d - trenutak početka dinamičkog ispitivanja uzorka

Na osnovu sračunatih vrednosti sile prednaprezanja određuje se nosivost zavrtnjeva na proklizavanje $F_{s,Rd}^b$:

$$F_{s,Rd}^b = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_p \quad 3.4$$

gde su:

$k_s=1,0$ - za zavrtnjeve u normalnim rupama,
 $n=2,0$ - broj tarnih ravni,
 $\mu=0,45$ - procenjena vrednost koeficijenta trenja,
 $\gamma_{M3}=1,25$ - parcijalni koeficijent sigurnosti.

Nosivost uzorka na proklizavanje $F_{s,Rd}^s$ određuje se sabiranjem nosivosti pojedinačnih zavrtnjeva na proklizavanje:

$$F_{s,Rd}^s = \Sigma F_{s,Rd}^b \quad 3.5$$

Na osnovu dimenzija poprečnog preseka i klase čvrstoće osnovnog materijala određuje se nosivost neto preseka uzorka kao manja od dve vrednosti:

$$N_{t,Rd} = \min\left\{N_{pl,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}; N_{u,Rd} = A_{net} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}\right\} \quad 3.6$$

gde su:

A - bruto površina poprečnog preseka uzorka,
 A_{net} - neto površina poprečnog preseka uzorka,
 f_y - granica razvlačenja osnovnog materijala,
 f_u - čvrstoća osnovnog materijala pri zatezanju,
 $\gamma_{M0}=1,0$ - parcijalni koeficijent sigurnosti,
 $\gamma_{M2}=1,25$ - parcijalni koeficijent sigurnosti.

Da bi se u potpunosti definisao spektar dinamičkog opterećenja, pored njegove frekvencije, neophodno je usvojiti i maksimalnu i minimalnu vrednost dinamičkog opterećenja. Jedan granični uslov je zahtev da u toku ispitivanja dinamičkim opterećenjem ne dođe do proklizavanja uzorka. Zbog toga je maksimalna vrednost dinamičkog opterećenja definisana kao 80% od nosivosti uzorka na proklizavanje:

$$F_{d,max,1} = 0,8 \cdot F_{s,Rd}^s \quad 3.7$$

Izuzetak od ovog pravila su najtanji uzorci D3 i H3, kod kojih je merodavna nosivost neto preseka. Maksimalna vrednost dinamičkog opterećenja definisana je kao 80% od nosivosti neto preseka uzorka, a sve sa ciljem da u toku dinamičkog ispitivanja ne dođe do loma neto preseka uzorka:

$$F_{d,max,2} = 0,8 \cdot N_{t,Rd} \quad 3.8$$

Drugi granični uslov je zahtev da u toku delovanja dinamičkog opterećenja ne dođe do loma uzorka usled zamora osnovnog materijala. Ovaj uslov zadovoljen je

ograničavanjem promene napona u poprečnom preseku uzorka na 75% od vrednosti koja je definisana kao granična za predmetnu klasu detalja, a to je $\Delta\sigma_c=112$ MPa:

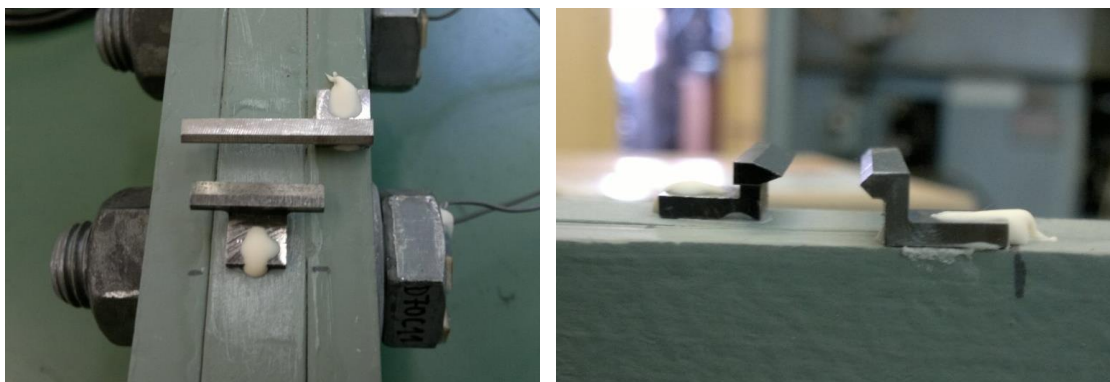
$$\Delta F_d = 0,75 \cdot \Delta\sigma_c \cdot A \quad 3.9$$

Na osnovu prikazanih graničnih uslova, minimalna vrednost dinamičke sile određuje se kao:

$$F_{d,\min} = F_{d,\max} - \Delta F_d \quad 3.10$$

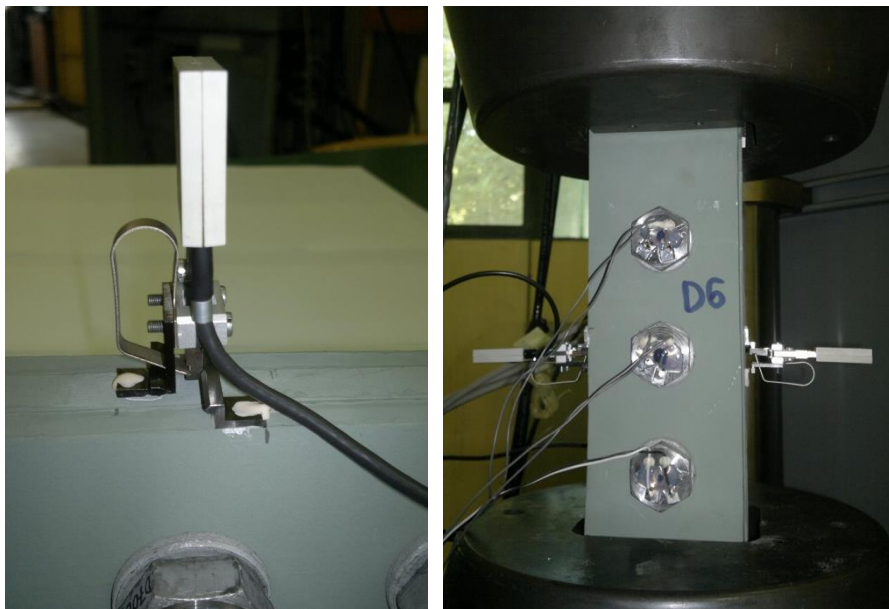
Vrednosti graničnih sila dinamičkog opterećenja, dobijene na ovaj način, zaokružene su (iz praktičnih razloga) na najbližu vrednost sa celim deseticama.

Vodeći računa da je spektar dinamičkog opterećenja definisan tako da u toku ispitivanja uzoraka ne dođe do proklizavanja, za potrebe ovog istraživanja, na uzorke su ugrađeni ekstenzometri sa ciljem da se eventualno proklizavanje blagovremeno registruje. Da bi ugradnja ekstenzometara bila moguća, konstruisan je i izrađen poseban alat koji se privremeno lepi na bočne strane čeličnih ploča i tako omogućava praćenje međusobnog razmicanja susednih čeličnih ploča (slika 3.50). Za potrebe eksperimenta korišćena su dva ekstenzometra tip DD1, proizvođača HBM. Opseg merenja ovih uređaja je $\pm 2,5$ mm, a preciznost 0,5% od opsega merenja [70] što je dovoljno za registrovanje međusobnog razmicanja čeličnih ploča većeg od 0,15 mm. Upravo je ova vrednost od 0,15 mm definisana standardom [33] kao granična vrednost za koju se smatra da je došlo do proklizavanja tarnog spoja. S obzirom da su uzorci formirani od po tri čelične ploče i da svaki uzorak ima dve tarne ravni, korišćena su po dva ekstenzometra istovremeno, na svakoj strani uzorka po jedan (slika 3.51). Na taj način je kontrolisano smicanje u obe tarne ravni.



Slika 3.50: Alat za ugradnju ekstenzometara

Prilikom fiksiranja (lepljenja) alata na čelične ploče važno je voditi računa da njegova orijentacija bude takva da se očitavanje ekstenzometra povećava (raste) sa razmicanjem ploča, tj. da se u toku naprezanja uzorka alati međusobno udaljavaju. Na taj način izbegava se mogućnost da usled primicanja alata dođe do ispadanja ekstenzometra i njegovog oštećenja.



Slika 3.51: Fiksiranje alata za uzorak i ugradnja ekstenzometara

3.9 Zaključci

Sa obzirom da je dugotrajno merenje sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima veoma zahtevan i složen eksperimentalni postupak, važno je dati preporuke koje su proistekle iz njegovog sprovođenja, a čiji je cilj da unaprede i olakšaju svaki naredni istraživački rad:

- kompenzaciju temperaturnih uticaja najpraktičnije je (ali ne i najjeftinije) vršiti uz pomoć mernih traka zalepljenih na čeličnu pločicu. Čelične pločice debljine 1 mm veoma su osetljive na deformacije. Ovo je jasno uočljivo na dijagramima (u prilogu D ove disertacije) kao nestabilnost sile u zavrtnjevima u trenutku bilo kakve manipulacije sa uzorcima (npr. premeštanje uzoraka sa radnog stola u police za odlaganje). Da bi se sprečila ova pojava neophodno je da kompenzacione čelične pločice budu debljine najmanje 3 mm;
- prilikom pripreme zavrtnjeva za kalibraciju (ugradnje mernih traka) broj zavrtnjeva treba planirati sa izvesnom rezervom. U prvoj fazi eksperimenta, kalibracija je ukazala na nepravilnosti kod 4 od 56 zavrtnjeva, dok je u drugoj

fazi taj broj nešto veći, 11 od 72 zavrtnja. Dakle, ugradnja mernih traka u 15% zavrtnjeva preko planiranog broja omogućit će efikasnu zamenu „neispravnih“ zavrtnjeva i kontinuirano sprovođenje eksperimenta;

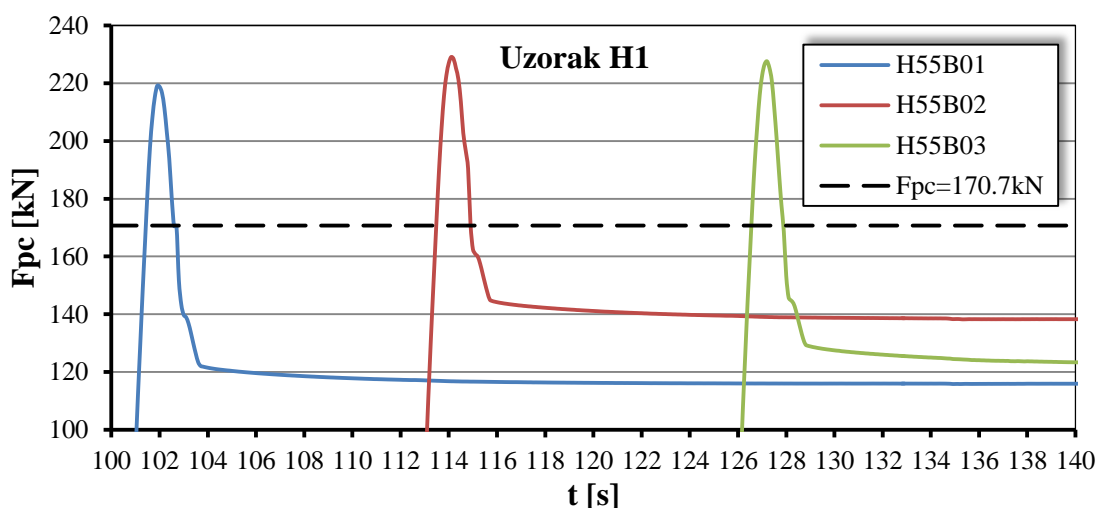
- alat za kalibraciju zavrtnjeva koji je primenjen u ovom eksperimentu može se unaprediti ugradnjom kardanskih zglobova na krajevima. Ovo bi sprečilo unošenje savijanja u zavrtnjeve usled neravnomernog naleganja glave zavrtnja na alat i rezultovalo otklanjanjem inicijalnih nelinearnosti kalibracionih krivih;
- analiza velikog broja rezultata je veoma zahtevan posao koji iziskuje mnogo vremena. Zbog toga je veoma važno izvršiti optimizaciju učestalosti merenja kako bi na kraju imali taman onoliko rezultata koliko je dovoljno za kvalitetno sagledavanje posmatranih fenomena. Najveća frekvencija merenja neophodna je na samom početku ispitivanja, u toku ugradnje zavrtnjeva (do 1h - 10 Hz, od 1h do 1 dan – 1Hz), a smanjuje se sa vremenom (od 1 dana do 1 meseca – 0,1 Hz i nakon toga do kraja ispitivanja - 0,01 Hz). Potrebna frekvencija merenja, takođe, zavisi od preciznosti mernog sistema. Date preporuke bazirane su na iskustvu primene dva merno-akviziciona sistema: HBM MGCplus i Data Taker DT85g u kombinaciji sa multiplekserima CEM20.

4. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

Veliki broj uzoraka i dug vremenski period kontinuiranog monitoringa, rezultovali su prikupljanjem velikog broja podataka (oko 500000000). Prikaz svih izmerenih vrednosti sile prednaprezanja u zavrtnjevima nije racionalan, već su, za ovo istraživanje relevantni rezultati, sistematično prikazani kako bi se lakše razumela njihova dalja analiza. U ovom poglavlju izvršen je prikaz obrađenih rezultata eksperimenta, sa vrednostima sile u zavrtnjevima u referentnim vremenskim trenucima. Za potrebe definisanja referentnih vremenskih trenutaka, izvršena je preliminarna analiza prikupljenih podataka. Takođe, preliminarnom analizom uočeni su zavrtnjevi čije ponašanje nije u skladu sa očekivanim. Dodatnim istraživanjem sakupljenih podataka utvrđen je razlog ovakvog ponašanja zavrtnjeva, a njihovi rezultati isključeni su, uz obrazloženje, iz dalje analize.

4.1 Inicijalni gubici sile prednaprezanja

Uvidom u dosadašnja istraživanja i publikacije, inicijalni gubici sile prednaprezanja referisani su kao oni koji se javljaju u prvih 10 sekundi nakon ugradnje zavrtnja. Njihov intezitet u najvećoj meri zavisi od metode ugradnje zavrtnja [5], [48].

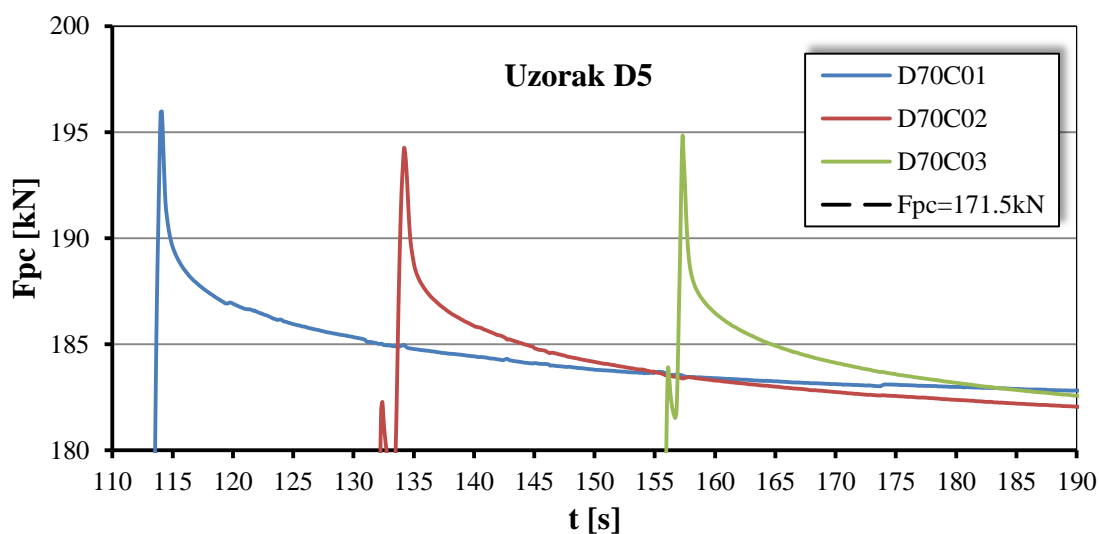


Slika 4.1: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H1

Preliminarna analiza rezultata sopstvenog istraživanja, prikupljenih u toku i neposredno nakon ugradnje HBT zavrtnjeva, pokazala je jasno izražen trenutak u kome

se završavaju inicijalni gubici sile prednaprezanja. Gubici sile usled metode ugradnje zavrtnja završavaju se u periodu od 2 sekunde nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile u zavrtnju (slika 4.1), što približno odgovara trenutku uklanjanja hidrauličke prese sa repa zavrtnja.

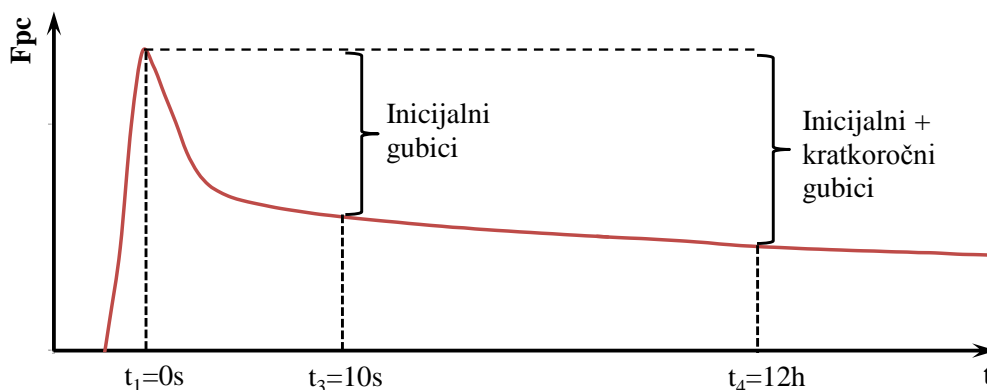
U slučaju HV zavrtnjeva trenutak završetka inicijalnih gubitaka sile prednaprezanja nije toliko jasno izražen, pa se opravdano može smatrati da se ovi gubici ostvaruju u periodu od 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne sile u zavrtnju (slika 4.2).



Slika 4.2: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka D5

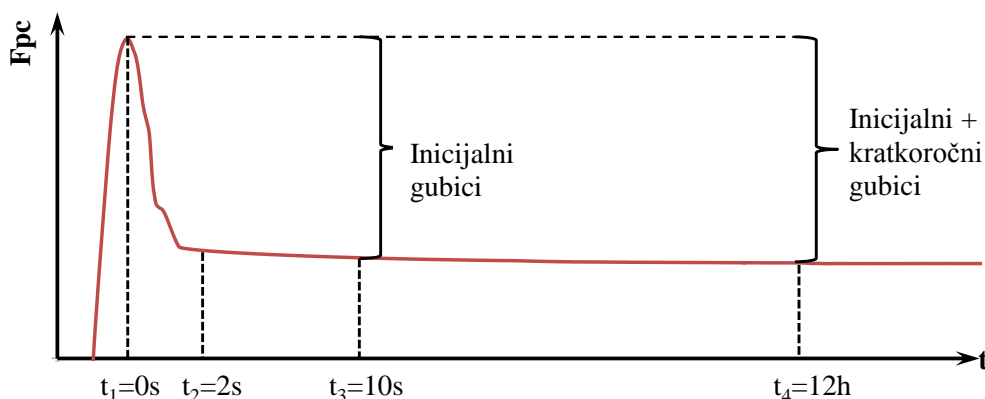
Za potrebe lakšeg razumevanja rezultata eksperimentalnog istraživanja usvojena su tri referentna vremenska trenutka za prikaz inicijalnih i kratkoročnih gubitaka sile prednaprezanja (slika 4.3):

- trenutak t_1 je trenutak dostizanja maksimalne sile prednaprezanja u telu zavrtnja. To je ujedno trenutak od kog se meri vreme u čijoj se funkciji prikazuju svi ostali gubici sile,
- trenutak $t_3=10s$ je trenutak za koji se smatra da predstavlja završetak perioda inicijalnih gubitaka sile prednaprezanja u zavrtnjevima,
- trenutak $t_4=12h$ je trenutak za koji se smatra da predstavlja završetak perioda kratkoročnih gubitaka sile prednaprezanja u zavrtnjevima.



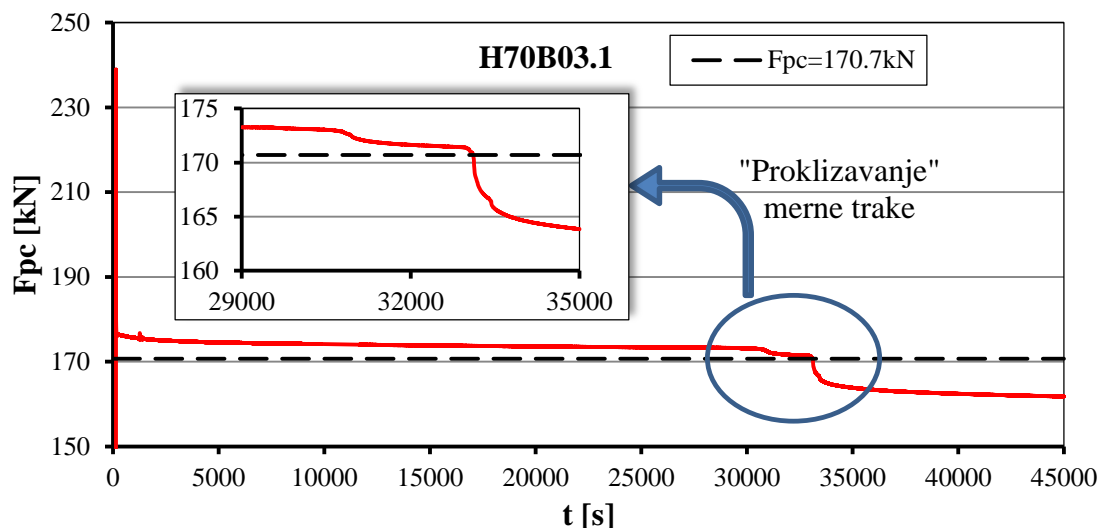
Slika 4.3: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima

Dodatno, trenutak $t_2=2$ s uveden je kako bi se pokazalo da se za HBT zavrtnjeve može smatrati da završetak inicijalnih gubitaka sile prednaprezanja koincidira sa trenutkom uklanjanja hidrauličke prese sa repa zavrtnja (slika 4.4).



Slika 4.4: Inicijalni i kratkoročni gubici u HBT zavrtnjevima

Izvršen je tabelarni prikaz rezultata u referentnim trenucima za svaki zavrtnj (tabela 4.1 do tabela 4.8). Preliminarnom analizom rezultata uočene su nelogičnosti u vrednostima gubitaka sile prednaprezanja kod 2 od 63 HBT zavrtnja i kod jednog od 63 HV zavrtnja (rezultati u tabelama prikazani crvenom bojom). U pitanju su zavrtnjevi sa oznakom H70B03.1, H85C12 i D50C02.2. U sva tri slučaja, očitavanja sa merne trake nisu u domenu očekivanih i opravdano se može posumnjati da dobijeni rezultati nisu pouzdani. Sve nedoumice otklonjene su daljom analizom rezultata. Kod zavrtnja H85C12 uočena je izrazita nestabilnost rezultata (videti poglavlje 5.3). U slučaju druga dva zavrtnja, očitavanja su stabilna, ali je jasno uočen trenutak „proklizavanja“ merne trake (slika 4.5). Zbog svega navedenog ovi zavrtnjevi isključeni su iz dalje analize rezultata.



Slika 4.5: Proklizavanje merne trake u zavrtnju H70B03.1

Vrednosti prikazane u tabelama (tabela 4.1 do tabela 4.8) predstavljaju:

- $F_{p,C,max}$ - maksimalna sila prednaprezanja ostvarena u postupku ugradnje zavrtnja
- $F_{p,C,t2}$ - sila prednaprezanja izmerena dve sekunde nakon dostizanja maksimalne vrednosti
- $F_{p,C,t3}$ - sila prednaprezanja izmerena deset sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti
- $F_{p,C,t4}$ - sila prednaprezanja izmerena dvanaest časova nakon dostizanja maksimalne vrednosti

- gubitak sile prednaprezanja u prve dve sekunde od dostizanja maksimalne vrednosti

$$\Delta F_{p,C,t2} = \frac{F_{p,C,max} - F_{p,C,t2}}{F_{p,C,max}} \cdot 100 [\%] \quad 4.1$$

- gubitak sile prednaprezanja u prvih deset sekundi od dostizanja maksimalne vrednosti

$$\Delta F_{p,C,t3} = \frac{F_{p,C,max} - F_{p,C,t3}}{F_{p,C,max}} \cdot 100 [\%] \quad 4.2$$

- gubitak sile prednaprezanja u prvih dvanaest sati od dostizanja maksimalne vrednosti

$$\Delta F_{p,C,t4} = \frac{F_{p,C,max} - F_{p,C,t4}}{F_{p,C,max}} \cdot 100 [\%] \quad 4.3$$

Tabela 4.1: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprežanja u HBT zavrtnjevima faze I – uzorci bez antikorozijske zaštite

Uzorak	Zavrtnanj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t2}$ t2=2 sec	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t2}$	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]				[%]		
H1	H55B01	219,1	121,6	117,3	113,0	44,50	46,46	48,44
	H55B02	229,1	144,0	139,7	135,7	37,15	39,02	40,78
	H55B03	227,6	128,5	123,8	119,9	43,54	45,61	47,34
H4	H70B01	223,3	168,3	165,5	160,8	24,63	25,88	27,99
	H70B02	224,5	172,2	169,6	166,7	23,30	24,45	25,76
	H70B03	246,3	193,6	190,9	187,0	21,40	22,49	24,06
7	H90B01	230,8	177,8	175,7	170,9	22,96	23,87	25,94
	H90B02	224,0	174,6	172,4	166,8	22,05	23,04	25,55
	H90B03	221,8	182,7	179,7	175,5	17,63	18,98	20,86

Tabela 4.2: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprežanja u HBT zavrtnjevima faze II – uzorci bez antikorozijske zaštite

Uzorak	Zavrtnanj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t2}$ t2=2 sec	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t2}$	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]				[%]		
H10	H55B01.1	205,4	113,9	109,6	105,4	44,55	46,64	48,70
	H55B02.1	230,3	121,3	116,3	111,0	47,33	49,50	51,79
	H55B03.1	234,4	137,5	133,4	128,2	41,34	43,09	45,29
H11	H55B01.2	223,4	135,5	131,5	126,6	39,35	41,14	43,31
	H55B02.2	236,7	140,2	135,7	130,5	40,77	42,67	44,85
	H55B03.2	234,6	142,1	137,5	132,8	39,43	41,39	43,39
H14	H70B01.1	235,7	179,7	177,0	172,4	23,76	24,90	26,85
	H70B02.1	245,4	189,2	186,4	182,2	22,90	24,04	25,76
	H70B03.1	238,9	180,7	177,9	162,0	24,36	25,53	32,20
H15	H70B01.2	242,0	186,9	184,2	179,1	22,77	23,88	25,98
	H70B02.2	235,2	177,2	174,4	171,2	24,66	25,85	27,19
	H70B03.2	236,3	180,2	177,3	173,4	23,74	24,97	26,63
H18	H85B01.1	232,6	185,5	183,4	179,0	20,25	21,15	23,03
	H85B02.1	214,8	170,1	167,8	164,4	20,81	21,88	23,47
	H85B03.1	234,5	186,8	184,5	180,2	20,34	21,32	23,15
H19	H85B01.2	258,6	212,9	210,9	208,9	17,67	18,45	19,20
	H85B02.2	230,3	181,2	178,7	174,8	21,32	22,41	24,12
	H85B03.2	241,6	217,0	192,2	189,0	19,37	20,45	21,78

Tabela 4.3: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima faze I – uzorci sa atikorozijskom zaštitom

Uzorak	Zavrtnaj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t2}$ t2=2 sec	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t2}$	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]				[%]		
H2	H55C01	218,5	135,5	131,9	121,7	37,99	39,63	44,29
	H55C02	219,0	128,3	124,4	114,8	41,42	43,20	47,58
	H55C03	218,8	128,9	125,1	114,7	41,09	42,82	47,59
H3	H55C11	223,8	135,4	131,7	120,7	39,50	41,15	46,07
	H55C12	223,1	128,6	124,7	113,5	42,36	44,11	49,11
	H55C13	240,6	146,1	141,9	131,4	39,28	41,02	45,37
H5	H70C01	231,3	177,0	174,5	166,3	23,48	24,56	28,11
	H70C02	228,0	166,9	164,1	153,3	26,80	28,03	32,78
	H70C03	232,3	175,3	172,5	163,8	24,54	25,74	29,48
H6	H70C11	246,1	188,8	179,8	171,9	23,28	26,94	30,14
	H70C12	218,1	159,0	156,3	147,2	27,10	28,34	32,50
	H70C13	247,3	194,1	191,4	182,4	21,51	22,60	26,24
H8	H85C01	239,6	191,0	188,9	181,5	20,28	21,16	24,26
	H85C02	227,2	180,1	177,9	170,8	20,73	21,70	24,82
	H85C03	231,0	186,3	184,2	176,4	19,35	20,26	23,62
H9	H85C11	240,0	194,5	192,3	183,9	18,96	19,88	23,36
	H85C12	240,6	190,6	188,4	185,1	20,78	21,70	23,06
	H85C13	233,9	186,4	184,4	176,1	20,31	21,16	24,71

Tabela 4.4: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima faze II – uzorci sa atikorozijskom zaštitom

Uzorak	Zavrtnaj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t2}$ t2=2 sec	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t2}$	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]				[%]		
H12	H55C01.1	230,9	152,3	148,4	137,8	34,04	35,73	40,33
	H55C02.1	223,7	138,6	134,9	124,0	38,04	39,70	44,58
	H55C03.1	226,2	137,9	133,9	122,7	39,04	40,80	45,74
H13	H55C01.2	244,3	155,9	151,9	140,9	36,19	37,82	42,32
	H55C02.2	229,6	138,6	134,2	123,7	39,63	41,55	46,11
	H55C03.2	221,7	136,4	132,3	121,7	38,48	40,32	45,09
H16	H70C01.1	242,3	184,6	182,1	172,8	23,81	24,85	28,69
	H70C02.1	216,5	154,1	151,2	139,6	28,82	30,16	35,53
	H70C03.1	238,0	175,8	173,0	163,7	26,13	27,31	31,22
H17	H70C01.2	249,1	189,0	186,4	175,7	24,13	25,17	29,47
	H70C02.2	248,1	184,8	182,3	173,3	25,51	26,52	30,15
	H70C03.2	239,0	171,8	168,9	159,3	28,12	29,33	33,37
H20	H85C01.1	237,4	188,9	186,7	179,9	20,43	21,36	24,22
	H85C02.1	224,7	175,0	172,8	164,1	22,12	23,10	26,95
	H85C03.1	231,6	181,7	179,4	172,1	21,55	22,54	25,68
H21	H85C01.2	232,2	184,7	182,2	171,6	20,46	21,53	26,08
	H85C02.2	237,9	187,9	185,6	178,6	21,02	21,98	24,94
	H85C03.2	224,0	175,8	173,1	166,0	21,52	22,72	25,89

Tabela 4.5: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze I – uzorci bez atikorozone zaštite

Uzorak / način ugradnje	Zavrtnanj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]			[%]	
D1 Moment ključ	D50B01	187,4	179,0	170,1	4,49	9,22
	D50B02	198,2	188,8	178,8	4,75	9,78
	D50B03	215,7	203,2	191,4	5,78	11,23
D4 Moment ključ	D70B01	189,7	180,1	172,4	5,07	9,12
	D70B02	204,4	193,6	182,1	5,28	10,92
	D70B03	200,2	193,9	182,3	3,13	8,95
D7 Moment ključ	D90B01	203,6	190,6	184,8	6,38	9,23
	D90B02	193,0	186,4	178,6	3,42	7,45
	D90B03	178,4	173,6	166,7	2,69	6,55

Tabela 4.6: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze II – uzorci bez atikorozone zaštite

Uzorak / način ugradnje	Zavrtnanj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]			[%]	
D10 Moment ključ	D50B01.1	160,7	155,2	150,7	3,42	6,20
	D50B02.1	164,7	157,4	152,8	4,46	7,23
	D50B03.1	163,2	156,0	150,7	4,41	7,67
D11 Običan ključ	D50B01.2	173,7	169,2	164,4	2,61	5,37
	D50B02.2	185,6	178,1	173,8	4,03	6,37
	D50B03.2	178,0	172,6	169,2	3,06	4,97
D14 Moment ključ	D70B01.1	166,2	161,1	155,6	3,07	6,38
	D70B02.1	161,9	156,5	153,9	3,34	4,93
	D70B03.1	177,6	172,0	158,7	3,16	10,66
D15 Običan ključ	D70B01.2	171,1	166,5	163,6	2,71	4,38
	D70B02.2	174,4	169,1	166,0	3,04	4,82
	D70B03.2	174,0	171,1	167,6	1,67	3,66
D18 Moment ključ	D90B01.1	200,9	186,8	180,9	7,04	9,95
	D90B02.1	154,5	150,1	147,5	2,86	4,54
	D90B03.1	172,4	168,6	165,5	2,23	4,00
D19 Običan ključ	D90B01.2	176,6	173,3	170,8	1,85	3,29
	D90B02.2	173,2	169,5	166,1	2,14	4,11
	D90B03.2	178,4	172,8	168,5	3,12	5,57

Tabela 4.7: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze I
 – uzorci sa atikorozijskom zaštitom

Uzorak / način ugradnje	Zavrtnaj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]			[%]	
D2 Moment ključ	D50C01	176,7	167,7	153,5	5,10	13,13
	D50C02	196,1	184,5	170,2	5,92	13,19
	D50C03	171,1	160,1	146,3	6,44	14,50
D3 Moment ključ	D50C11	205,2	194,5	170,3	5,20	16,98
	D50C12	199,9	188,7	173,7	5,62	13,12
	D50C13	202,9	192,8	176,5	4,99	13,02
D5 Moment ključ	D70C01	196,0	186,1	171,1	5,03	12,73
	D70C02	194,3	185,0	168,9	4,77	13,03
	D70C03	194,8	184,5	169,3	5,30	13,10
D6 Moment ključ	D70C11	194,3	187,1	174,1	3,70	10,41
	D70C12	193,0	183,6	169,3	4,84	12,28
	D70C13	185,7	179,5	166,1	3,38	10,55
D8 Moment ključ	D90C01	192,1	184,4	171,3	4,00	10,83
	D90C02	185,3	180,7	167,8	2,47	9,43
	D90C03	179,3	171,2	158,6	4,50	11,57
D9 Moment ključ	D90C11	171,5	163,6	151,9	4,62	11,45
	D90C12	158,9	151,5	139,4	4,63	12,26
	D90C13	232,4	216,3	199,1	6,90	14,32

Tabela 4.8: Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima faze II – uzorci sa atikoroziomom zaštitom

Uzorak	Zavrtnj	$F_{p,C,max}$	$F_{p,C,t3}$ t3=10 sec	$F_{p,C,t4}$ t4=12 h	$\Delta F_{p,C,t3}$	$\Delta F_{p,C,t4}$
		[kN]			[%]	
D12 Moment ključ	D50C01.1	161,7	153,9	141,9	4,82	12,23
	D50C02.1	169,5	161,4	149,0	4,76	12,10
	D50C03.1	163,2	154,8	142,8	5,15	12,49
D13 Običan ključ	D50C01.2	172,0	165,5	152,7	3,79	11,20
	D50C02.2	173,1	166,4	148,5	3,85	14,22
	D50C03.2	192,7	184,0	172,2	4,51	10,63
D16 Moment ključ	D70C01.1	182,9	174,6	162,7	4,54	11,04
	D70C02.1	178,8	171,4	159,5	4,12	10,79
	D70C03.1	206,2	196,8	184,4	4,56	10,57
D17 Običan ključ	D70C01.2	176,9	169,5	159,4	4,18	9,92
	D70C02.2	172,2	166,2	155,5	3,47	9,69
	D70C03.2	181,9	175,4	163,3	3,58	10,23
D20 Moment ključ	D90C01.1	170,9	165,1	155,9	3,39	8,76
	D90C02.1	206,2	199,9	189,7	3,06	8,00
	D90C03.1	172,2	166,1	157,1	3,54	8,76
D21 Običan ključ	D90C01.2	187,9	181,3	170,0	3,51	9,54
	D90C02.2	195,0	188,0	177,2	3,59	9,11
	D90C03.2	179,8	174,4	164,7	3,00	8,41

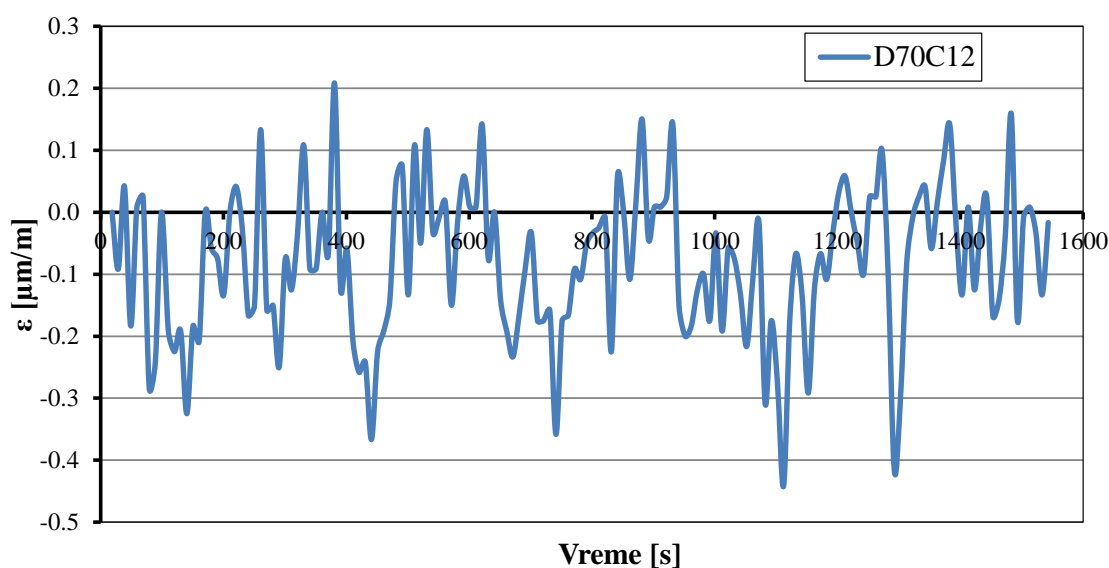
4.2 Dugoročni gubici sile prednaprezanja

Svi gubici sile prednaprezanja koji se javljaju nakon prvih 12 časova spadaju u dugoročne gubitke. Veoma složena organizacija eksperimentalnog istraživanja, veliki broj uzoraka i neophodni merno akvizicioni sistemi, kao i podela eksperimenta u dve faze, onemogućili su ugradnju svih zavrtnjeva u istom trenutku. Zavrtnjevi prve faze (HBT i HV), predviđeni za statičko ispitivanje, ugrađeni su u uzorke 10.05.2013. godine, a oni predviđeni za dinamičko ispitivanje 13.05.2013. godine, dok su HBT zavrtnjevi druge faze ugrađeni 31.12.2013. godine, a HV zavrtnjevi 05.02.2014. godine. Prikazani rezultati odnose se na period zaključno sa 23.07.2014., što gledano za sve uzorke predstavlja kontinuirano praćenje sile prednaprezanja u zavrtnjevima u periodu od najmanje 24 nedelje. Za zavrtnjeve iz prve faze eksperimenta prikazani su rezultati za period od 60 nedelja, ali su rezultati nakon 24 nedelje korišćeni samo za procenu trenda gubitka sile prednaprezanja u zavrtnjevima.

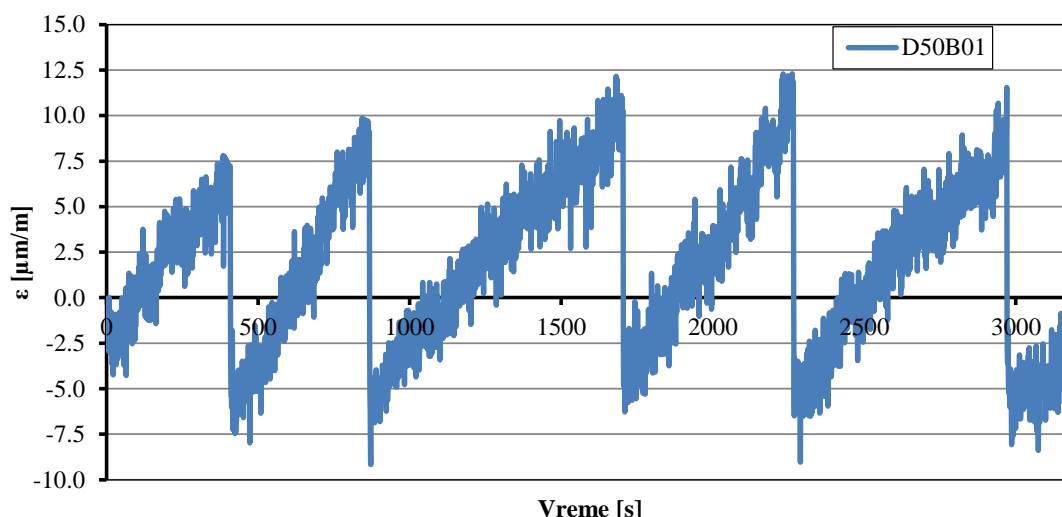
Izvršen je tabelarni prikaz rezultata u referentnim vremenskim trenucima, za svaki zavrtnaj (tabela 4.9 do tabela 4.32). Prikazani rezultati dobijeni su na dva načina (direktnim očitavanjem ili osrednjavanjem) u zavisnosti o kom vremenskom trenutku se radi, odnosno koji merni sistem je primenjen za njihovo očitavanje. Stabilnost mernih traka (promena očitanih dilatacija u slučaju neopterećene merne trake) razlikuje se kod primenjenih mernih sistema.

U slučaju primene mernog sistema „*HBM-MGCplus*“ dobija se veća stabilnost i preciznost rezultata. U okviru testa stabilnosti merne trake dobijene su vrednosti oscilovanja rezultata manje od deklarisanе preciznosti merne trake koja iznosi $1 \mu\text{m/m}$ (slika 4.6). Shodno ovome, u slučaju primene ovog mernog sistema, moguće je vršiti direktno očitavanje rezultata.

Primenom logera „*DT85G*“ kao osnove mernog sistema, registrovana je manja stabilnost rezultata. Testom stabilnosti utvrđene su promene vrednosti čitanja sa merne trake značajno veće od njene deklarisanе preciznosti (slika 4.7). Ipak, detaljnim testiranjem opreme utvrđeno je da izmerene vrednosti pokazuju veliku stabilnost ukoliko se vrši osrednjavanje određenog broja rezultata. Identičnu stabilnost pokazuju i maksimalna i minimalna vrednost izmerena u određenom periodu. Shodno ovome, u slučaju primene logera kao osnove mernog sistema, vrednosti sile prednaprežanja određivane su osrednjavanjem rezultata u periodu od sedam dana, a referentni trenutak je usvojen u sredini posmatranog intervala.



Slika 4.6: Stabilnost merne trake u slučaju očitavanja uz pomoć HBM mernog sistema



Slika 4.7: Stabilnost merne trake u slučaju očitavanja uz pomoć DT85G mernog sistema

Slično kao kod kratkoročnih gubitaka sile prednaprezanja, preliminarnom analizom rezultata dugoročnih gubitaka uočene su određene nelogičnosti kod nekih zavrtnjeva. Dalje istraživanje pokazalo je da se radi o naglom priraštaju ili gubitku sile prednaprezanja, što se može objasniti jedino kao posledica „proklizavanja“ merne trake tj. promena njene dužine usled gubitka adhezije između lepka i tela zavrtnja. Ovi rezultati su isključeni iz dalje analize, a u tabelama su označeni crvenom bojom.

Vrednosti prikazane u tabelama (tabela 4.9 do tabela 4.32) predstavljaju:

$F_{p,C,t}$ - sila prednaprezanja ostvarena u posmatranom vremenskom trenutku t (od $t=0$ sekundi do $t=24$ nedelje (60 nedelja))

- gubitak sile prednaprezanja u posmatranom trenutku t , u odnosu na maksimalnu ostvarenu vrednost sile prednaprezanja u postupku ugradnje zavrtnja:

$$\Delta F_{p,C,t_0}(t) = \frac{F_{p,C,t_0} - F_{p,C,t}}{F_{p,C,t_0}} \cdot 100 [\%] \quad 4.4$$

- gubitak sile prednaprezanja u posmatranom trenutku t , u odnosu na ostvarenu vrednost sile prednaprezanja u trenutku $t_3=10$ sekundi, računato od trenutka dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja:

$$\Delta F_{p,C,t_3}(t) = \frac{F_{p,C,t_3} - F_{p,C,t}}{F_{p,C,t_3}} \cdot 100 [\%] \quad 4.5$$

Tabela 4.9: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku H1

Vreme t	Uzorak H1								
	H55B01			H55B02			H55B03		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]
$t_0=0s$	219,1	0,0	/	229,1	0,0	/	227,6	0,0	/
$t_3=10s$	117,3	46,5	0,0	139,7	39,0	0,0	123,8	45,6	0,0
1min	116,0	47,1	1,1	138,4	39,6	1,0	122,9	46,0	0,8
10min	115,4	47,3	1,6	138,3	39,6	1,0	122,6	46,1	1,0
1h	114,3	47,8	2,6	137,1	40,1	1,9	121,5	46,6	1,9
12h	113,0	48,4	3,7	135,7	40,8	2,9	119,9	47,3	3,2
24h	112,6	48,6	4,0	135,3	41,0	3,2	119,4	47,5	3,5
1n	110,5	49,6	5,8	133,5	41,7	4,5	117,2	48,5	5,4
4n	108,7	50,4	7,4	131,5	42,6	5,9	115,9	49,1	6,4
8n	107,8	50,8	8,1	129,9	43,3	7,0	115,5	49,3	6,8
12n	107,3	51,0	8,5	129,0	43,7	7,7	115,3	49,4	6,9
16n	106,0	51,6	9,6	127,6	44,3	8,7	114,4	49,7	7,6
20n	104,9	52,1	10,5	126,6	44,7	9,4	113,5	50,1	8,4
24n	104,8	52,2	10,6	126,5	44,8	9,5	113,0	50,4	8,8
28n	104,4	52,3	11,0	125,9	45,0	9,9	111,9	50,8	9,6
32n	103,7	52,7	11,6	124,9	45,5	10,6	111,4	51,1	10,1
36n	104,0	52,5	11,3	125,1	45,4	10,5	111,4	51,0	10,0
40n	103,7	52,7	11,6	124,8	45,5	10,7	111,2	51,1	10,2
44n	96,4	56,0	17,8	124,7	45,6	10,8	110,9	51,3	10,4
48n	95,8	56,3	18,4	124,5	45,6	10,9	110,7	51,4	10,6
52n	95,5	56,4	18,6	124,4	45,7	11,0	110,2	51,6	11,0
56n	95,6	56,4	18,5	124,7	45,6	10,8	110,3	51,6	11,0
60n	95,3	56,5	18,7	124,7	45,6	10,8	110,2	51,6	11,0

Tabela 4.10: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H10 i H11

Vreme t	Uzorak H10									Uzorak H11								
	H55B01.1			H55B02.1			H55B03.1			H55B01.2			H55B02.2			H55B03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	205,4	0,0	/	230,3	0,0	/	234,4	0,0	/	223,4	0,0	/	236,7	0,0	/	234,6	0,0	/
$t_3=10s$	109,6	46,6	0,0	116,3	49,5	0,0	133,4	43,1	0,0	131,5	41,1	0,0	135,7	42,7	0,0	137,5	41,4	0,0
1min	108,3	47,3	1,2	115,0	50,1	1,2	132,2	43,6	0,8	130,2	41,7	1,0	134,1	43,4	1,2	136,3	41,9	0,9
10min	107,6	47,6	1,8	113,9	50,5	2,1	131,3	44,0	1,6	129,4	42,1	1,6	133,2	43,7	1,9	135,5	42,2	1,5
1h	106,7	48,1	2,7	112,8	51,0	3,0	130,1	44,5	2,5	128,4	42,5	2,4	132,3	44,1	2,5	134,5	42,7	2,2
12h	105,4	48,7	3,9	111,0	51,8	4,6	128,2	45,3	3,9	126,6	43,3	3,7	130,5	44,8	3,8	132,8	43,4	3,4
24h	105,2	48,8	4,0	110,6	52,0	4,9	127,9	45,4	4,1	126,3	43,5	3,9	130,2	45,0	4,1	132,4	43,6	3,7
1n	104,7	49,1	4,5	109,4	52,5	5,9	127,0	45,8	4,8	125,5	43,8	4,6	128,8	45,6	5,1	131,1	44,1	4,7
4n	103,0	49,8	6,0	107,6	53,3	7,5	125,1	46,6	6,2	123,7	44,6	5,9	126,5	46,5	6,8	129,5	44,8	5,8
8n	102,9	49,9	6,2	107,1	53,5	8,0	125,0	46,7	6,2	123,4	44,8	6,2	126,0	46,8	7,2	129,1	45,0	6,1
12n	102,2	50,2	6,7	106,4	53,8	8,6	124,0	47,1	7,0	122,5	45,2	6,8	125,3	47,1	7,7	128,4	45,3	6,6
16n	101,7	50,5	7,2	105,7	54,1	9,1	123,3	47,4	7,5	121,5	45,6	7,6	124,5	47,4	8,3	127,6	45,6	7,2
20n	101,4	50,6	7,5	105,2	54,3	9,6	122,9	47,6	7,8	120,7	46,0	8,2	124,1	47,6	8,5	127,1	45,8	7,6
24n	101,4	50,6	7,5	105,3	54,3	9,5	123,4	47,4	7,5	120,1	46,3	8,7	123,8	47,7	8,8	127,4	45,7	7,3

Tabela 4.11: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H2 i H3

Vreme t	Uzorak H2									Uzorak H3								
	H55C01			H55C02			H55C03			H55C11			H55C12			H55C13		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]
$t_0=0s$	218,5	0,0	/	219,0	0,0	/	218,8	0,0	/	223,8	0,0	/	223,1	0,0	/	240,6	0,0	/
$t_3=10s$	131,9	39,7	0,0	124,4	43,2	0,0	125,1	43,2	0,0	131,7	41,2	0,0	124,7	44,1	0,0	141,9	41,0	0,0
1min	130,2	40,4	1,3	122,4	44,1	1,6	123,2	43,2	1,5	129,4	42,2	1,7	122,7	45,0	1,6	139,9	41,9	1,5
10min	127,4	41,7	3,4	120,4	45,0	3,2	120,4	43,2	3,7	127,0	43,3	3,6	120,2	46,1	3,6	137,8	42,7	2,9
1h	125,0	42,8	5,2	118,1	46,1	5,1	118,1	43,2	5,6	124,4	44,4	5,5	117,2	47,5	6,0	135,3	43,8	4,7
12h	121,7	44,3	7,7	114,8	47,6	7,7	114,7	43,2	8,3	120,7	46,1	8,3	113,5	49,1	8,9	131,4	45,4	7,4
24h	120,9	44,7	8,3	113,9	48,0	8,4	113,8	43,2	9,0	119,7	46,5	9,1	112,4	49,6	9,8	130,9	45,6	7,8
1n	118,0	46,0	10,6	110,6	49,5	11,1	110,5	43,2	11,6	116,5	47,9	11,5	109,6	50,9	12,1	128,6	46,5	9,4
4n	116,6	46,6	11,6	108,7	50,4	12,7	108,8	43,2	13,0	114,2	49,0	13,3	106,7	52,2	14,4	125,9	47,7	11,3
8n	115,5	47,2	12,5	107,6	50,9	13,5	107,8	43,2	13,8	Ispitivanje uzorka H3 na dejstvo dinamičkog opterećenja								
12n	114,7	47,5	13,0	107,0	51,1	14,0	107,2	43,2	14,3									
16n	113,7	48,0	13,8	105,8	51,7	14,9	106,1	43,2	15,1									
20n	112,9	48,3	14,4	104,7	52,2	15,8	105,3	43,2	15,8									
24n	112,1	48,7	15,0	104,5	52,3	16,0	105,1	43,2	16,0									
28n	111,8	48,9	15,3	104,1	52,5	16,3	104,8	43,2	16,2									
32n	111,1	49,2	15,8	103,4	52,8	16,9	104,2	43,2	16,6									
36n	110,0	49,7	16,6	103,6	52,7	16,7	104,5	43,2	16,4									
40n	109,7	49,8	16,8	103,4	52,8	16,9	104,3	43,2	16,6									
44n	103,9	52,5	21,2	103,3	52,9	17,0	104,6	44,2	16,4									
48n	99,9	54,3	24,3	103,2	52,9	17,1	104,6	45,2	16,4									
52n	99,6	54,4	24,5	102,9	53,0	17,3	104,3	46,2	16,6									
56n	99,5	54,5	24,6	103,1	52,9	17,2	104,8	47,2	16,2									
60n	96,1	56,0	27,1	103,1	52,9	17,1	105,0	48,2	16,0									

Tabela 4.12: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H12 i H13

Vreme t	Uzorak H12									Uzorak H13								
	H55C01.1			H55C02.1			H55C03.1			H55C01.2			H55C02.2			H55C03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	230,9	0,0	/	223,7	0,0	/	226,2	0,0	/	244,3	0,0	/	229,6	0,0	/	221,7	0,0	/
$t_3=10s$	148,4	35,7	0,0	134,9	39,7	0,0	133,9	40,8	0,0	151,9	37,8	0,0	134,2	41,5	0,0	132,3	40,4	0,0
1min	146,2	36,7	1,5	132,9	40,6	1,4	131,8	41,7	1,5	149,9	38,6	1,3	132,1	42,4	1,6	130,7	41,1	1,2
10min	143,9	37,7	3,1	130,5	41,7	3,2	129,3	42,8	3,4	147,5	39,6	2,9	129,5	43,6	3,5	128,4	42,1	3,0
1h	141,6	38,7	4,6	128,0	42,8	5,1	126,8	44,0	5,3	144,9	40,7	4,5	127,4	44,5	5,1	125,8	43,3	4,9
12h	137,8	40,3	7,2	124,0	44,6	8,1	122,7	45,7	8,3	140,9	42,3	7,2	123,7	46,1	7,8	121,7	45,1	8,0
24h	136,8	40,7	7,8	123,0	45,0	8,8	121,6	46,2	9,1	139,9	42,7	7,9	122,4	46,7	8,8	120,7	45,6	8,8
1n	133,6	42,1	10,0	119,8	46,5	11,2	118,1	47,8	11,8	136,7	44,1	10,0	116,7	49,2	13,1	117,2	47,1	11,4
4n	130,6	43,4	12,0	116,6	47,9	13,5	115,1	49,1	14,0	133,7	45,3	12,0	116,0	49,5	13,6	113,6	48,8	14,1
8n	130,0	43,7	12,4	115,9	48,2	14,1	114,1	49,6	14,8	132,8	45,6	12,5	112,8	50,9	16,0	112,8	49,1	14,7
12n	128,9	44,2	13,1	114,9	48,7	14,8	113,0	50,1	15,6	131,7	46,1	13,3	110,3	52,0	17,8	111,4	49,7	15,7
16n	128,1	44,5	13,7	113,9	49,1	15,6	111,2	50,9	16,9	130,7	46,5	13,9	107,2	53,3	20,2	110,5	50,1	16,4
20n	127,7	44,7	14,0	113,6	49,2	15,7	110,4	51,2	17,5	130,1	46,7	14,3	105,4	54,1	21,5	110,0	50,4	16,8
24n	127,7	44,7	13,9	114,5	48,8	15,1	110,2	51,3	17,7	130,1	46,8	14,4	103,6	54,9	22,8	110,1	50,3	16,8

Tabela 4.13: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku H4

Vreme t	Uzorak H4								
	H70B01			H70B02			H70B03		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]
$t_0=0s$	223,3	0,0		224,5	0,0	/	246,3	0,0	/
$t_3=10s$	165,5	25,9	0,0	169,6	24,4	0,0	190,9	22,5	0,0
1min	163,8	26,6	1,0	167,7	25,3	1,1	189,1	23,2	0,9
10min	163,3	26,9	1,4	168,6	24,9	0,6	188,5	23,5	1,3
1h	162,3	27,3	1,9	167,4	25,4	1,3	187,7	23,8	1,7
12h	160,8	28,0	2,9	166,7	25,7	1,7	187,0	24,1	2,0
24h	160,4	28,2	3,1	166,5	25,8	1,9	186,9	24,1	2,1
1n	248,2	-11,2	-49,9	165,0	26,5	2,8	185,6	24,6	2,8
4n	311,6	-39,5	-88,2	163,4	27,2	3,7	183,2	25,6	4,1
8n	310,7	-39,2	-87,7	162,9	27,4	3,9	182,6	25,9	4,3
12n	310,3	-39,0	-87,4	162,1	27,8	4,4	181,9	26,2	4,7
16n	308,9	-38,3	-86,6	160,8	28,4	5,2	180,5	26,7	5,4
20n	307,3	-37,6	-85,6	159,7	28,8	5,8	179,4	27,2	6,0
24n	307,0	-37,5	-85,4	159,4	29,0	6,0	179,2	27,3	6,1
28n	306,3	-37,2	-85,0	159,2	29,1	6,1	178,7	27,4	6,4
32n	305,2	-36,7	-84,3	158,8	29,3	6,4	178,0	27,7	6,7
36n	305,8	-36,9	-84,7	158,9	29,2	6,3	178,3	27,6	6,6
40n	305,3	-36,7	-84,4	158,5	29,4	6,6	178,0	27,7	6,8
44n	305,5	-36,8	-84,5	158,5	29,4	6,6	177,9	27,8	6,8
48n	305,8	-36,9	-84,7	158,2	29,5	6,8	177,9	27,8	6,8
52n	305,5	-36,8	-84,5	157,7	29,8	7,1	177,6	27,9	7,0
56n	305,8	-37,0	-84,8	157,7	29,7	7,0	177,8	27,8	6,9
60n	306,2	-37,1	-84,9	157,9	29,7	6,9	177,8	27,8	6,9

Tabela 4.14: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H14 i H15

Vreme t	Uzorak H14									Uzorak H15								
	H70B01.1			H70B02.1			H70B03.1			H70B01.2			H70B02.2			H70B03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	235,7	0,0	/	245,4	0,0	/	238,9	0,0	/	242,0	0,0	/	235,2	0,0	/	236,3	0,0	/
$t_3=10s$	177,0	24,9	0,0	186,4	24,0	0,0	178,0	25,5	0,0	184,2	23,9	0,0	174,4	25,9	0,0	177,3	25,0	0,0
1min	175,4	25,6	0,9	184,8	24,7	0,9	176,2	26,3	1,0	182,3	24,6	1,0	172,8	26,5	0,9	175,4	25,8	1,1
10min	174,8	25,8	1,2	184,4	24,9	1,1	175,8	26,4	1,2	181,9	24,8	1,3	172,6	26,6	1,0	175,3	25,8	1,1
1h	174,0	26,2	1,7	183,5	25,2	1,6	174,7	26,9	1,8	180,8	25,3	1,9	172,0	26,9	1,4	174,7	26,1	1,5
12h	172,4	26,8	2,6	182,2	25,8	2,3	162,0	32,2	9,0	179,1	26,0	2,8	171,2	27,2	1,8	173,4	26,6	2,2
24h	172,1	27,0	2,8	181,9	25,9	2,4	160,4	32,9	9,9	178,8	26,1	2,9	171,2	27,2	1,8	173,0	26,8	2,4
1n	171,0	27,5	3,4	181,0	26,2	2,9	158,2	33,8	11,1	178,0	26,5	3,4	170,7	27,4	2,1	171,4	27,5	3,3
4n	168,7	28,4	4,7	179,6	26,8	3,6	156,1	34,7	12,3	176,4	27,1	4,2	169,4	28,0	2,9	169,1	28,4	4,6
8n	168,2	28,6	5,0	179,2	27,0	3,9	155,3	35,0	12,8	176,0	27,3	4,4	169,1	28,1	3,0	168,3	28,8	5,0
12n	167,5	28,9	5,4	178,4	27,3	4,3	154,6	35,3	13,1	175,3	27,6	4,9	168,7	28,3	3,3	168,3	28,8	5,1
16n	166,6	29,3	5,9	177,6	27,6	4,8	153,5	35,8	13,8	174,5	27,9	5,3	168,0	28,6	3,7	168,3	28,8	5,1
20n	166,1	29,5	6,2	177,0	27,9	5,1	152,8	36,1	14,2	174,1	28,0	5,5	167,5	28,8	3,9	168,3	28,8	5,1
24n	166,2	29,5	6,1	177,3	27,7	4,9	152,9	36,0	14,1	174,8	27,8	5,1	167,5	28,8	4,0	168,3	28,8	5,1

Tabela 4.15: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H5 i H6

Vreme <i>t</i>	Uzorak H5									Uzorak H6								
	H70C01			H70C02			H70C03			H70C11			H70C12			H70C13		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]
t₀=0s	231,3	0,0	/	228,0	0,0	/	232,3	0,0	/	246,1	0,0	/	218,1	0,0	/	247,3	0,0	/
t₃=10s	174,5	24,6	0,0	164,1	28,0	0,0	172,5	25,7	0,0	179,8	26,9	0,0	156,3	28,3	0,0	191,4	22,6	0,0
1min	172,6	25,4	1,1	161,8	29,1	1,4	170,2	26,7	1,4	177,5	27,9	1,3	154,2	29,3	1,3	189,2	23,5	1,1
10min	171,3	26,0	1,9	159,7	30,0	2,7	169,1	27,2	2,0	177,1	28,0	1,5	152,8	30,0	2,3	187,9	24,0	1,8
1h	169,3	26,8	3,0	157,1	31,1	4,2	166,9	28,1	3,3	175,0	28,9	2,7	150,6	31,0	3,7	185,7	24,9	3,0
12h	166,3	28,1	4,7	153,3	32,8	6,6	163,8	29,5	5,0	171,9	30,1	4,4	147,2	32,5	5,8	182,4	26,3	4,7
24h	165,5	28,4	5,1	152,2	33,2	7,2	163,0	29,8	5,5	171,4	30,3	4,6	146,3	32,9	6,4	181,5	26,6	5,2
1n	162,5	29,7	6,9	147,8	35,2	9,9	159,7	31,3	7,5	169,5	31,1	5,7	143,5	34,2	8,2	179,0	27,6	6,5
4n	160,6	30,6	8,0	145,2	36,3	11,5	157,7	32,1	8,6	167,5	31,9	6,8	140,8	35,5	9,9	176,5	28,7	7,8
8n	159,5	31,0	8,6	143,8	36,9	12,4	156,7	32,6	9,2	Ispitivanje uzorka H6 na dejstvo dinamičkog opterećenja								
12n	158,7	31,4	9,0	142,6	37,5	13,1	155,7	33,0	9,7									
16n	157,2	32,0	9,9	140,7	38,3	14,3	154,1	33,6	10,7									
20n	155,8	32,6	10,7	138,8	39,1	15,4	152,7	34,3	11,5									
24n	155,7	32,7	10,8	138,3	39,4	15,7	152,3	34,4	11,7									
28n	155,2	32,9	11,1	137,5	39,7	16,2	151,7	34,7	12,1									
32n	154,2	33,3	11,6	136,4	40,2	16,9	150,7	35,1	12,6									
36n	154,6	33,1	11,4	136,8	40,0	16,6	151,0	35,0	12,5									
40n	154,1	33,4	11,7	135,4	40,6	17,5	150,6	35,2	12,7									
44n	154,2	33,3	11,6	139,6	38,8	15,0	150,3	35,3	12,9									
48n	154,2	33,3	11,6	140,9	38,2	14,1	150,2	35,3	12,9									
52n	154,0	33,4	11,7	140,8	38,3	14,2	150,0	35,4	13,1									
56n	154,1	33,4	11,7	141,4	38,0	13,8	150,2	35,3	12,9									
60n	154,4	33,2	11,5	142,6	37,4	13,1	150,4	35,3	12,8									

Tabela 4.16: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H16 i H17

Vreme t	Uzorak H16									Uzorak H17								
	H70C01.1			H70C02.1			H70C03.1			H70C01.2			H70C02.2			H70C03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
t₀=0s	242,3	0,0	/	216,5	0,0	/	238,0	0,0	/	249,1	0,0	/	248,1	0,0	/	239,0	0,0	/
t₃=10s	182,1	24,8	0,0	151,2	30,2	0,0	173,0	27,3	0,0	186,4	25,2	0,0	182,3	26,5	0,0	168,9	29,31	0,0
1min	179,8	25,8	1,3	148,6	31,4	1,7	170,6	28,3	1,4	184,0	26,1	1,3	179,9	27,5	1,3	166,5	30,32	1,4
10min	178,5	26,3	2,0	146,3	32,4	3,2	169,2	28,9	2,2	181,8	27,0	2,5	178,7	28,0	2,0	165,1	30,93	2,3
1h	176,0	27,3	3,4	143,9	33,5	4,8	167,2	29,7	3,4	179,5	27,9	3,7	176,5	28,9	3,2	163,0	31,81	3,5
12h	172,8	28,7	5,1	139,6	35,5	7,7	163,7	31,2	5,4	175,7	29,5	5,7	173,3	30,2	4,9	159,3	33,37	5,7
24h	172,0	29,0	5,6	138,5	36,0	8,4	162,8	31,6	5,9	174,2	30,1	6,5	172,4	30,5	5,4	158,3	33,76	6,3
1n	169,6	30,0	6,9	135,8	37,3	10,2	160,2	32,7	7,4	169,1	32,1	9,3	169,1	31,8	7,2	155,4	34,96	8,0
4n	167,2	31,0	8,2	133,2	38,5	11,9	157,8	33,7	8,8	165,3	33,7	11,3	166,5	32,9	8,7	152,6	36,17	9,7
8n	166,8	31,2	8,4	132,9	38,6	12,1	157,3	33,9	9,1	163,9	34,2	12,1	163,8	34,0	10,2	151,9	36,45	10,1
12n	166,1	31,4	8,8	132,3	38,9	12,5	156,1	34,4	9,8	162,2	34,9	13,0	162,8	34,4	10,7	150,6	37,01	10,9
16n	165,4	31,7	9,2	131,7	39,2	12,9	154,8	34,9	10,5	160,4	35,6	13,9	161,6	34,9	11,3	149,3	37,53	11,6
20n	165,0	31,9	9,4	131,5	39,3	13,0	154,1	35,2	11,0	159,1	36,1	14,6	160,9	35,2	11,8	148,5	37,87	12,1
24n	165,1	31,9	9,4	131,7	39,2	12,9	154,5	35,1	10,7	159,5	36,0	14,4	160,9	35,1	11,7	149,5	37,43	11,5

Tabela 4.17: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku H7

Vreme t	Uzorak H7								
	H85B01			H85B02			H85B03		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]
$t_0=0s$	230,8	0,0	/	224,0	0,0	/	221,8	0,0	/
$t_3=10s$	175,7	23,9	0,0	172,4	23,0	0,0	179,7	19,0	0,0
1min	173,9	24,6	1,0	170,6	23,8	1,0	177,9	19,8	1,0
10min	172,9	25,1	1,6	169,4	24,4	1,7	177,7	19,9	1,1
1h	172,2	25,4	2,0	168,4	24,8	2,3	176,4	20,5	1,8
12h	170,9	26,0	2,7	166,8	25,5	3,2	175,5	20,9	2,3
24h	170,4	26,2	3,0	166,0	25,9	3,7	175,2	21,0	2,5
1n	169,0	26,8	3,8	163,8	26,8	4,9	174,2	21,5	3,1
4n	168,2	27,1	4,3	162,6	27,4	5,7	173,4	21,8	3,5
8n	167,4	27,5	4,7	162,0	27,7	6,0	173,0	22,0	3,7
12n	166,7	27,8	5,1	161,6	27,8	6,2	172,7	22,2	3,9
16n	165,2	28,4	6,0	160,1	28,5	7,1	171,5	22,7	4,5
20n	163,8	29,1	6,8	158,4	29,3	8,1	170,3	23,2	5,2
24n	163,5	29,2	6,9	158,1	29,4	8,3	169,9	23,4	5,4
28n	162,7	29,5	7,4	157,4	29,7	8,7	169,4	23,7	5,7
32n	161,6	30,0	8,0	156,1	30,3	9,4	168,6	24,0	6,2
36n	161,8	29,9	7,9	156,4	30,2	9,3	168,7	24,0	6,1
40n	161,5	30,0	8,1	155,8	30,4	9,6	168,3	24,1	6,3
44n	161,3	30,1	8,2	155,5	30,6	9,8	168,2	24,2	6,4
48n	161,4	30,1	8,1	155,4	30,6	9,8	168,1	24,2	6,4
52n	161,5	30,0	8,1	155,2	30,7	10,0	167,9	24,3	6,6
56n	161,8	29,9	7,9	155,6	30,5	9,7	168,0	24,3	6,5
60n	161,9	29,8	7,8	155,9	30,4	9,6	168,1	24,2	6,4

Tabela 4.18: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H18 i H19

Vreme t	Uzorak H18									Uzorak H19								
	H85B01.1			H85B02.1			H85B03.1			H85B01.2			H85B02.2			H85B03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	232,6	0,0	/	214,8	0,0	/	234,5	0,0	/	258,6	0,0	/	230,3	0,0	/	241,6	0,0	/
$t_3=10s$	183,4	21,1	0,0	167,8	21,9	0,0	184,5	21,3	0,0	210,9	18,5	0,0	178,7	22,4	0,0	192,2	20,4	0,0
1min	181,8	21,8	0,9	166,3	22,6	0,9	182,8	22,0	0,9	208,9	19,2	1,0	177,1	23,1	0,9	190,5	21,1	0,9
10min	181,3	22,0	1,1	166,1	22,7	1,0	182,6	22,1	1,0	208,9	19,2	1,0	176,9	23,2	1,0	190,3	21,2	1,0
1h	180,7	22,3	1,5	165,5	22,9	1,4	181,7	22,5	1,5	209,1	19,1	0,8	176,1	23,5	1,5	189,8	21,5	1,3
12h	179,0	23,0	2,4	164,4	23,5	2,0	180,2	23,1	2,3	208,9	19,2	0,9	174,8	24,1	2,2	189,0	21,8	1,7
24h	178,7	23,2	2,6	164,2	23,5	2,1	179,9	23,3	2,5	208,9	19,2	0,9	174,5	24,2	2,3	188,9	21,8	1,7
1n	177,8	23,6	3,1	163,7	23,8	2,4	178,9	23,7	3,0	208,8	19,3	1,0	173,5	24,6	2,9	188,4	22,0	2,0
4n	176,3	24,2	3,9	162,3	24,4	3,2	177,4	24,4	3,8	207,9	19,6	1,4	172,0	25,3	3,7	187,3	22,5	2,6
8n	175,9	24,4	4,1	162,3	24,4	3,3	177,1	24,5	4,0	207,6	19,7	1,6	171,5	25,5	4,0	187,8	22,3	2,3
12n	175,2	24,7	4,5	161,6	24,7	3,7	176,3	24,8	4,4	206,7	20,1	2,0	170,4	26,0	4,6	187,2	22,5	2,6
16n	174,5	25,0	4,9	161,1	25,0	4,0	175,6	25,1	4,8	205,7	20,5	2,5	169,2	26,5	5,3	186,7	22,7	2,8
20n	174,2	25,1	5,1	160,8	25,1	4,2	175,0	25,3	5,1	204,8	20,8	2,9	168,3	26,9	5,8	186,3	22,9	3,1
24n	173,9	25,2	5,2	161,1	25,0	4,0	175,3	25,2	4,9	205,6	20,5	2,5	168,6	26,8	5,7	186,7	22,7	2,9

Tabela 4.19: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H8 i H9

Vreme t	Uzorak H8									Uzorak H9								
	H85C01			H85C02			H85C03			H85C11			H85C12			H85C13		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]
$t_0=0s$	239,6	0,0	/	227,2	0,0	/	231,0	0,0	/	240,0	0,0	/	240,6	0,0	/	233,9	0,0	/
$t_3=10s$	188,9	21,2	0,0	177,9	21,7	0,0	184,2	20,2	0,0	192,3	19,8	0,0	188,4	21,7	0,0	184,4	21,1	0,0
1min	186,4	22,2	1,3	175,5	22,8	1,4	181,6	21,4	1,4	190,2	20,7	1,1	186,1	22,7	1,2	182,4	22,0	1,1
10min	185,7	22,5	1,7	174,8	23,1	1,8	180,8	21,7	1,9	188,7	21,4	1,9	186,4	22,5	1,1	181,0	22,6	1,9
1h	184,0	23,2	2,6	173,3	23,7	2,6	179,0	22,5	2,8	186,8	22,2	2,9	186,9	22,3	0,8	179,0	23,5	2,9
12h	181,5	24,3	3,9	170,8	24,8	4,0	176,4	23,6	4,2	183,9	23,4	4,4	185,1	23,1	1,7	176,1	24,7	4,5
24h	180,5	24,6	4,4	170,0	25,2	4,5	175,5	24,0	4,7	183,2	23,7	4,8	183,6	23,7	2,5	175,4	25,0	4,9
1n	177,8	25,8	5,9	167,4	26,3	5,9	172,8	25,2	6,2	180,4	24,8	6,2	183,2	23,9	2,7	173,3	25,9	6,0
4n	176,0	26,6	6,9	165,7	27,1	6,9	171,4	25,8	6,9	177,5	26,0	7,7	197,3	18,0	-4,8	171,7	26,6	6,9
8n	175,1	26,9	7,3	165,2	27,3	7,1	170,6	26,1	7,4	Ispitivanje uzorka H9 na dejstvo dinamičkog opterećenja								
12n	174,6	27,1	7,6	165,1	27,3	7,2	170,2	26,3	7,6									
16n	173,1	27,7	8,4	164,4	27,6	7,6	169,0	26,8	8,2									
20n	171,9	28,3	9,0	163,7	28,0	8,0	167,7	27,4	8,9									
24n	171,6	28,4	9,2	163,7	28,0	8,0	167,5	27,5	9,1									
28n	171,2	28,6	9,4	163,4	28,1	8,2	167,0	27,7	9,4									
32n	170,4	28,9	9,8	162,8	28,4	8,5	166,0	28,1	9,9									
36n	170,7	28,8	9,7	163,0	28,3	8,4	166,4	27,9	9,7									
40n	170,4	28,9	9,8	162,9	28,3	8,5	166,1	28,1	9,8									
44n	170,4	28,9	9,8	162,8	28,4	8,5	166,0	28,1	9,9									
48n	170,2	28,9	9,9	162,9	28,3	8,5	166,0	28,1	9,9									
52n	170,0	29,0	10,0	162,8	28,4	8,5	165,9	28,2	9,9									
56n	170,3	28,9	9,8	163,0	28,3	8,4	166,2	28,0	9,8									
60n	170,5	28,8	9,7	163,1	28,2	8,3	166,3	28,0	9,7									

Tabela 4.20: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima H20 i H21

Vreme t	Uzorak H20									Uzorak H21								
	H85C01.1			H85C02.1			H85C03.1			H85C01.2			H85C02.2			H85C03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	237,4	0,0	/	224,7	0,0	/	231,6	0,0	/	232,2	0,0	/	237,9	0,0	/	224,0	0,0	/
$t_3=10s$	186,7	21,4	0,0	172,8	23,1	0,0	179,4	22,5	0,0	182,2	21,5	0,0	185,6	22,0	0,0	173,1	22,7	0,0
1min	184,7	22,2	1,1	169,3	24,7	2,0	177,6	23,3	1,0	179,5	22,7	1,5	183,5	22,9	1,1	170,4	23,9	1,6
10min	184,1	22,5	1,4	168,7	24,9	2,4	176,8	23,7	1,5	177,7	23,4	2,4	182,6	23,2	1,6	169,9	24,1	1,8
1h	182,6	23,1	2,2	167,2	25,6	3,3	175,1	24,4	2,4	174,9	24,7	4,0	181,1	23,9	2,4	168,5	24,8	2,7
12h	179,9	24,2	3,7	164,1	27,0	5,0	172,1	25,7	4,1	171,6	26,1	5,8	178,6	24,9	3,8	166,0	25,9	4,1
24h	179,1	24,5	4,1	163,2	27,4	5,5	171,4	26,0	4,5	170,9	26,4	6,2	177,9	25,2	4,2	165,4	26,2	4,5
1n	176,6	25,6	5,4	160,1	28,8	7,4	169,0	27,0	5,8	168,6	27,4	7,5	175,8	26,1	5,3	163,3	27,1	5,7
4n	174,4	26,6	6,6	155,0	31,0	10,3	166,4	28,2	7,3	166,3	28,4	8,7	173,7	27,0	6,4	162,0	27,7	6,4
8n	173,8	26,8	6,9	153,8	31,6	11,0	165,6	28,5	7,7	165,4	28,7	9,2	173,1	27,2	6,7	161,4	28,0	6,8
12n	173,0	27,1	7,4	152,7	32,0	11,6	164,8	28,8	8,1	164,7	29,1	9,6	172,3	27,6	7,2	160,9	28,2	7,1
16n	172,1	27,5	7,8	151,7	32,5	12,2	164,0	29,2	8,6	163,8	29,4	10,1	171,4	28,0	7,7	160,6	28,3	7,2
20n	171,6	27,7	8,1	151,0	32,8	12,6	163,4	29,4	8,9	163,3	29,7	10,4	170,9	28,2	8,0	160,4	28,4	7,3
24n	171,5	27,8	8,2	150,8	32,9	12,7	163,1	29,6	9,1	163,4	29,6	10,3	171,3	28,0	7,7	159,9	28,6	7,6

Tabela 4.21: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku D1

Vreme t	Uzorak D1								
	D50B01			D50B02			D50B03		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]
$t_0=0s$	187,4	/	/	198,2	/	/	215,7	/	/
$t_3=10s$	179,0	4,5	/	188,8	4,7	/	203,2	5,8	/
1min	177,1	5,5	1,1	186,8	5,8	1,1	200,5	7,0	1,3
10min	174,9	6,7	2,3	183,8	7,3	2,7	197,8	8,3	2,6
1h	172,9	7,7	3,4	181,7	8,3	3,8	194,4	9,8	4,3
12h	170,1	9,2	5,0	178,8	9,8	5,3	191,4	11,2	5,8
24h	169,4	9,6	5,3	178,2	10,1	5,6	190,8	11,5	6,1
1n	166,4	11,2	7,1	175,9	11,3	6,9	187,9	12,9	7,5
4n	164,4	12,3	8,2	174,4	12,0	7,6	186,1	13,7	8,4
8n	163,5	12,7	8,6	173,9	12,3	7,9	185,2	14,1	8,8
12n	163,1	13,0	8,9	173,8	12,3	7,9	184,8	14,3	9,0
16n	161,9	13,6	9,5	173,1	12,7	8,3	183,7	14,8	9,6
20n	160,7	14,2	10,2	172,1	13,2	8,9	182,5	15,4	10,2
24n	160,5	14,4	10,4	172,0	13,2	8,9	182,3	15,5	10,2
28n	159,9	14,7	10,7	171,6	13,4	9,1	181,9	15,7	10,5
32n	159,0	15,2	11,2	170,8	13,8	9,5	181,0	16,1	10,9
36n	159,5	14,9	10,9	171,1	13,7	9,4	181,2	16,0	10,8
40n	159,1	15,1	11,1	170,9	13,8	9,5	180,9	16,1	10,9
44n	159,4	14,9	11,0	170,8	13,8	9,5	180,7	16,2	11,1
48n	159,8	14,8	10,8	170,8	13,8	9,5	180,6	16,2	11,1
52n	159,5	14,9	10,9	170,7	13,9	9,6	180,4	16,3	11,2
56n	159,8	14,7	10,8	171,0	13,7	9,4	180,6	16,2	11,1
60n	159,9	14,7	10,7	171,2	13,6	9,3	180,7	16,2	11,1

Tabela 4.22: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D10 i D11

Vreme t	Uzorak D10									Uzorak D11								
	D50B01.1			D50B02.1			D50B03.1			D50B01.2			D50B02.2			D50B03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	160,7	/	/	164,7	/	/	163,2	/	/	173,7	/	/	185,6	/	/	178,0	/	/
$t_3=10s$	155,2	3,4	/	157,4	4,5	/	156,0	4,4	/	169,2	2,6	/	178,1	4,1	/	172,6	3,1	/
1min	153,6	4,4	1,0	155,6	5,6	1,2	154,6	5,3	0,9	168,2	3,2	0,6	176,4	5,0	0,9	171,8	3,5	0,4
10min	152,2	5,3	1,9	155,3	5,7	1,3	153,0	6,2	1,9	166,4	4,2	1,6	175,7	5,3	1,3	170,7	4,1	1,1
1h	152,0	5,4	2,0	154,3	6,4	2,0	152,2	6,7	2,4	166,2	4,3	1,8	175,1	5,6	1,6	170,1	4,4	1,4
12h	150,7	6,2	2,9	152,8	7,2	2,9	150,7	7,7	3,4	164,4	5,4	2,8	173,8	6,4	2,4	169,2	5,0	2,0
24h	150,4	6,4	3,1	152,5	7,4	3,1	150,2	8,0	3,7	164,1	5,6	3,0	173,4	6,6	2,6	169,0	5,1	2,1
1n	149,8	6,8	3,5	151,4	8,1	3,8	149,2	8,6	4,4	163,2	6,1	3,6	172,2	7,2	3,3	168,2	5,5	2,5
4n	148,3	7,7	4,4	149,7	9,1	4,9	147,4	9,6	5,5	161,6	7,0	4,5	171,2	7,7	3,8	167,4	5,9	3,0
8n	147,8	8,0	4,8	149,0	9,6	5,4	146,6	10,2	6,0	161,3	7,2	4,7	170,4	8,2	4,3	167,0	6,2	3,2
12n	146,9	8,6	5,3	147,8	10,3	6,1	145,5	10,8	6,7	159,8	8,0	5,6	168,2	9,3	5,5	165,7	6,9	4,0
16n	147,1	8,4	5,2	147,8	10,3	6,1	145,3	11,0	6,9	160,1	7,8	5,4	167,3	9,8	6,0	165,5	7,1	4,1
20n	147,0	8,5	5,3	147,6	10,4	6,2	144,8	11,3	7,2	160,2	7,8	5,3	166,3	10,4	6,6	165,2	7,2	4,3
24n	147,0	8,5	5,3	147,6	10,4	6,2	144,5	11,5	7,4	160,6	7,6	5,1	165,1	11,0	7,3	165,0	7,3	4,4

Tabela 4.23: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D2 i D3

Vreme t	Uzorak D2									Uzorak D3								
	D50C01			D50C02			D50C03			D50C11			D50C12			D50C13		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]
$t_0=0s$	176,7	/	/	196,1	/	/	171,1	/	/	205,2	/	/	199,9	/	/	202,9	/	/
$t_3=10s$	167,7	5,1	/	184,5	5,9	/	160,1	6,4	/	194,5	5,2	/	188,7	5,6	/	192,8	5,0	/
1min	164,8	6,7	1,7	181,5	7,4	1,6	157,5	8,0	1,6	190,8	7,0	1,9	185,6	7,2	1,6	190,0	6,4	1,5
10min	161,2	8,8	3,9	177,9	9,3	3,5	153,6	10,2	4,1	180,9	11,8	7,0	182,0	9,0	3,5	186,2	8,2	3,4
1h	158,2	10,5	5,7	174,8	10,9	5,3	150,7	11,9	5,9	175,9	14,3	9,6	178,5	10,7	5,4	182,2	10,2	5,5
12h	153,5	13,1	8,5	170,2	13,2	7,7	146,3	14,5	8,6	170,3	17,0	12,4	173,7	13,1	7,9	176,5	13,0	8,5
24h	152,3	13,8	9,2	169,1	13,8	8,3	145,2	15,2	9,3	168,6	17,8	13,3	172,4	13,8	8,6	175,0	13,8	9,3
1n	148,3	16,1	11,6	165,5	15,6	10,3	140,9	17,7	12,0	164,2	20,0	15,6	168,7	15,6	10,6	170,8	15,8	11,4
4n	145,8	17,5	13,1	163,4	16,7	11,4	138,1	19,3	13,7	160,5	21,8	17,5	165,7	17,2	12,2	167,5	17,5	13,1
8n	144,8	18,1	13,7	162,7	17,1	11,8	137,1	19,9	14,4	Ispitivanje uzorka D3 na dejstvo dinamičkog opterećenja								
12n	144,1	18,5	14,1	162,4	17,2	12,0	136,6	20,2	14,7									
16n	142,9	19,2	14,8	161,3	17,8	12,6	135,5	20,8	15,4									
20n	141,9	19,7	15,4	160,0	18,4	13,3	134,5	21,4	16,0									
24n	141,7	19,8	15,5	159,9	18,5	13,3	134,4	21,5	16,1									
28n	141,3	20,0	15,7	159,4	18,7	13,6	133,9	21,8	16,4									
32n	140,7	20,4	16,1	158,3	19,3	14,2	133,1	22,2	16,9									
36n	140,8	20,3	16,1	158,7	19,1	14,0	133,6	21,9	16,5									
40n	140,4	20,5	16,3	158,3	19,3	14,2	133,3	22,1	16,7									
44n	140,4	20,6	16,3	158,5	19,2	14,1	135,3	21,0	15,5									
48n	140,2	20,6	16,4	158,7	19,1	14,0	135,3	20,9	15,5									
52n	140,0	20,8	16,5	158,5	19,2	14,1	135,2	21,0	15,6									
56n	140,2	20,7	16,4	158,9	19,0	13,9	135,5	20,8	15,4									
60n	140,4	20,6	16,3	159,1	18,9	13,8	135,8	20,6	15,2									

Tabela 4.24: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D12 i D13

Vreme t	Uzorak D12									Uzorak D13								
	D50C01.1			D50C02.1			D50C03.1			D50C01.2			D50C02.2			D50C03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	161,7	/	/	169,5	/	/	163,2	/	/	172,0	/	/	173,1	/	/	192,7	/	/
$t_3=10s$	153,9	4,8	/	161,4	4,7	/	154,8	5,2	/	165,5	3,8	/	166,4	3,9	/	184,0	4,5	/
1min	151,0	6,6	1,9	158,6	6,4	1,7	152,4	6,6	1,5	163,3	5,1	1,3	164,2	5,1	1,3	181,6	5,8	1,3
10min	148,3	8,3	3,7	155,7	8,1	3,6	149,2	8,6	3,6	159,3	7,4	3,7	158,6	8,4	4,7	179,0	7,1	2,7
1h	146,1	9,6	5,1	152,8	9,8	5,3	146,9	10,0	5,1	156,9	8,8	5,2	155,1	10,4	6,8	176,4	8,5	4,1
12h	141,9	12,2	7,8	149,0	12,1	7,7	142,8	12,5	7,7	152,7	11,2	7,7	148,5	14,2	10,8	172,2	10,6	6,4
24h	141,1	12,7	8,3	147,9	12,7	8,4	141,9	13,1	8,3	151,8	11,7	8,3	151,7	12,3	8,8	171,2	11,1	6,9
1n	138,2	14,5	10,2	144,5	14,7	10,5	138,5	15,2	10,5	149,0	13,3	10,0	149,4	13,7	10,3	168,6	12,5	8,4
4n	135,3	16,3	12,1	141,2	16,7	12,6	131,8	19,3	14,9	146,9	14,6	11,3	147,2	15,0	11,6	166,1	13,8	9,8
8n	133,5	17,4	13,3	139,8	17,5	13,4	130,1	20,3	15,9	145,5	15,4	12,1	146,0	15,6	12,3	165,0	14,4	10,3
12n	131,2	18,8	14,7	138,4	18,3	14,3	127,3	22,0	17,8	144,1	16,2	12,9	145,2	16,1	12,7	164,0	14,9	10,9
16n	131,0	19,0	14,9	137,9	18,6	14,6	127,1	22,2	17,9	144,0	16,3	13,0	144,5	16,5	13,2	164,0	14,9	10,9
20n	130,5	19,3	15,2	137,2	19,0	15,0	128,5	21,3	16,9	143,5	16,6	13,3	143,3	17,2	13,9	163,5	15,2	11,1
24n	130,3	19,4	15,4	136,6	19,4	15,4	128,6	21,2	16,9	143,2	16,7	13,5	142,1	17,9	14,6	163,4	15,2	11,2

Tabela 4.25: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku D4

Vreme t	Uzorak D4								
	D70B01			D70B02			D70B03		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t}$ [%]
$t_0=0s$	189,7	/	/	204,4	/	/	200,2	/	/
$t_3=10s$	180,1	5,1	/	193,6	5,3	/	193,9	3,1	/
1min	178,7	5,8	0,8	191,1	6,5	1,3	192,0	4,1	1,0
10min	176,9	6,8	1,8	188,0	8,0	2,9	189,2	5,5	2,4
1h	175,2	7,7	2,7	185,2	9,4	4,4	186,1	7,0	4,1
12h	172,4	9,1	4,2	182,1	10,9	6,0	182,3	8,9	6,0
24h	171,8	9,5	4,6	181,5	11,2	6,3	181,5	9,3	6,4
1n	169,3	10,8	6,0	178,9	12,5	7,6	178,4	10,9	8,0
4n	167,5	11,7	7,0	177,4	13,2	8,4	176,4	11,9	9,1
8n	166,9	12,0	7,3	176,4	13,7	8,9	175,7	12,2	9,4
12n	166,7	12,1	7,4	175,9	13,9	9,1	175,5	12,3	9,5
16n	165,9	12,6	7,9	174,8	14,5	9,7	174,3	12,9	10,1
20n	164,8	13,1	8,5	173,5	15,1	10,4	172,9	13,6	10,8
24n	164,7	13,2	8,5	173,2	15,3	10,5	172,6	13,8	11,0
28n	164,2	13,5	8,8	172,7	15,5	10,8	172,1	14,0	11,3
32n	163,2	14,0	9,4	171,8	16,0	11,3	171,2	14,5	11,7
36n	163,6	13,8	9,1	172,0	15,9	11,2	171,6	14,3	11,5
40n	163,3	13,9	9,3	171,6	16,0	11,4	171,1	14,5	11,8
44n	163,2	14,0	9,4	171,4	16,1	11,5	171,5	14,3	11,6
48n	163,3	13,9	9,3	171,3	16,2	11,5	171,4	14,4	11,6
52n	163,1	14,0	9,4	171,0	16,3	11,7	171,0	14,6	11,8
56n	163,5	13,8	9,2	171,1	16,3	11,6	171,2	14,5	11,7
60n	163,7	13,7	9,1	171,2	16,2	11,6	171,3	14,4	11,6

Tabela 4.26: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D14 i D15

Vreme t	Uzorak D14									Uzorak D15								
	D70B01.1			D70B02.1			D70B03.1			D70B01.2			D70B02.2			D70B03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	166,2	/	/	161,9	/	/	177,6	/	/	171,1	/	/	174,4	/	/	174,0	/	/
$t_3=10s$	161,1	3,1	/	156,5	3,3	/	172,0	3,2	/	166,5	2,7	/	169,1	3,0	/	171,1	1,6	/
1min	159,9	3,8	0,7	155,3	4,1	0,8	171,2	3,6	0,4	165,8	3,1	0,4	168,1	3,6	0,6	170,3	2,1	0,5
10min	158,4	4,7	1,7	155,0	4,3	1,0	170,7	3,9	0,8	164,5	3,9	1,2	167,0	4,2	1,3	169,6	2,5	0,9
1h	157,5	5,2	2,2	155,1	4,2	0,9	170,2	4,2	1,0	164,9	3,7	1,0	167,1	4,2	1,2	169,1	2,8	1,2
12h	155,6	6,4	3,4	153,9	4,9	1,6	169,2	4,8	1,6	163,6	4,4	1,7	166,0	4,8	1,9	167,6	3,6	2,0
24h	155,2	6,6	3,6	153,8	5,0	1,7	169,1	4,8	1,7	163,5	4,5	1,8	165,9	4,9	1,9	167,3	3,8	2,2
1n	154,0	7,3	4,4	153,2	5,4	2,1	167,3	5,8	2,7	162,7	4,9	2,3	165,2	5,3	2,3	166,7	4,2	2,6
4n	153,1	7,9	5,0	153,0	5,5	2,2	165,4	6,9	3,8	161,8	5,4	2,8	163,6	6,2	3,3	165,8	4,7	3,1
8n	152,6	8,1	5,2	152,5	5,8	2,6	165,0	7,1	4,1	161,6	5,6	2,9	162,7	6,7	3,8	165,5	4,9	3,3
12n	151,4	8,9	6,0	150,8	6,8	3,6	163,9	7,7	4,7	160,5	6,2	3,6	161,3	7,5	4,6	166,2	4,5	2,9
16n	151,5	8,8	5,9	151,1	6,7	3,5	164,1	7,6	4,6	160,8	6,1	3,4	161,1	7,6	4,7	166,2	4,4	2,8
20n	151,4	8,9	6,0	151,2	6,6	3,4	164,1	7,6	4,6	160,8	6,1	3,4	160,8	7,8	4,9	165,9	4,6	3,0
24n	151,6	8,8	5,9	151,7	6,3	3,1	164,4	7,4	4,4	161,0	5,9	3,3	160,5	7,9	5,1	165,8	4,7	3,1

Tabela 4.27: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D5 i D6

Vreme <i>t</i>	Uzorak D5									Uzorak D6								
	D70C01			D70C02			D70C03			D70C11			D70C12			D70C13		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]
t₀=0s	196,0	/	/	194,3	/	/	194,8	/	/	194,3	/	/	193,0	/	/	185,7	/	/
t₃=10s	186,1	5,0	/	185,0	4,8	/	184,5	5,3	/	187,1	3,7	/	183,6	4,8	/	179,5	3,4	/
1min	183,1	6,6	1,6	182,0	6,3	1,6	181,6	6,8	1,6	184,5	5,1	1,4	180,8	6,3	1,5	176,9	4,8	1,4
10min	179,3	8,5	3,7	177,4	8,7	4,1	177,9	8,7	3,6	181,7	6,5	2,9	177,1	8,2	3,6	173,4	6,6	3,3
1h	176,0	10,2	5,4	174,0	10,4	6,0	174,3	10,5	5,5	178,8	8,0	4,4	173,9	9,9	5,3	170,5	8,2	5,0
12h	171,1	12,7	8,1	168,9	13,0	8,7	169,3	13,1	8,2	174,1	10,4	7,0	169,3	12,3	7,8	166,1	10,6	7,4
24h	169,8	13,4	8,8	167,7	13,7	9,3	168,1	13,7	8,9	172,8	11,1	7,6	168,1	12,9	8,5	165,0	11,2	8,1
1n	165,8	15,4	10,9	163,5	15,8	11,6	163,9	15,9	11,2	169,4	12,8	9,4	165,0	14,5	10,1	162,1	12,7	9,7
4n	163,2	16,7	12,3	160,7	17,3	13,1	161,5	17,1	12,4	166,3	14,4	11,1	162,3	15,9	11,6	159,7	14,0	11,0
8n	162,1	17,3	12,9	159,8	17,8	13,6	160,6	17,5	12,9	Ispitivanje uzorka D6 na dejstvo dinamičkog opterećenja								
12n	161,4	17,6	13,3	159,4	17,9	13,8	160,1	17,8	13,2									
16n	160,2	18,2	13,9	158,1	18,6	14,6	159,0	18,4	13,8									
20n	159,2	18,8	14,5	156,5	19,5	15,4	158,0	18,9	14,4									
24n	158,9	18,9	14,6	156,1	19,7	15,6	157,5	19,2	14,7									
28n	158,5	19,1	14,8	155,6	19,9	15,9	157,1	19,4	14,9									
32n	157,9	19,4	15,2	154,6	20,4	16,4	156,6	19,6	15,1									
36n	158,3	19,2	15,0	155,1	20,2	16,2	156,8	19,5	15,0									
40n	157,9	19,4	15,2	154,6	20,4	16,4	156,5	19,7	15,2									
44n	158,0	19,4	15,1	154,6	20,4	16,4	156,5	19,7	15,2									
48n	157,9	19,4	15,2	154,5	20,5	16,5	156,2	19,8	15,3									
52n	157,5	19,6	15,4	153,9	20,8	16,8	155,8	20,0	15,6									
56n	157,7	19,5	15,3	154,2	20,6	16,7	155,9	20,0	15,5									
60n	157,8	19,5	15,2	154,4	20,5	16,5	155,9	20,0	15,5									

Tabela 4.28: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D16 i D17

Vreme t	Uzorak D16									Uzorak D17								
	D70C01.1			D70C02.1			D70C03.1			D70C01.2			D70C02.2			D70C03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	182,9	/	/	178,8	/	/	206,2	/	/	176,9	/	/	172,2	/	/	181,9	/	/
$t_3=10s$	174,6	4,6	/	171,4	4,1	/	196,8	4,5	/	169,5	4,2	/	166,2	3,4	/	175,4	3,6	/
1min	171,9	6,1	1,6	169,2	5,4	1,3	194,3	5,8	1,3	167,0	5,6	1,5	163,9	4,8	1,4	173,1	4,9	1,3
10min	169,1	7,6	3,1	164,5	8,0	4,0	191,0	7,4	2,9	163,8	7,4	3,4	161,4	6,3	2,9	170,0	6,6	3,1
1h	166,6	8,9	4,5	163,1	8,8	4,9	188,7	8,5	4,1	161,6	8,7	4,7	158,9	7,7	4,4	167,4	8,0	4,5
12h	162,7	11,1	6,8	159,5	10,8	7,0	184,4	10,6	6,3	159,4	9,9	6,0	155,5	9,7	6,5	163,3	10,2	6,9
24h	161,8	11,5	7,3	158,7	11,3	7,5	183,5	11,0	6,8	158,4	10,4	6,5	154,7	10,2	7,0	162,3	10,8	7,5
1n	159,5	12,8	8,6	156,7	12,4	8,6	181,3	12,0	7,9	152,5	13,8	10,0	151,9	11,8	8,6	159,3	12,5	9,2
4n	157,2	14,1	9,9	154,9	13,3	9,6	178,9	13,2	9,1	150,6	14,9	11,1	149,9	12,9	9,8	156,6	13,9	10,7
8n	156,3	14,6	10,5	154,3	13,7	10,0	177,9	13,7	9,6	149,6	15,4	11,7	148,9	13,5	10,4	155,5	14,5	11,3
12n	154,7	15,4	11,4	153,2	14,3	10,6	176,5	14,4	10,3	144,0	18,6	15,0	147,5	14,3	11,3	154,4	15,1	12,0
16n	154,6	15,5	11,5	153,3	14,3	10,6	176,1	14,6	10,5	141,3	20,2	16,7	147,1	14,5	11,5	153,9	15,4	12,3
20n	154,1	15,7	11,7	152,9	14,5	10,8	175,7	14,8	10,7	139,8	21,0	17,5	146,7	14,8	11,7	153,4	15,7	12,6
24n	153,9	15,9	11,8	152,8	14,5	10,9	175,8	14,7	10,7	136,7	22,7	19,3	146,2	15,1	12,0	153,0	15,9	12,8

Tabela 4.29: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorku D7

Vreme t	Uzorak D7								
	D90B01			D90B02			D90B03		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t0}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t3}$ [%]
$t_0=0s$	203,6	/	/	193,0	/	/	178,4	/	/
$t_3=10s$	190,6	6,4	/	186,4	3,4	/	173,6	2,7	/
1min	188,6	7,4	1,1	184,9	4,2	0,8	172,1	3,5	0,8
10min	187,1	8,1	1,8	183,0	5,2	1,8	170,6	4,4	1,7
1h	185,9	8,7	2,5	181,3	6,1	2,7	168,9	5,3	2,7
12h	184,8	9,2	3,0	178,6	7,5	4,2	166,7	6,5	3,9
24h	185,3	9,0	2,8	178,0	7,8	4,5	166,2	6,8	4,2
1n	184,2	9,5	3,4	175,2	9,2	6,0	163,5	8,3	5,8
4n	183,2	10,0	3,9	173,9	9,9	6,7	162,4	9,0	6,5
8n	182,5	10,4	4,2	173,5	10,1	6,9	161,9	9,2	6,7
12n	181,9	10,6	4,6	173,4	10,2	7,0	161,8	9,3	6,8
16n	181,0	11,1	5,0	172,5	10,7	7,5	160,9	9,8	7,3
20n	180,7	11,3	5,2	171,2	11,3	8,1	159,8	10,4	7,9
24n	180,6	11,3	5,2	171,1	11,4	8,2	159,7	10,5	8,0
28n	180,6	11,3	5,3	170,7	11,6	8,4	159,3	10,7	8,2
32n	180,5	11,3	5,3	170,0	11,9	8,8	158,4	11,2	8,7
36n	180,3	11,4	5,4	170,3	11,8	8,7	158,9	10,9	8,5
40n	180,1	11,5	5,5	169,9	12,0	8,9	158,5	11,1	8,7
44n	179,4	11,9	5,9	169,7	12,1	9,0	158,5	11,1	8,7
48n	178,7	12,2	6,2	169,6	12,2	9,0	158,6	11,1	8,6
52n	178,4	12,4	6,4	169,1	12,4	9,3	158,5	11,1	8,7
56n	178,4	12,4	6,4	169,4	12,3	9,1	158,9	10,9	8,5
60n	178,1	12,5	6,5	169,6	12,1	9,0	159,1	10,8	8,3

Tabela 4.30: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D18 i D19

Vreme t	Uzorak D18									Uzorak D19								
	D90B01.1			D90B02.1			D90B03.1			D90B01.2			D90B02.2			D90B03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	200,9	/	/	154,5	/	/	172,4	/	/	176,6	/	/	173,2	/	/	178,4	/	/
$t_3=10s$	186,8	7,0	/	150,1	2,9	/	168,6	2,2	/	173,3	1,9	/	169,5	2,1	/	172,8	3,1	/
1min	185,1	7,9	0,9	149,1	3,5	0,7	168,0	2,6	0,4	172,4	2,4	0,5	168,4	2,7	0,6	172,1	3,5	0,4
10min	184,0	8,4	1,5	148,6	3,8	1,0	166,6	3,4	1,2	171,7	2,8	1,0	168,0	3,0	0,9	170,7	4,3	1,2
1h	182,5	9,2	2,3	148,1	4,2	1,4	166,1	3,7	1,5	171,2	3,0	1,2	167,0	3,5	1,4	169,6	4,9	1,9
12h	180,9	9,9	3,1	147,5	4,5	1,7	165,5	4,0	1,8	170,8	3,3	1,5	166,1	4,1	2,0	168,5	5,6	2,5
24h	180,6	10,1	3,3	147,2	4,7	1,9	165,4	4,1	1,9	170,6	3,4	1,6	165,8	4,2	2,1	168,2	5,7	2,7
1n	180,2	10,3	3,5	146,6	5,1	2,3	165,2	4,2	2,0	169,9	3,8	2,0	165,1	4,6	2,5	167,7	6,0	3,0
4n	179,0	10,9	4,1	145,2	6,0	3,2	164,7	4,5	2,3	168,9	4,3	2,5	163,6	5,5	3,5	166,5	6,7	3,7
8n	178,6	11,1	4,4	144,8	6,3	3,5	164,5	4,6	2,4	168,6	4,5	2,7	162,9	5,9	3,9	166,1	6,9	3,9
12n	176,7	12,1	5,4	143,8	6,9	4,2	162,9	5,5	3,4	167,5	5,2	3,4	161,4	6,8	4,8	164,1	8,0	5,0
16n	176,4	12,2	5,5	143,9	6,9	4,1	163,1	5,4	3,2	167,7	5,1	3,3	161,3	6,8	4,8	163,4	8,4	5,4
20n	175,8	12,5	5,9	143,7	7,0	4,2	163,1	5,4	3,2	167,6	5,1	3,3	161,1	7,0	5,0	162,6	8,8	5,9
24n	175,5	12,6	6,0	143,8	7,0	4,2	163,4	5,2	3,0	167,8	5,0	3,2	161,0	7,0	5,0	162,1	9,1	6,2

Tabela 4.31: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D8 i D9

Vreme t	Uzorak D8									Uzorak D9								
	D90C01			D90C02			D90C03			D90C11			D90C12			D90C13		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,t,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,t,13}$ [%]
$t_0=0s$	192,1	/	/	185,3	/	/	179,3	/	/	171,5	/	/	158,9	/	/	232,4	/	/
$t_3=10s$	184,4	4,0	/	180,7	2,5	/	171,2	4,5	/	163,6	4,6	/	151,5	4,7	/	216,3	6,9	/
1min	181,3	5,6	1,7	178,2	3,8	1,4	168,4	6,1	1,7	161,3	6,0	1,4	149,0	6,2	1,6	212,4	8,6	1,8
10min	178,2	7,3	3,4	175,2	5,4	3,0	165,2	7,9	3,5	158,0	7,9	3,4	145,7	8,3	3,8	208,4	10,3	3,7
1h	175,4	8,7	4,9	172,2	7,0	4,7	162,6	9,3	5,0	155,3	9,5	5,1	142,8	10,1	5,7	204,4	12,0	5,5
12h	171,3	10,9	7,1	167,8	9,4	7,1	158,6	11,6	7,4	151,9	11,4	7,2	139,4	12,3	8,0	199,1	14,3	8,0
24h	170,2	11,4	7,7	166,6	10,1	7,8	157,6	12,1	8,0	150,9	12,0	7,8	138,4	12,9	8,6	197,7	14,9	8,6
1n	166,5	13,4	9,7	162,6	12,2	10,0	153,9	14,2	10,1	147,7	13,9	9,7	135,8	14,5	10,3	194,1	16,5	10,3
4n	164,4	14,4	10,8	160,6	13,3	11,1	151,7	15,4	11,4	145,4	15,2	11,1	133,0	16,3	12,2	191,2	17,7	11,6
8n	163,7	14,8	11,2	159,8	13,7	11,5	151,0	15,8	11,8	Ispitivanje uzorka D9 na dejstvo dinamičkog opterećenja								
12n	163,5	14,9	11,4	159,4	14,0	11,8	151,0	15,8	11,8									
16n	162,2	15,6	12,0	158,3	14,5	12,4	150,0	16,4	12,4									
20n	160,7	16,3	12,8	157,4	15,1	12,9	147,7	17,6	13,7									
24n	160,5	16,5	13,0	157,1	15,2	13,0	147,3	17,9	14,0									
28n	160,1	16,7	13,2	156,8	15,4	13,2	147,0	18,0	14,1									
32n	159,2	17,2	13,7	156,1	15,7	13,6	146,4	18,4	14,5									
36n	159,6	16,9	13,5	156,3	15,6	13,5	144,1	19,7	15,9									
40n	159,1	17,2	13,7	155,9	15,8	13,7	142,3	20,7	16,9									
44n	159,1	17,2	13,8	155,7	15,9	13,8	138,8	22,6	18,9									
48n	158,9	17,3	13,8	155,6	16,0	13,9	137,5	23,3	19,7									
52n	158,5	17,5	14,0	155,3	16,2	14,0	136,5	23,9	20,3									
56n	158,8	17,3	13,9	155,5	16,0	13,9	126,1	29,7	26,3									
60n	159,1	17,2	13,7	155,6	16,0	13,9	127,6	28,9	25,5									

Tabela 4.32: Dugotrajni gubici sile prednaprezanja za zavrtnjeve u uzorcima D20 i D21

Vreme t	Uzorak D20									Uzorak D21								
	D90C01.1			D90C02.1			D90C03.1			D90C01.2			D90C02.2			D90C03.2		
	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]	$F_{p,C,t}$ [kN]	$\Delta F_{p,C,10}$ [%]	$\Delta F_{p,C,13}$ [%]
$t_0=0s$	170,9	/	/	206,2	/	/	172,2	/	/	187,9	/	/	195,0	/	/	179,8	/	/
$t_3=10s$	165,1	3,4	/	199,9	3,0	/	166,1	3,6	/	181,3	3,5	/	188,0	3,6	/	174,4	3,0	/
1min	162,4	4,9	1,6	197,3	4,3	1,3	164,3	4,6	1,1	178,1	5,2	1,8	185,6	4,8	1,3	172,5	4,1	1,1
10min	160,7	6,0	2,7	195,5	5,2	2,2	162,3	5,7	2,3	175,1	6,8	3,5	183,2	6,0	2,5	170,2	5,4	2,4
1h	158,3	7,4	4,1	192,6	6,6	3,7	159,7	7,2	3,8	172,5	8,2	4,9	180,2	7,6	4,1	167,4	6,9	4,0
12h	155,9	8,7	5,5	189,7	8,0	5,1	157,1	8,8	5,4	170,0	9,5	6,3	177,2	9,1	5,7	164,7	8,4	5,6
24h	155,3	9,1	5,9	192,2	6,8	3,9	156,4	9,2	5,8	169,2	10,0	6,7	176,5	9,5	6,1	163,8	8,9	6,1
1n	152,8	10,6	7,4	190,9	7,4	4,5	154,2	10,4	7,1	166,8	11,2	8,0	174,2	10,7	7,4	161,2	10,4	7,6
4n	150,7	11,8	8,7	189,7	8,0	5,1	152,0	11,7	8,4	163,4	13,0	9,9	171,5	12,0	8,8	158,0	12,1	9,4
8n	149,6	12,4	9,4	189,0	8,3	5,4	151,3	12,1	8,9	161,6	14,0	10,9	170,1	12,7	9,5	156,2	13,1	10,4
12n	148,1	13,3	10,3	186,8	9,4	6,6	150,1	12,8	9,6	160,4	14,6	11,5	168,4	13,6	10,4	155,4	13,6	10,9
16n	147,7	13,5	10,5	186,5	9,6	6,7	149,6	13,1	9,9	160,7	14,5	11,4	168,9	13,4	10,2	155,1	13,7	11,1
20n	147,1	13,9	10,9	185,9	9,8	7,0	149,2	13,4	10,2	160,7	14,5	11,4	169,3	13,2	10,0	154,7	14,0	11,3
24n	146,5	14,2	11,2	185,4	10,1	7,3	148,9	13,6	10,4	160,9	14,4	11,3	170,1	12,8	9,5	154,5	14,1	11,4

4.3 Gubici sile prednaprezanja usled dejstva dinamičkog opterećenja

Kao što je definisano u prikazu eksperimentalnog istraživanja, na ukupno šest uzoraka izvršeno je ispitivanje na dejstvo dinamičkog opterećenja od 2×10^6 ciklusa sa frekvencijom delovanja od 10 Hz. Pre postavljanja svakog od uzoraka u kidalicu izvršen je proračun maksimalne i minimalne vrednosti dinamičke sile za taj uzorak. Vrednosti su određene u svemu prema tački 4.5, čime je dobijen različit spektar dinamičkog opterećenja za svaki od uzoraka (tabela 4.33).

Tabela 4.33: Maksimalne i minimalne vrednosti dinamičke sile po uzorcima

Uzorak	Zavrtnaj	F_p	$F_{s,Rd}^b$	$F_{s,Rd}^s$	$N_{t,Rd}$	ΔF_d	$F_{d,max}$	$F_{d,min}$
		[kN]						
D3	D50C11	160,5	115,6	354,8	202,7	60	160	100
	D50C12	165,7	119,3					
	D50C13	166,6	119,9					
H3	H55C11	112,9	81,3	248,8	202,7	60	160	100
	H55C12	107,4	77,3					
	H55C13	125,3	90,2					
D6	D70C11	155,0	111,6	290,7	381,1	110	230	120
	D70C12	137,5	96,7					
	D70C13	118,5	82,4					
H6	H70C11	165,7	119,3	347,0	381,1	110	310	200
	H70C12	141,5	101,9					
	H70C13	174,7	125,8					
D9	D90C11	144,5	104,0	336,6	633,4	190	270	80
	D90C12	132,8	95,6					
	D90C13	190,3	137,0					
H9	H85C11	178,9	128,8	392,4	633,4	190	310	120
	H85C12	195,6	140,8					
	H85C13	170,6	122,8					

Tokom pripreme uzorka D6 za ispitivanje došlo je do njegovog zaglavlivanja u čeljust kidalice, što je, u pokušaju odglavlivanja, dovelo do ispuštanja uzorka od strane laboranta. Nakon konačnog postavljanja uzorka u kidalicu, pre početka dinamičkog ispitivanja, pokrenuta je akvizicija za merenje sile prednaprezanja u zavrtnjevima i konstatovan značajan pad sile u dva od tri zavrtnja (D70C12 i D70C13). Novonastalo stanje uzeto je u obzir i na osnovu njega su definisane vrednosti maksimalne i minimalne dinamičke sile. Ove vrednosti su značajno manje od onih za uzorak istih dimenzija (H6) ali sa ugrađenim HBT zavrtnjevima (tabela 4.33).

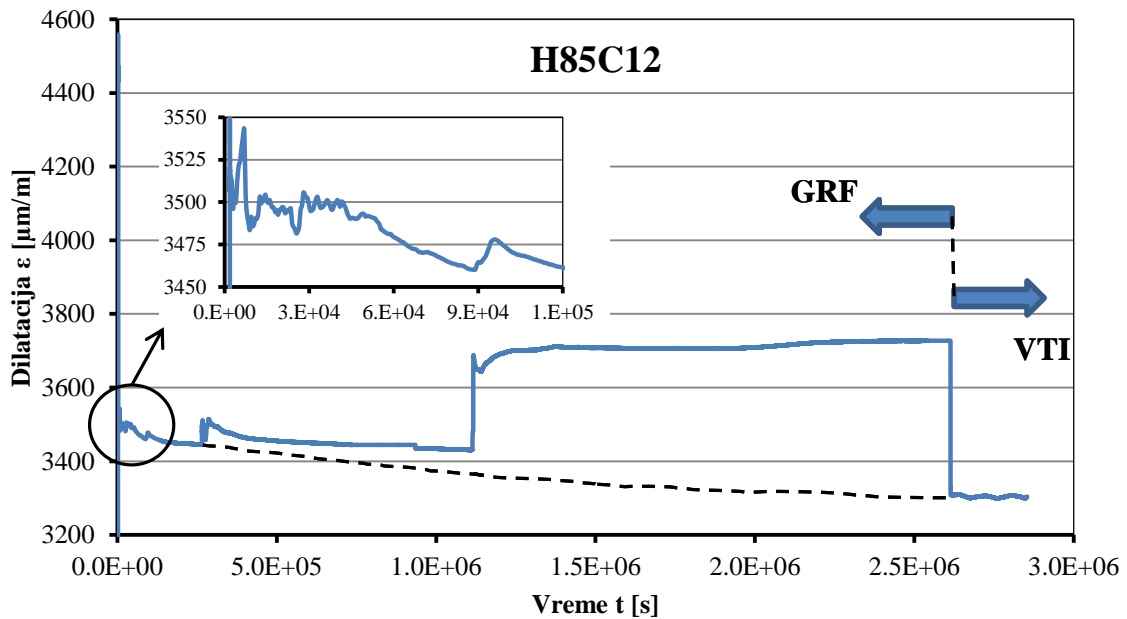
Planom eksperimentalnog istraživanja predviđeno je da se praćenje kratkotrajnih gubitaka sile prednaprezanja u zavrtnjevima izvrši na Građevinskom fakultetu u Beogradu, a ispitivanje uzoraka na dejstvo dinamičkog opterećenja u laboratoriji Vojnotehničkog instituta u Beogradu. Transport uzoraka podrazumevao je prekid registrovanja sila u zavrtnjevima. Nakon ponovnog povezivanja sa merno akvizicionim sistemom izvršeno je poređenje vrednosti sile sa poslednjim registrovanim zapisom. Jedino je u zavrtnju H85C12 (uzorak H9) registrovano značajno odstupanje rezultata u smislu pada dilatacije u iznosu od 400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Zbog ovoga je za određivanje nosivosti zavrtnja na proklizavanje uzeta poslednja vrednost sile prednaprezanja zabeležena pre transporta uzorka. Ovo se pokazalo kao pogrešno jer je detaljnim pregledom rezultata uočeno da merna traka ne pokazuje stabilne rezultate. Sa dijagrama promene dilatacije merne trake u zavrtnju H85C12 (slika 4.8), za period od prvih 35 dana od dana ugradnje zavrtnja u uzorak, jasno se može uočiti sledeće:

- u toku same ugradnje zavrtnj se ponaša slično kao i ostali zavrtnjevi (veliki inicijalni gubitak sile prednaprezanja),
- nakon 30 minuta uočljiva je značajna nestabilnost vrednosti dilatacije merne trake (slika 4.8 – uvećani deo dijagrama) što je jasan pokazatelj da traka nije dobro ugrađena u zavrtnj,
- nakon perioda stabilizacije vrednosti dilatacije merne trake u jednom trenutku vrednost se povećala za oko 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ i nastavlja kontinuirano da raste sve do trenutka prekida merenja (premeštanje uzoraka na VTI),
- nakon ponovnog pokretanja merna oprema očitava vrednosti koje su manje za oko 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ od poslednjih zabeleženih. Ispostavilo se da izmerene vrednosti odgovaraju očekivanim u slučaju dobro ugrađene merne trake (slika 4.8 – isprekidana linija), zbog čega je ove vrednosti trebalo uključiti u razmatranje.

Uzrok ovakve promene izmerenih vrednosti može biti narušena veza merne trake sa mernim sistemom (oštećeni konektori, kablovi ili izvodi merne trake), ali i međusobno pomeranje ploča u uzorku u toku njihovog transporta.

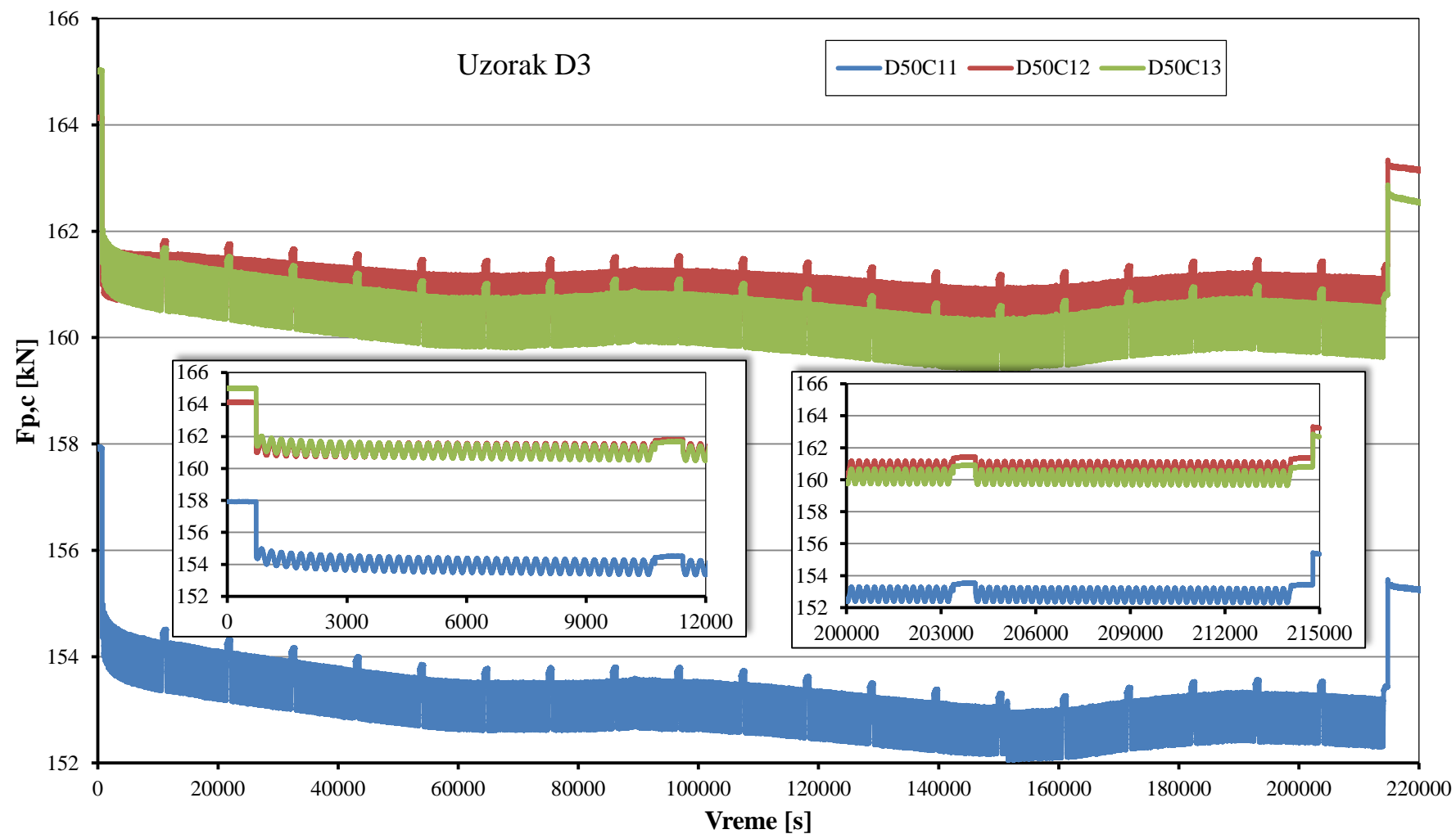
Proračun maksimalne i minimalne vrednosti dinamičke sile za uzorak H9 na osnovu poslednje zabeležene vrednosti dilatacije merne trake pre transporta uzoraka nije značajno uticao na spektar dinamičkog opterećenja, pa je ispitivanje ovog uzorka uzeto

u obzir kao relevantno za donošenje zaključaka. Odstupanja mogu biti veća, ili se javiti u više zavrtnjeva istog uzorka i tako imati značajan uticaj na spektar dinamičkog opterećenja. Zbog toga je, kod ovakvih eksperimentalnih istraživanja, neophodno vršiti analizu rezultata u kontinuitetu, kako bi se ovakve pojave mogle uočiti blagovremeno i sprečiti njihov uticaj na dalji tok eksperimenta.

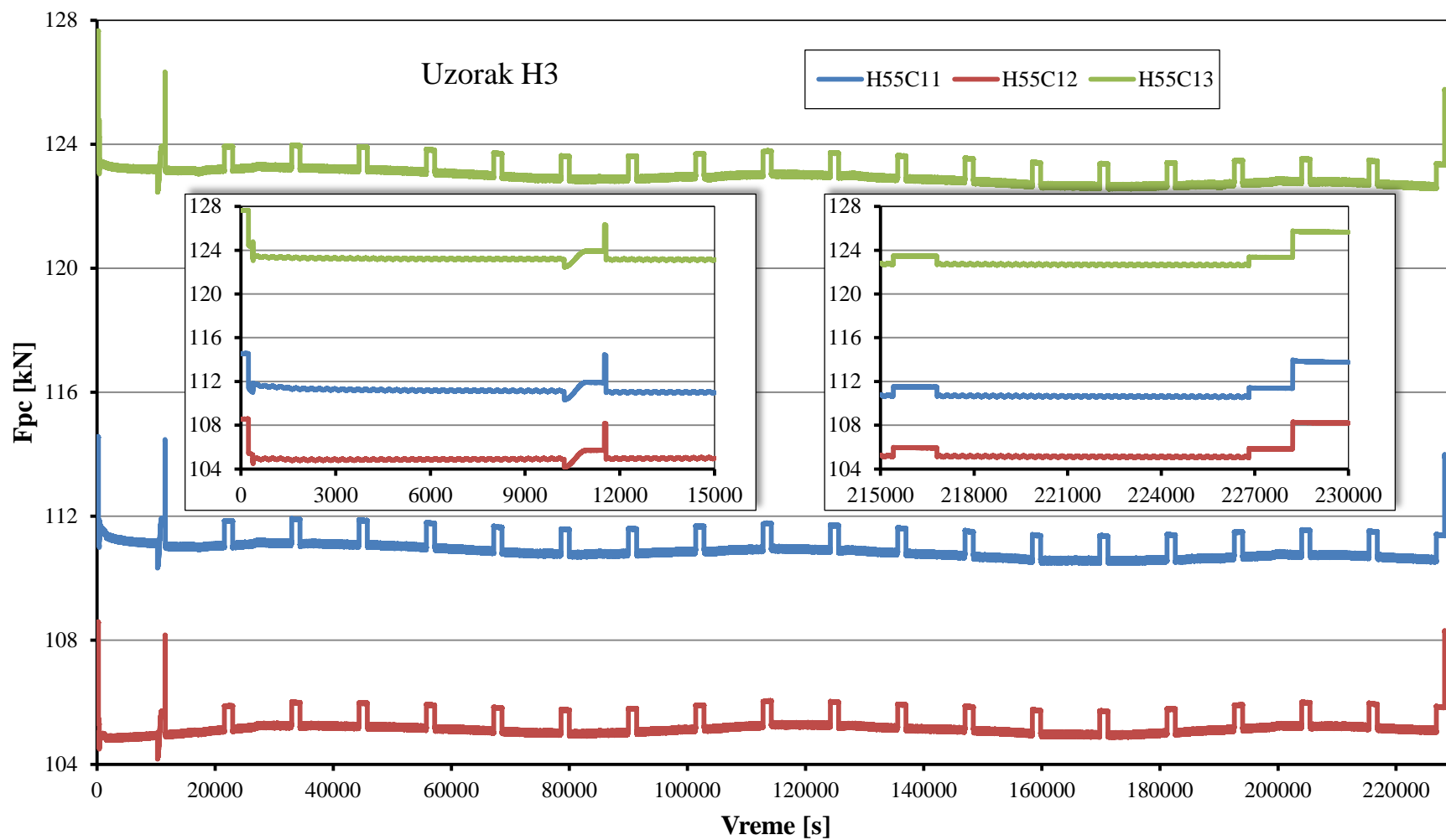


Slika 4.8: Dijagram promene dilatacije merne trake u zavrtnju H85C12

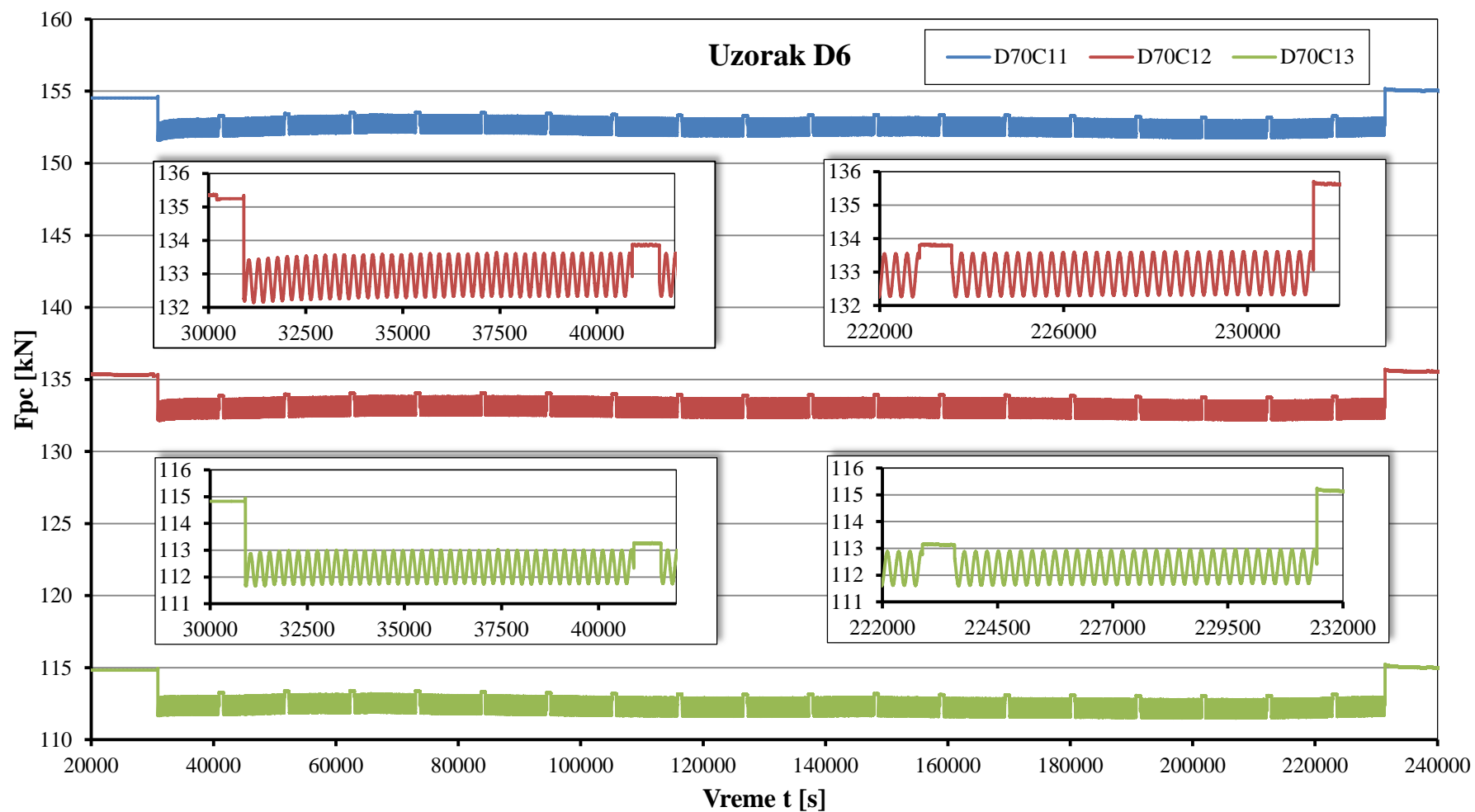
Na priloženim dijagramima (slika 4.9 do slika 4.14) predstavljena je promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima u toku delovanja dinamičkog opterećenja. Na uvećanim delovima dijagrama jasno je uočljiv početak i kraj dinamičkog ispitivanja, odnosno vrednost sile prednaprezanja u zavrtnjevima pre i posle dejstva dinamičkog opterećenja.



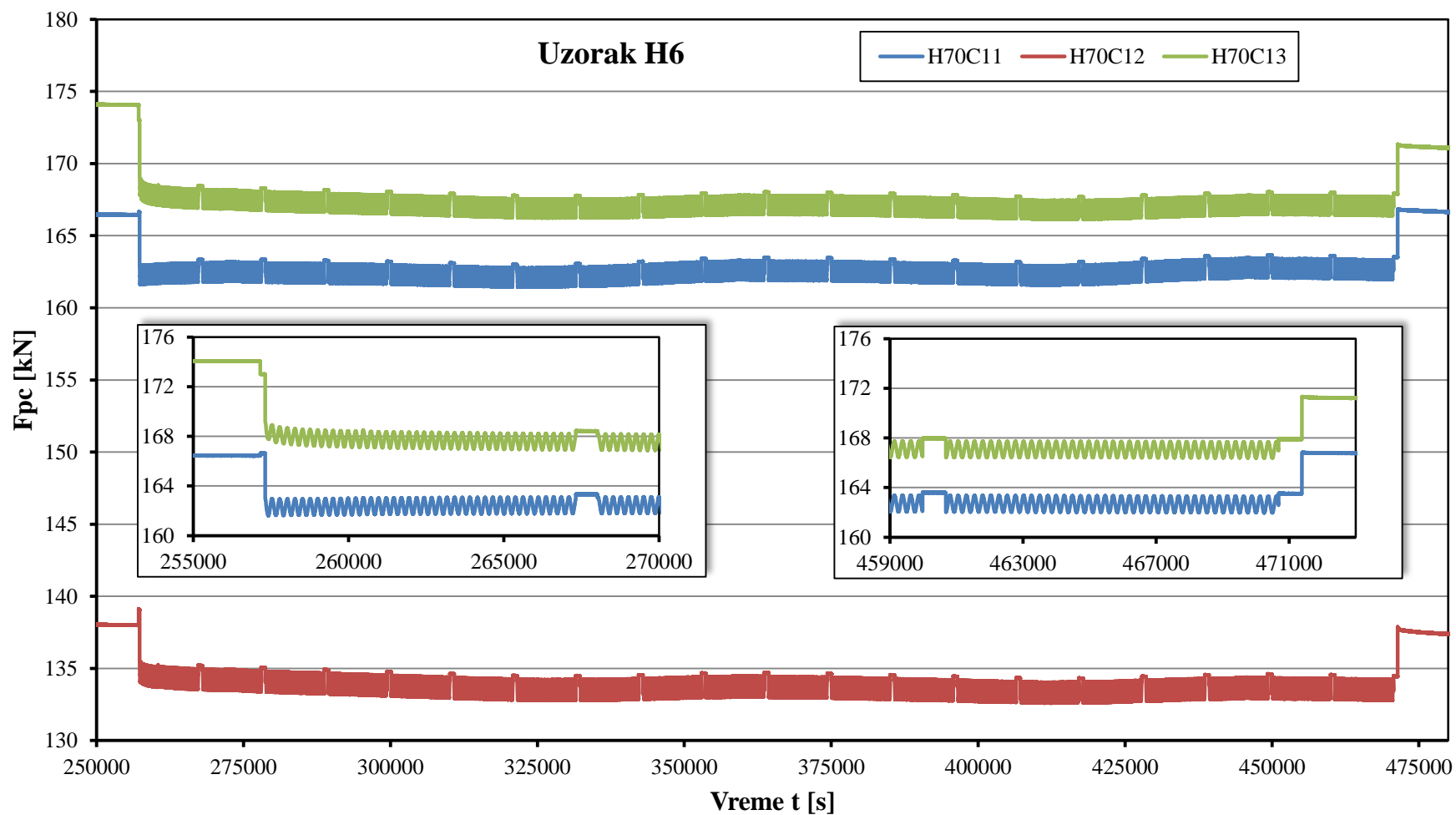
Slika 5.9: Promena sile prednapreznja u zavrtnjevima uzorka D3 u toku delovanja dinamičkog opterećenja



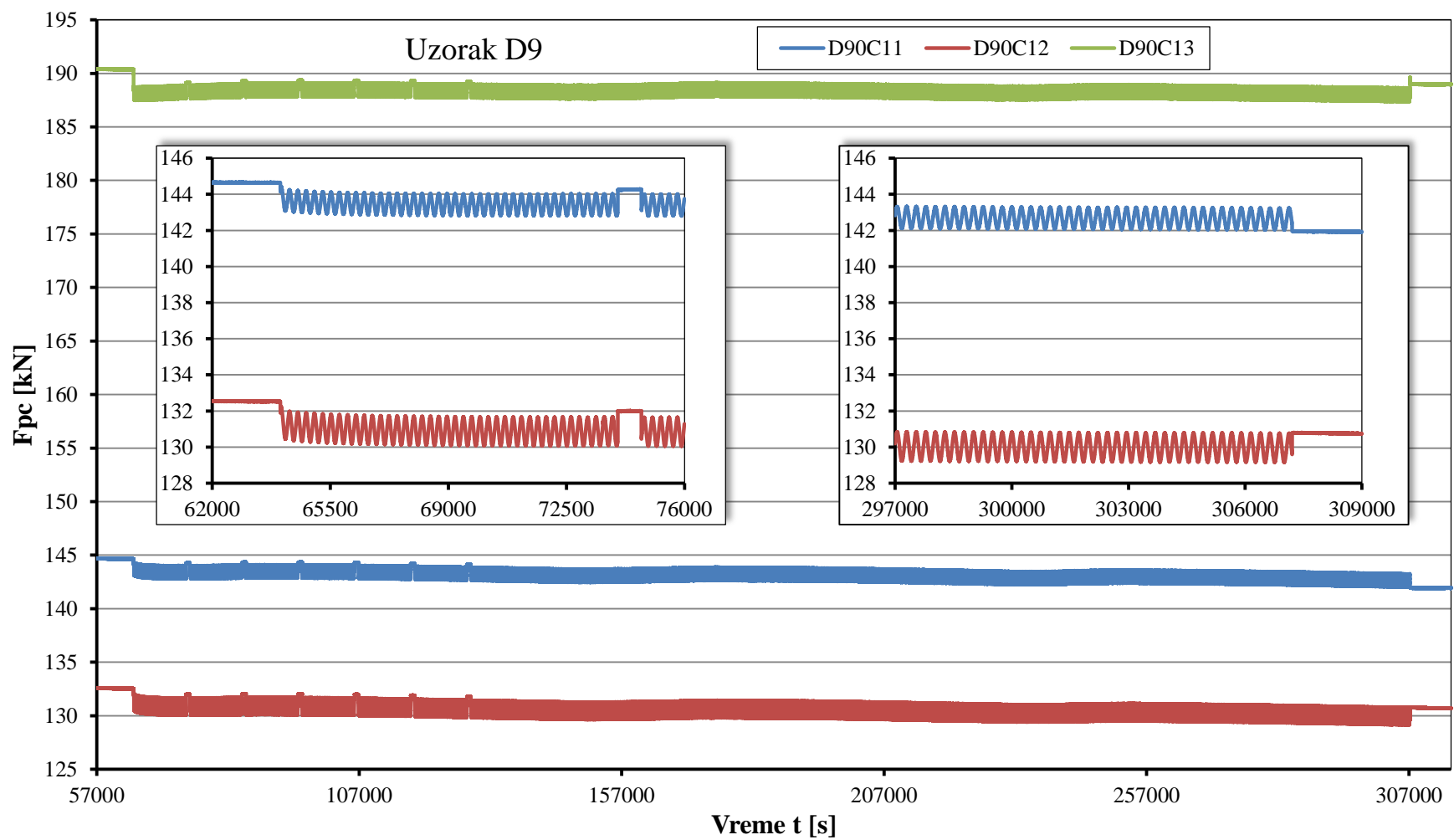
Slika 5.10: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H3 u toku delovanja dinamičkog opterećenja



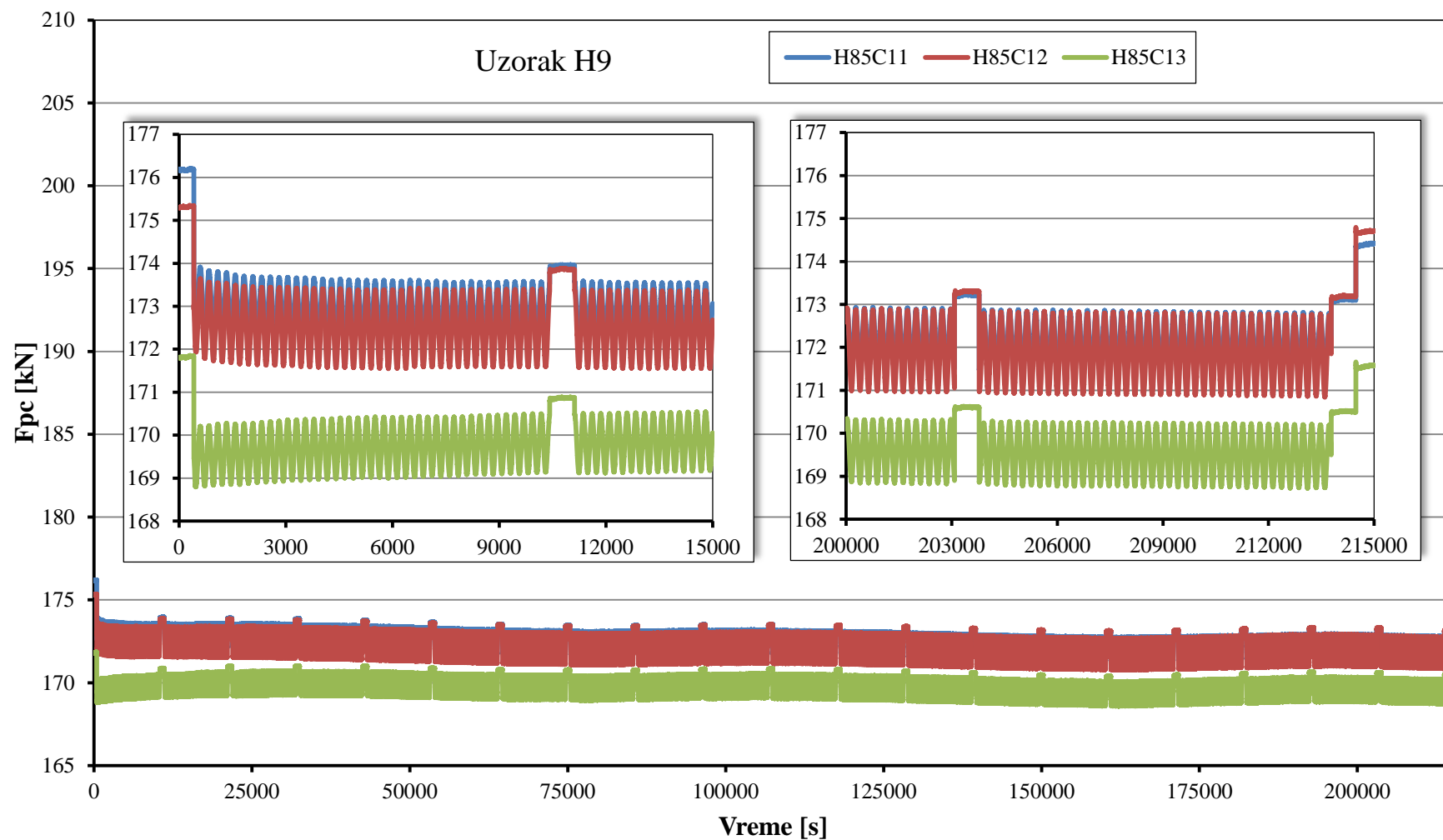
Slika 5.11: Promena sile prednaprezanja u zavrteljima uzorka D6 u toku delovanja dinamičkog opterećenja



Slika 5.12: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H6 u toku delovanja dinamičkog opterećenja



Slika 5.13: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka D9 u toku delovanja dinamičkog opterećenja



Slika 5.14: Promena sile prednaprezanja u zavrtnjevima uzorka H9 u toku delovanja dinamičkog opterećenja

5. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

5.1 Maksimalna vrednost sile prednaprezanja ostvarena u procesu ugradnje zavrtnjeva

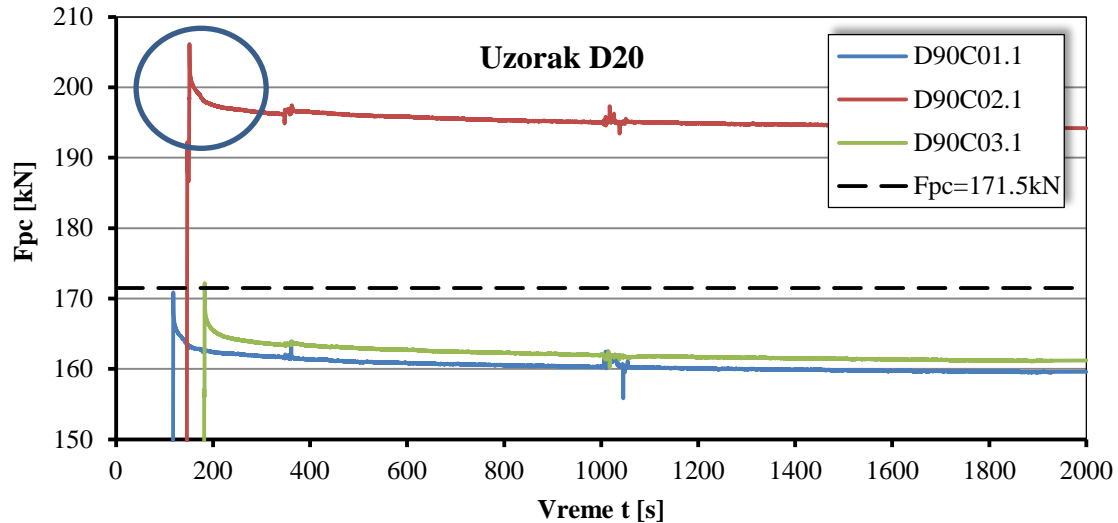
Generalno, jedan od osnovnih nedostataka HV zavrtnjeva je rasipanje vrednosti maksimalne ostvarene sile prednaprezanja u toku ugradnje moment ključem. S obzirom da nije racionalno određivati koeficijent trenja k za svaki zavrtnj, uobičajeno se usvaja jedinstvena vrednost momenta pritezanja za celu seriju zavrtnjeva. Iz ovog razloga se u zavrtnjeve mogu uneti različite vrednosti sile prednaprezanja. Kao ilustracija prikazane su srednja vrednost, standardna devijacija i koeficijent varijacije maksimalnih sila prednaprezanja ostvarenih u zavrtnjevima, za svaki tip i dužinu zavrtnja ponaosob, kao i za cele serije HV i HBT zavrtnjeva (tabela 5.1).

Tabela 5.1: Maksimalne vrednosti sile prednaprezanja ostvarene u postupku ugradnje zavrtnjeva

	$X = F_{p,C,max}$							
	D50	D70	D90	H55	H70	H85	Za sve HV zavrtnjeve	Za sve HBT zavrtnjeve
\bar{X} [kN]	181,5	184,6	183,9	226,7	236,4	232,8	183,3	232,0
σ_x	16,6	12,6	17,6	8,8	9,8	9,1	15,5	9,9
V_x [%]	9,1	6,8	9,5	3,9	4,2	3,9	8,5	4,3

Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti ujednačenost ostvarenih sila prednaprezanja u procesu ugradnje HBT zavrtnjeva, što predstavlja prednost njihove primene. Kao ilustracija, koeficijent varijacije određen za ukupno 63 zavrtnja iznosi svega 4,3 %. Sa druge strane, način ugradnje HV zavrtnjeva, rezultovao je većim koeficijentom varijacije (8,5 % na uzorku od 63 zavrtnja). Ipak, ustanovljena vrednost koeficijenta varijacije za HV zavrtnjeve je prihvatljiva, ta se može smatrati da eksperimentalno određena vrednost koeficijenta k dobro oslikava celu seriju primenjenih zavrtnjeva. Bez obzira na dobar globalni pokazatelj ujednačenosti sila prednaprezanja ostvarenih u procesu ugradnje HV zavrtnjeva, na nekim dijagramima (slika 5.1) može se uočiti pojava značajnog odstupanja maksimalne postignute sile prednaprezanja u zavrtnjevima istog uzorka. U ovom slučaju je reč o zavrtnjevima koji imaju značajno veću vrednost koeficijenta k od vrednosti određene eksperimentom, što

je najčešće posledica razlika u izradi, obradi i antikorozijskoj zaštiti zavrtnja. Ova pojava se može tolerisati sve dok ne dovede do plastifikacije zavrtnja, što je neprihvatljivo kod dinamički opterećenih konstrukcija.



Slika 5.1: Primer značajnog odstupanja sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima istog uzorka

5.2 Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja

Inicijalni i kratkoročni gubici sile prednaprezanja određeni su nakon isključivanja iz analize zavrtnjeva sa neispravnim mernim trakama. Određene su srednje vrednosti maksimalne sile prednaprezanja ostvarene u postupku ugradnje zavrtnjeva, kao i vrednosti sile nakon 10 s i nakon 12 h od trenutka dostizanja maksimalne vrednosti (tabela 5.2 i tabela 5.4). Rezultati su prikazani za svaku dužinu zavrtnja, odvojeno za zavrtnjeve ugrađene u uzorke sa i bez antikorozijske zaštite. Na osnovu prikazanih vrednosti, uočljivo je da se uticaj antikorozijske zaštite, u vidu cink-silikatnog premaza, na inicijalne i kratkoročne gubitke sile prednaprezanja može zanemariti.

Tabela 5.2: Srednje vrednosti sile $F_{p,C}$ u HBT zavrtnjevima

Sila u zavrtnju	H55B	H70B	H85B	H55C	H70C	H85C
$F_{p,C,max}$ [kN]	226,7	236,4	232,1	226,7	236,3	232,7
$F_{p,C,t3}$ [kN]	127,2	178,2	182,8	134,6	173,5	182,5
$F_{p,C,t4}$ [kN]	122,6	174,1	178,8	124,0	164,1	174,6

U slučaju HBT zavrtnjeva sa debljinom steznog paketa 18mm (H55), dobijeni rezultati mogu se uporediti sa rezultatima istraživanja prikazanim u [48]. Sa obzirom na različitu

vrstu i debljine korišćenih premaza, poređenje će se sprovesti samo za zavrtnjeve ugrađene u uzorke bez AKZ (tabela 5.3).

Tabela 5.3: Poređenje inicijalnih i kratkoročnih gubitaka sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima dužine 55 mm, ugrađenim u uzorke bez AKZ

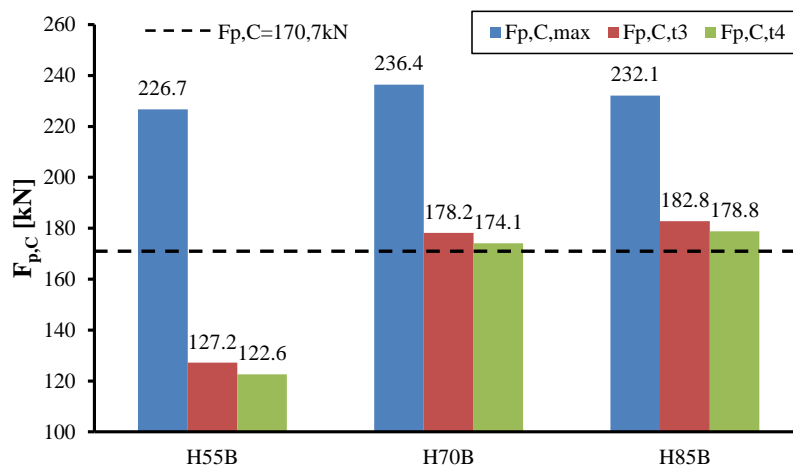
Gubitak sile prednaprezanja $\Delta F_{p,C,t}(t)$ [%]	Istraživanje	
	C. Heistermann	N. Fric
t=10 sekundi	33,38	43,90
t= 12 časova	39,83	45,92

Na osnovu prikazanih rezultata, može se zaključiti da su rezultati pilot istraživanja potvrđeni u smislu velikih gubitaka sile prednaprezanja u kratkim HBT zavrtnjevima. Razlike u rezultatima mogu se objasniti činjenicom da su uzorci korišćeni u istraživanju [48] formirani praktično od jedne ploče, dok su u drugom slučaju u pitanju uzorci sa tri ploče, što za rezultat ima povećane inicijalne gubitke sile prednaprezanja usled međusobnog „nameštanja“ ploča i poništavanja neravnina.

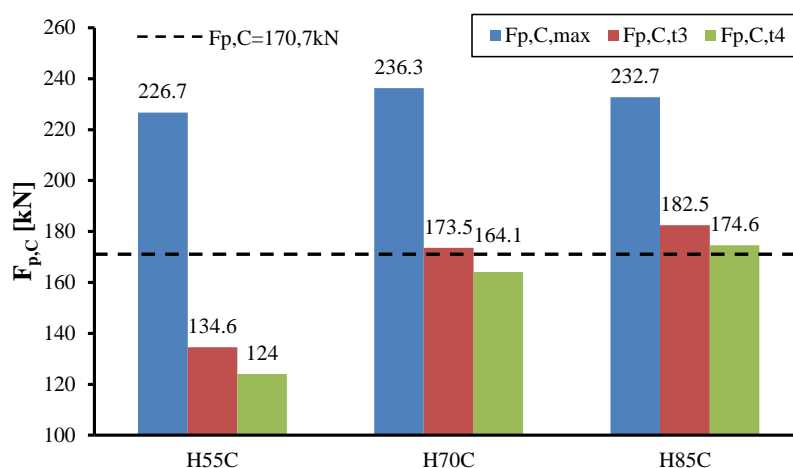
Tabela 5.4: Srednje vrednosti sile $F_{p,C}$ u HV zavrtnjevima

Sila u zavrtnju	D50B	D70B	D90B	D50C	D70C	D90C
$F_{p,C,max}$ [kN]	180,8	179,9	181,2	182,8	188,1	186,0
$F_{p,C,t3}$ [kN]	173,3	173,8	174,6	173,4	180,0	178,5
$F_{p,C,t4}$ [kN]	166,9	166,9	169,9	159,0	167,0	166,9

Sa prikazanih dijagrama (slika 5.2 i slika 5.3) jasno je uočljivo da je, čak i u prvim trenucima nakon ugradnje kratkih HBT zavrtnjeva, sila prednaprezanja u njima manja od standardom [20] propisane minimalne vrednosti. Sa povećanjem dužine ovaj problem je manje izražen i može se reći da u slučaju zavrtnjeva dužine 85 mm on praktično ne postoji. HBT zavrtnjevi dužine 55 mm, ugrađeni u uzorke sa i bez antikorozijske zaštite, 12h nakon ugradnje, imali su silu prednaprezanja koja je 27,4 % odnosno 28,1 % manja od minimalne propisane vrednosti (170,7 kN). U slučaju zavrtnjeva dužine 70 mm ovaj problem se javio samo kod onih koji su ugrađeni u uzorke sa antikorozijskom zaštitom, a ostvarena sila je 3,9 % manja od minimalne propisane vrednosti.

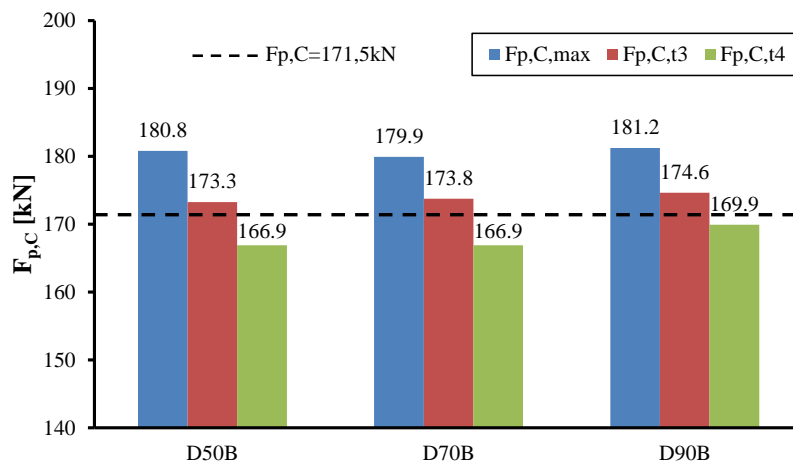


Slika 5.2: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HBT zavrtnjevima u uzorcima bez AKZ

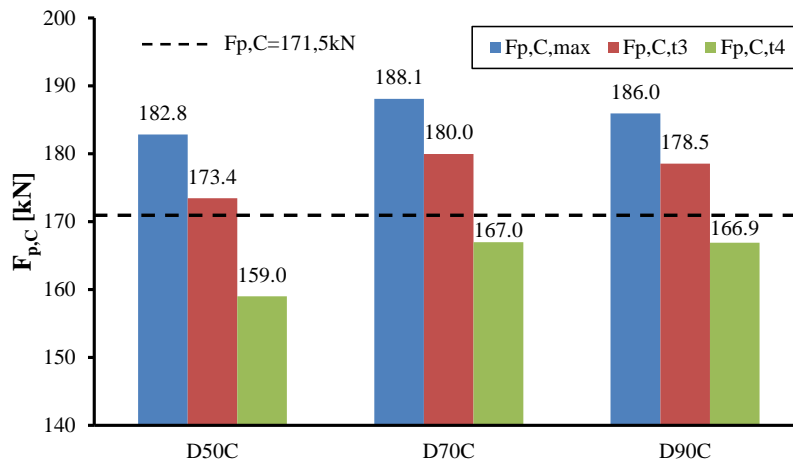


Slika 5.3: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HBT zavrtnjevima u uzorcima sa AKZ

Analizom dijagrama srednjih vrednosti ostvarene sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima ugrađenim u uzorke sa antikorozijskom zaštitom (slika 5.4 i slika 5.5), uočljivo je da su HV zavrtnjevi, 12 h nakon ugradnje, imali silu prednaprezanja manju od minimalne standardom [29] propisane vrednosti. U zavisnosti od dužine zavrtnja, sila ostvarena nakon 12h je od 0,9 % do 7,3 % manja od minimalne propisane vrednosti (171,5 kN). Ove rezultate treba uzeti sa izvesnom rezervom, s obzirom na metodu ugradnje zavrtnjeva moment ključem. Takođe, ove vrednosti dobijene su ugradnjom zavrtnjeva u jednoj fazi, na punu silu prednaprezanja, za razliku od metode pritezanja propisane standardom [33]. Postupak pritezanja prema odredbama standarda podrazumeva ugradnju u dve faze, prva u kojoj se unosi 75% od vrednosti momenta pritezanja, i druga u kojoj se zavrtnjevi pritežu na 110% od iste vrednosti.



Slika 5.4: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HV zavrtnjevima u uzorcima bez AKZ

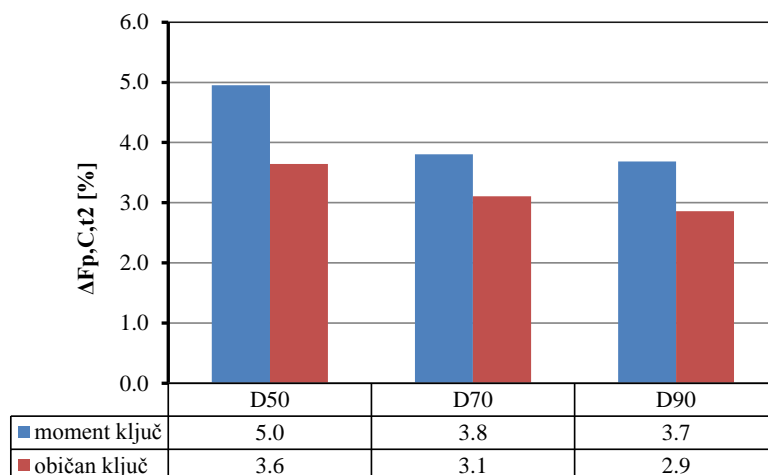


Slika 5.5: Dijagram srednjih vrednosti sile $F_{p,C}$ u HV zavrtnjevima u uzorcima sa AKZ

5.2.1. Uticaj načina ugradnje visokovrednih HV zavrtnjeva na inicijalne gubitke sile prednaprezanja

Planiranjem druge faze eksperimentalnog istraživanja predviđeno je da se polovina HV zavrtnjeva ugradi moment ključem, a polovina običnim ključem. U prikazu rezultata eksperimentalnog istraživanja (poglavlje 4.1) za svaki uzorak sa HV zavrtnjevima jasno je označeno na koji način je izvršena njegova ugradnja.

Prikazani rezultati (slika 5.6) dobijeni su osrednjavanjem vrednosti iz druge faze eksperimenta, dakle za svaku dužinu zavrtnjeva i svaku metodu ugradnje po šest vrednosti. Sa obzirom na zanemarljiv uticaj antikorozijske zaštite na inicijalne gubitke sile, objedinjeno su analizirani i zavrtnjevi ugrađeni u uzorke sa antikorozijskom zaštitom.

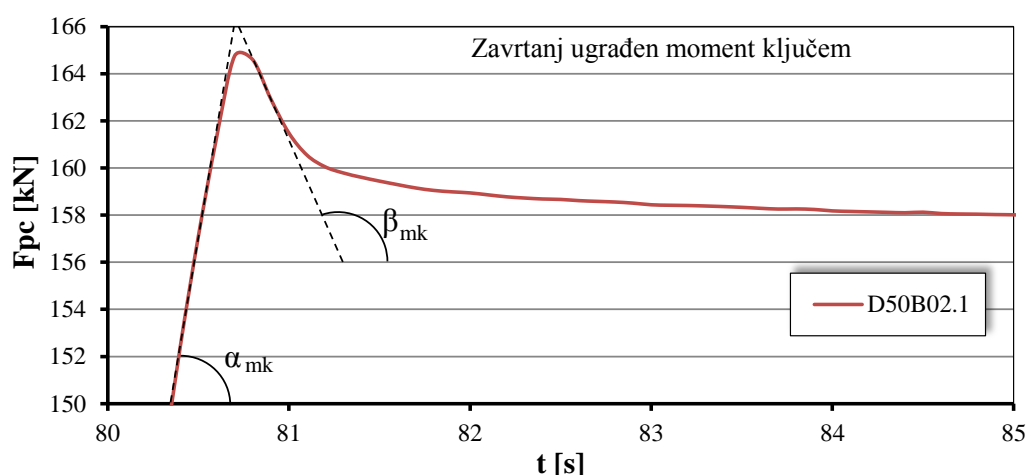


Slika 5.6: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima zavisno od načina ugradnje zavrtnjeva

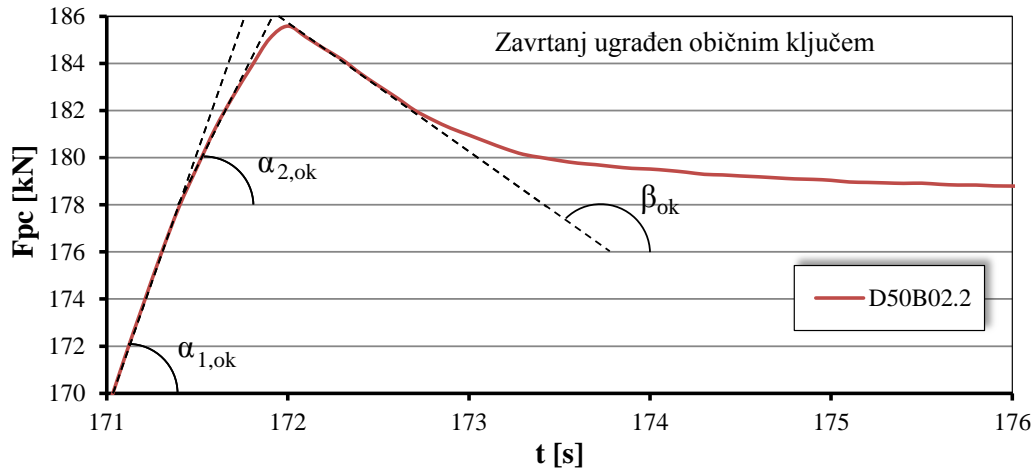
Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti da su inicijalni gubici sile prednaprezanja manji kada se zavrtnjevi ugrađuju običnim ključem i to:

- u slučaju zavrtnjeva dužine 50 mm, manji su za 28%,
- u slučaju zavrtnjeva dužine 70 mm, manji su za 18% i
- u slučaju zavrtnjeva dužine 90 mm manji su za 22%.

Do objašnjenja ove pojave može se doći analizom brzine unošenja sile prednaprezanja u zavrtnj, za svaku od primenjenih metoda ugradnje. Na primeru zavrtnjeva D50B02.1 (ugrađen moment ključem) i D50B02.2 (ugrađen običnim ključem) analizirani su dijagrami koji prikazuju promenu sile u zavrtnju u toku njegove ugradnje (slika 5.7 i slika 5.8).



Slika 5.7: Brzina unošenja sile prednaprezanja moment ključem u HV zavrtnj



Slika 5.8: Brzina unošenja sile prednaprezanja običnim ključem u HV zavrtnaj

Ugлом α označen je nagib krive do trenutka dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja, a uglom β nagib krive nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile. Jasno je uočljivo da primenu moment ključa karakteriše veća brzina ugradnje, ali i veća brzina smanjenja sile prednaprezanja usled efekta samoodvijanja navrtke nakon „proklizavanja“ moment ključa ($\alpha_{mk} > \alpha_{ok}$ i $\beta_{mk} < \beta_{ok}$). Takođe, sa obzirom da je ugradnja zavrtnjeva običnim ključem vršena uz istovremeno praćenje ostvarene sile, uočljivo je usporenje procesa unošenja sile prednaprezanja kako se njena vrednost približava željenoj ($\alpha_{2,ok} < \alpha_{1,ok}$). Ovaj efekat svakako je umanjio gubitke sile prednaprezanja usled samoodvrtanja navrtke.

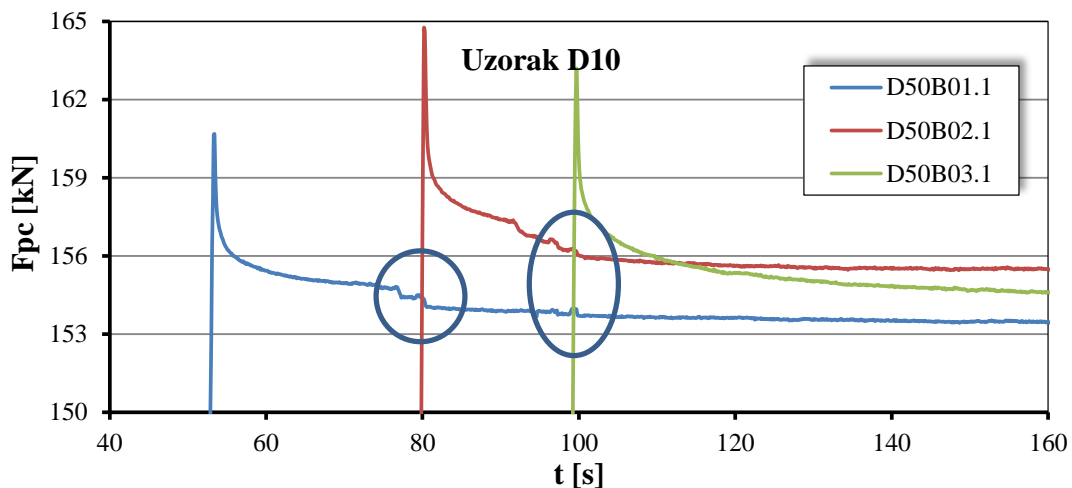
Iako prikazana razlika gubi na značaju u kontekstu dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja, uočeni fenomen nije zanemarljiv i nedvosmisleno ukazuje na pojavu samoodvrtanja navrtke u trenutku „proklizavanja“ moment ključa, ali i u trenutku njegovog uklanjanja sa zavrtnja. U slučaju primene masivnih multiplikatora za ugradnju zavrtnjeva ovaj fenomen može biti još izraženiji.

5.2.2. Uticaj redosleda ugradnje zavrtnjeva na kratkoročne gubitke sile prednaprezanja

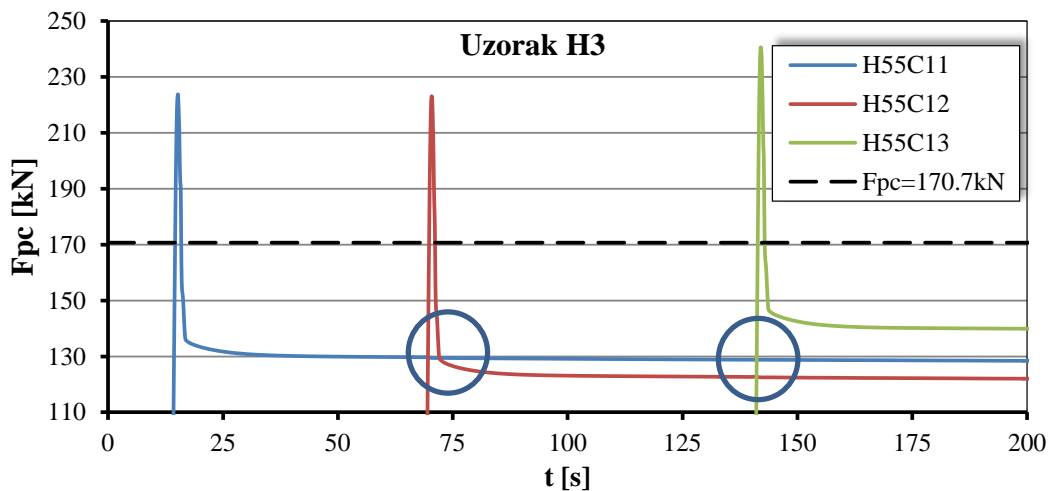
Tarni spojevi sa dva ili više zavrtnjeva podložni su uticaju pada sile prednaprezanja u ugrađenim zavrtnjevima usled ugradnje narednog zavrtnja. Ovaj fenomen dobija na značaju u slučaju kada se ne ostvaruju ujednačene vrednosti maksimalne sile prednaprezanja koja se unosi u zavrtnaj u toku ugradnje, kao i u slučaju malih debljina spojeva. U slučaju kada je neki od zavrtnjeva u spoju prednapregnut većom silom od ostalih, dolazi do elastične deformacije elemenata spoja (do smanjenja

debljine spoja) koja je veća od do tada ostvarene. Samim tim, ovo rezultuje smanjenjem sile prednaprezanja u već ugrađenim zavrtnjevima. Za jednako smanjenje debljine spoja veći je pad sile prednaprezanja kod kraćih zavrtnjeva.

Na svakom od dijagrama kratkoročnih gubitaka sile prednaprezanja prikazanom u prilogu D, izvršena je analiza uticaja ugradnje zavrtnja na promenu sile prednaprezanja u zavrtnjevima već ugrađenim u uzorak. Kod HV zavrtnjeva ovaj uticaj je uočljiv u slučaju uzoraka najmanje debljine steznog paketa (18 mm), dok je kod uzoraka sa debljinom steznog paketa 35 mm i 55 mm gotovo neprimetan. Za zavrtnjeve dužine 50 mm ovi gubici, kada postoje, predstavljaju pad sile od manje od 1%, pa se i oni mogu zanemariti (slika 5.9). U slučaju primene HBT zavrtnjeva, koje karakteriše dobra ujednačenost ostvarenih sile prednaprezanja u procesu ugradnje, ovaj fenomen nije izražen i može se zanemariti (slika 5.10).



Slika 5.9: Uticaj redosleda ugradnje HV zavrtnjeva na gubitak sile prednaprezanja



Slika 5.10: Uticaj redosleda ugradnje HBT zavrtnjeva na gubitak sile prednaprezanja

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da dispozicija i dimenzije primenjenih uzoraka nisu adekvatni za izučavanje ovog fenomena, odnosno da predstavljaju slučajeve u kojima je on zanemarljiv. Iz ovog razloga, predmet budućih istraživanja mogli bi da budu spojevi sa većim brojem zavrtnjeva (kao što su montažni nastavci punih limenih nosača) i malim debljinama steznog paketa (do 20 mm), na kojima se očekuje značajnija pojava ovog fenomena.

5.3 Gubici sile prednaprezanja usled dejstva dinamičkog opterećenja

Na osnovu ispitivanja uzoraka na dejstvo dinamičkog opterećenja, izvršena je analiza vrednosti sile prednaprezanja u zavrtnjevima, pre, za vreme i nakon njegovog delovanja na uzorke (tabela 5.5 i tabela 5.6). Na osnovu ispitanih šest uzoraka (18 zavrtnjeva) može se zaključiti da su gubici sile prednaprezanja manji od 1,5%.

Tabela 5.5: Gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima usled dejstva dinamičkog opterećenja

Uzorak	Zavrtanj	$F_{p,c,d1}$ [kN]	$F_{p,c,d2}$ [kN]	$\Delta F_{p,c,d2}$ [%]	Srednja vrednost [%]
H3	H55C11	114,6	113,4	0,97	1,10
	H55C12	108,6	108,0	0,57	
	H55C13	127,6	125,4	1,77	
H6	H70C11	166,5	166,5	0,00	0,84
	H70C12	138,1	137,1	0,69	
	H70C13	174,1	170,9	1,84	
H9	H85C11	176,2	174,4	1,02	0,53
	H85C12	175,3	174,7	0,39	
	H85C13	171,8	171,6	0,17	

Tabela 5.6: Gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima usled dejstva dinamičkog opterećenja

Uzorak	Zavrtanj	$F_{p,c,d1}$ [kN]	$F_{p,c,d2}$ [kN]	$\Delta F_{p,c,d2}$ [%]	Srednja vrednost [%]
D3	D50C11	157,9	155,3	1,69	1,26
	D50C12	164,1	163,2	0,60	
	D50C13	165,0	162,5	1,49	
D6	D70C11	154,5	154,5	0,00	0,13
	D70C12	135,3	135,2	0,09	
	D70C13	114,8	114,5	0,29	
D9	D90C11	144,7	141,9	1,93	1,36
	D90C12	132,6	130,7	1,41	
	D90C13	190,4	189,0	0,75	

Ako se u obzir uzme činjenica da usled delovanja dinamičkog opterećenja dolazi do mikro sleganja u zoni navoja zavrtnja (kod HV zavrtnjeva), kao i na površini čeličnih ploča, uticaj dinamičkog opterećenja na gubitak sile prednaprezanja nije posebno značajan.

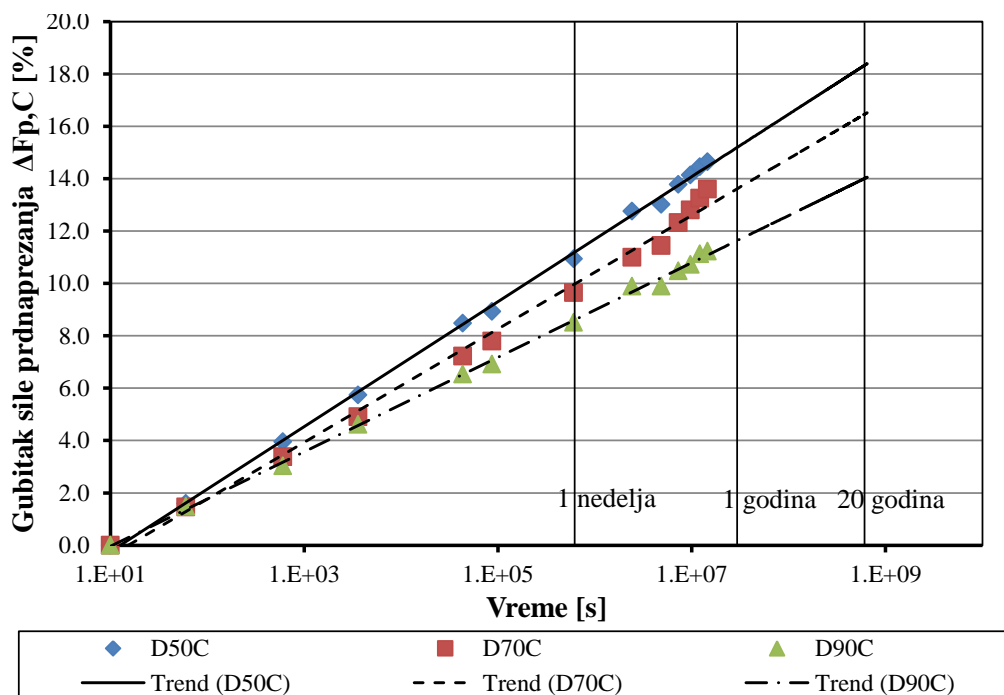
Tokom delovanja dinamičkog opterećenja na uzorke, u zavisnosti od debljine čeličnih ploča i maksimalne vrednosti dinamičke sile, dolazi do smanjenja sile prednaprezanja u zavrtnjevima i do 5%. Međutim, ovo smanjenje je trenutno (samo u toku delovanja dinamičkog opterećenja) i posledica je isključivo poprečne kontrakcije čeličnih ploča usled dinamičke sile koja deluje na uzorke. U toku delovanja primenjenog dinamičkog opterećenja ne dolazi do plastifikacije poprečnog preseka čeličnih ploča, pa po prestanku njegovog dejstva dolazi do relaksacije ploča u spoju. Samim tim i sila prednaprezanja u zavrtnjevima vraća se gotovo na početnu vrednost.

U slučaju istraživanja koji je sprovela C. Heistermann [48] spektar dinamičkog opterećenja definisan je tako da se vrednosti sile postepeno povećavaju sve dok ne dovedu do loma uzorka. Do loma uzorka usled zamora došlo je pre kraja delovanja predviđenog broja ciklusa, dakle u toku delovanja dinamičkog opterećenja. Na osnovu dobijenih rezultata, merenjem sile u zavrtnjevima, autorka zaključuje da je gubitak sile prednaprezanja usled dejstva dinamičkog opterećenja, u proseku, 5,01 %. Ovaj zaključak se bazira na vrednostima sile prednaprezanja izmerenim neposredno pred lom uzorka, što otvara pitanje njegove pouzdanosti i tačnosti. Naime, na taj način je zanemarena činjenica da pri delovanju maksimalne aksijalne sile (definisane spektrom dinamičkog opterećenja) dolazi do, za ovaj fenomen značajne, poprečne kontrakcije čeličnih ploča uzorka. Da bi se dobila stvarna slika gubitaka sile prednaprezanja u zavrtnjevima trebalo je rasteretiti uzorke nakon svakih 50000 ciklusa što bi omogućilo neutralisanje elastičnih poprečnih kontrakcija ploča i prikazivanje stvarnog nivoa sile u zavrtnjevima. Ovakva istraživanja mogu dovesti do pogrešnog zaključka o uticaju dinamičkog opterećenja na gubitke sile prednaprezanja na osnovu njihovih vrednosti neposredno pred lom uzorka, jer u tom slučaju nije moguće utvrditi koji deo gubitka sile je posledica poprečne kontrakcije ploča u spoju.

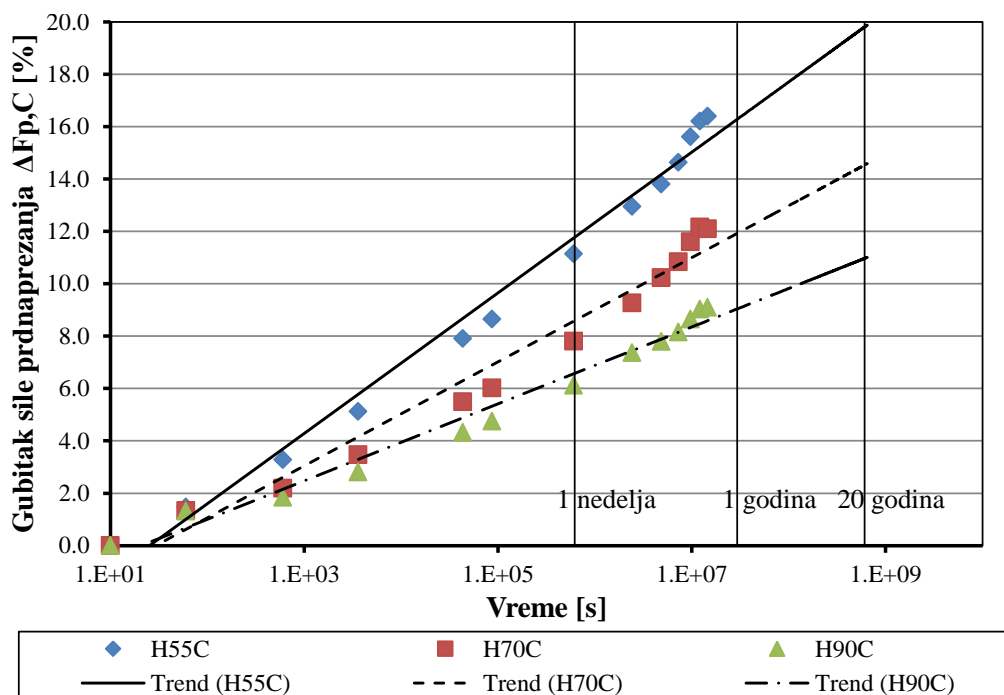
5.4 Dugoročni gubici sile prednaprezanja

Na osnovu dve faze istraživanja, sprovedne na uzorcima formiranim u različitim vremenskim trenucima, dugotrajni gubici sile prednaprezanja prikazani su za period od

24 nedelje, za koji su, u trenutku analize, postojali rezultati za sve ugrađene zavrtnjeve. Na osnovu ovih podataka, primenom metode najmanjih kvadrata, dobijene su krive koje su zatim ekstrapolirane na period od 20 godina. Na taj način moguće je predvideti dugoročnu promenu sile prednaprezanja.



Slika 5.11: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 sec nakon ugradnje zavrtnja



Slika 5.12: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 sec nakon ugradnje zavrtnja

Prikazani su dijagrami (slika 5.11 i slika 5.12) za srednje vrednosti gubitaka sile prednaprezanja, za svaki referentni vremenski trenutak. S obzirom da su inicijalni gubici sile prednaprezanja u najvećoj meri posledica metode ugradnje zavrtnjeva, kao referentni trenutak za određivanje dugoročnih gubitaka koristi se vrednost sile prednaprezanja u trenutku 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti. Dugoročni gubitak sile prednaprezanja u zavrtnjevima, u procentima, može se opisati sledećim izrazima:

- za HV zavrtnjeve dužune 50 mm:

$$\Delta F_{p,C}(t) = 1,036 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 2,6217, R^2=0,9988 \quad 5.1$$

- za HV zavrtnjeve dužine 70 mm:

$$\Delta F_{p,C}(t) = 0,9406 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 2,5597, R^2=0,9942 \quad 5.2$$

- za HV zavrtnjeve dužine 90 mm:

$$\Delta F_{p,C}(t) = 0,7837 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 1,8416, R^2=0,9985 \quad 5.3$$

- za HBT zavrtnjeve dužine 55 mm:

$$\Delta F_{p,C}(t) = 1,1654 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 3,7607, R^2=0,9848 \quad 5.4$$

- za HBT zavrtnjeve dužine 70 mm:

$$\Delta F_{p,C}(t) = 0,8627 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 2,9112, R^2=0,9719 \quad 5.5$$

- za HBT zavrtnjeve dužine 85 mm:

$$\Delta F_{p,C}(t) = 0,6381 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 1,9333, R^2=0,9798 \quad 5.6$$

gde je t vremenski trenutak u godinama nakon ugradnje zavrtnja.

Na osnovu izvedenih izraza napravljen je pregled gubitaka sile prednaprezanja nakon 24 nedelje od ugradnje zavrtnjeva (što je poslednji trenutak u kom su eksperimentalno registrovane vrednosti) i nakon 20 godina što je kraj ekstrapolacionog perioda u ovom slučaju (tabela 5.7 i tabela 5.8).

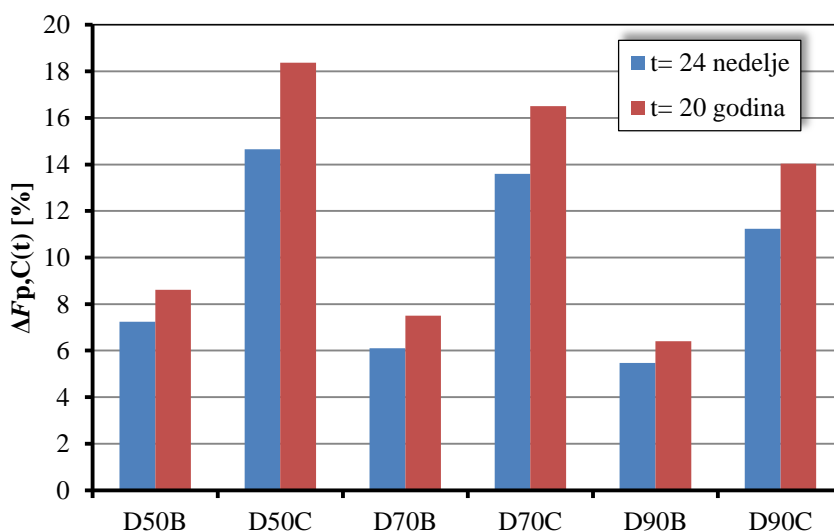
Tabela 5.7: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima

Vremenski interval t	$\Delta F_{p,C}(t)$ [%]					
	D50B	D50C	D70B	D70C	D90B	D90C
24 nedelje	7,24	14,65	6,10	13,60	5,46	11,24
20 godina	8,61	18,37	7,50	16,50	6,41	14,04

Tabela 5.8: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima

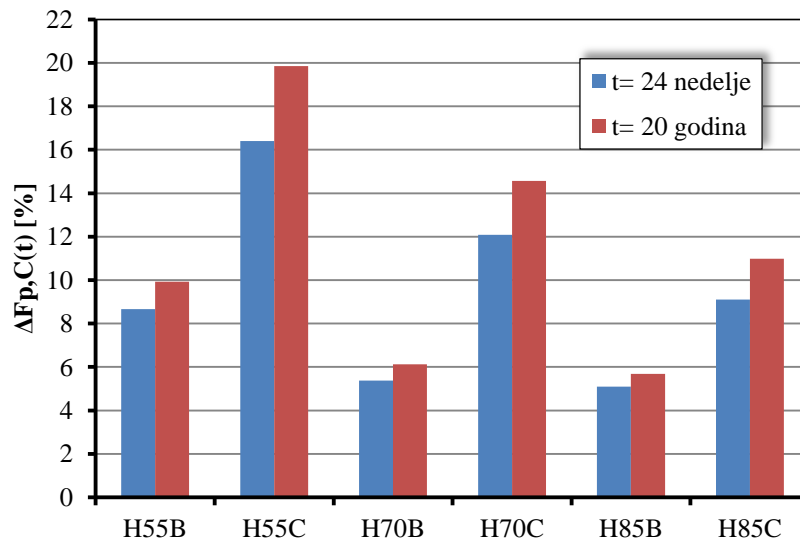
Vremenski interval t	$\Delta F_{p,C}(t)$ [%]					
	H55B	H55C	H70B	H70C	H85B	H85C
24 nedelje	8,67	16,40	5,37	12,09	5,09	9,10
20 godina	9,93	19,85	6,13	14,57	5,69	10,99

Iz prikazanih rezultata za HV zavrtnjeve (slika 5.13) može se zaključiti da prisustvo antikorozijske zaštite u vidu cink-silikatnih premaza ima značajan uticaj na dugoročne gubitke sile prednaprezanja. U zavisnosti od dužine zavrtnja, za slučaj antikorozijske zaštite nominalne debljine 75 μm nanete na šest površina, gubici sile prednaprezanja usled puzanja materijala antikorozijske zaštite iznosili su 50-55 % od dugotrajnih gubitka sile prednaprezanja registrovanog 24 nedelje nakon ugradnje zavrtnjeva. Tačnije, u slučaju zavrtnjeva dužine 50 mm ovi gubici su 50,6%, za zavrtnjeve dužine 70 mm iznose 55,1 % i za zavrtnjeve dužine 90 mm 51,4 %.



Slika 5.13: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima

U slučaju HBT zavrtnjeva (slika 5.14) gubici sile prednaprezanja usled puzanja sloja antikorozijske zaštite iznosili su 44 – 56 % od dugotrajnog gubitka sile prednaprezanja izmerenog 24 nedelje od trenutka ugradnje zavrtnjeva. Kod zavrtnjeva dužine 55 mm ovaj gubitak iznosi 47,1 %, za zavrtnjeve dužine 70 mm 55,6 % i za zavrtnjeve dužine 85 mm 44,1 %.



Slika 5.14: Dugoročni gubici sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima

Dobijeni dijagrami potvrđuju opšte poznatu činjenicu da dugoročni gubici sile prednaprezanja dominantno zavise od vrste i debljine primenjenog sistema antikorozijske zaštite. Ovim istraživanjem ustanovljen je udeo puzanja sloja antikorozijske zaštite u ukupnim dugoročnim gubicima, koji prosečno iznosi oko 50%. Analizom rezultata prikazanih u poglavlju 4 uočljivo je da kod određenog broja zavrtnjeva faze I istraživanja (zavrtnjevi za koje postoje rezultati za period od 60 nedelja) dolazi do asimptotskog ponašanja gubitaka sile prednaprezanja, jer nivo sile prednaprezanja nakon ovog perioda osciluje oko određene vrednosti. Ovo može biti indikator da se gubici sile prednaprezanja završavaju nakon određenog vremena. Ovakav zaključak nije statistički potvrđen s obzirom da je takvo ponašanje registrovano na svega 3 (ili manje) zavrtnja po tipu uzorka. Nastavak kontinuiranog praćenja sile prednaprezanja u zavrtnjevima do perioda od dve godine svakako će dati jasniju sliku ovog fenomena.

5.4.1 Karakteristične vrednosti dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima

Rezultati sprovedenog istraživanja mogu poslužiti kao osnov za davanje preporuka za proračun nosivosti tarnih spojeva. U tom slučaju, karakteristične vrednosti sile prednaprezanja u proizvoljnom vremenskom trenutku od posebnog su značaja. One su osnov za definisanje obrasca za određivanje sile prednaprezanja u zavrtnju u proizvoljnom trenutku nakon njegove ugradnje, što može biti predmet daljih

istraživanja. Takođe, s obzirom na način određivanja, karakteristične vrednosti sile prednaprezanja dobar su pokazatelj pouzdanosti sprovedenog eksperimenta. Određivanje karakterističnih vrednosti dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja sprovedeno je u svemu prema odredbama standarda EN 1990:2002 [54], a izvršeno je i njihovo poređenje sa vrednostima dobijenim eksperimentom. Statističkom obradom rezultata, primenom metode najmanjih kvadarata, definisana je linearna promena karakterističnih vrednosti gubitaka sile prednaprezanja (logaritamskoj razmeri vremena), za prve 24 nedelje i izvršena njena ekstrapolacija na period od 20 godina.

U zavisnosti od broja uzoraka u svakom od referentnih trenutaka, koeficijent k_n određen je za slučaj istraživanja u kojem nije prethodno poznata vrednost koeficijenta varijacije za posmatrani fenomen (tabela 5.9).

Tabela 5.9: Vrednosti koeficijenta k_n za 5% fraktil [54]

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x poznato	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_x nepoznato	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Karakteristične vrednosti dobijene su primenom sledećeg izraza:

$$\Delta F_{p,C,k} = \overline{\Delta F_{p,C}} \cdot \left(1 + k_n \cdot \frac{S_{\Delta F_{p,C}}}{\overline{\Delta F_{p,C}}}\right) \quad 5.7$$

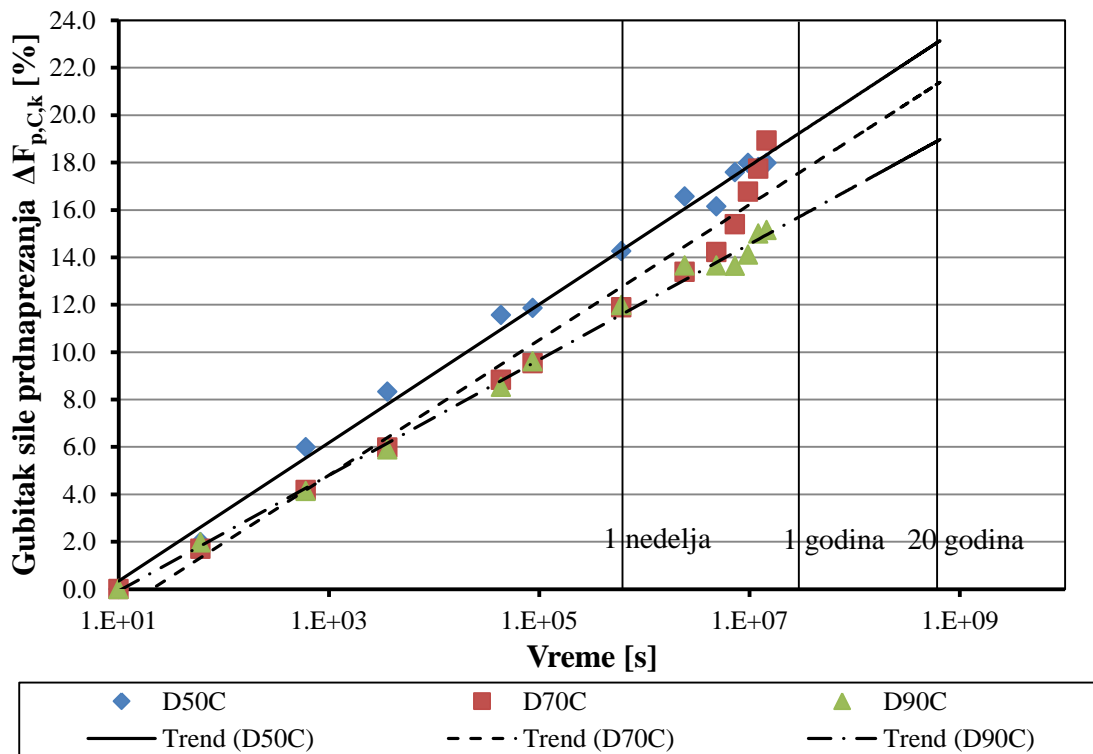
gde su:

$\Delta F_{p,C,k}$ – karakteristična vrednost gubitka sile prednaprezanja,

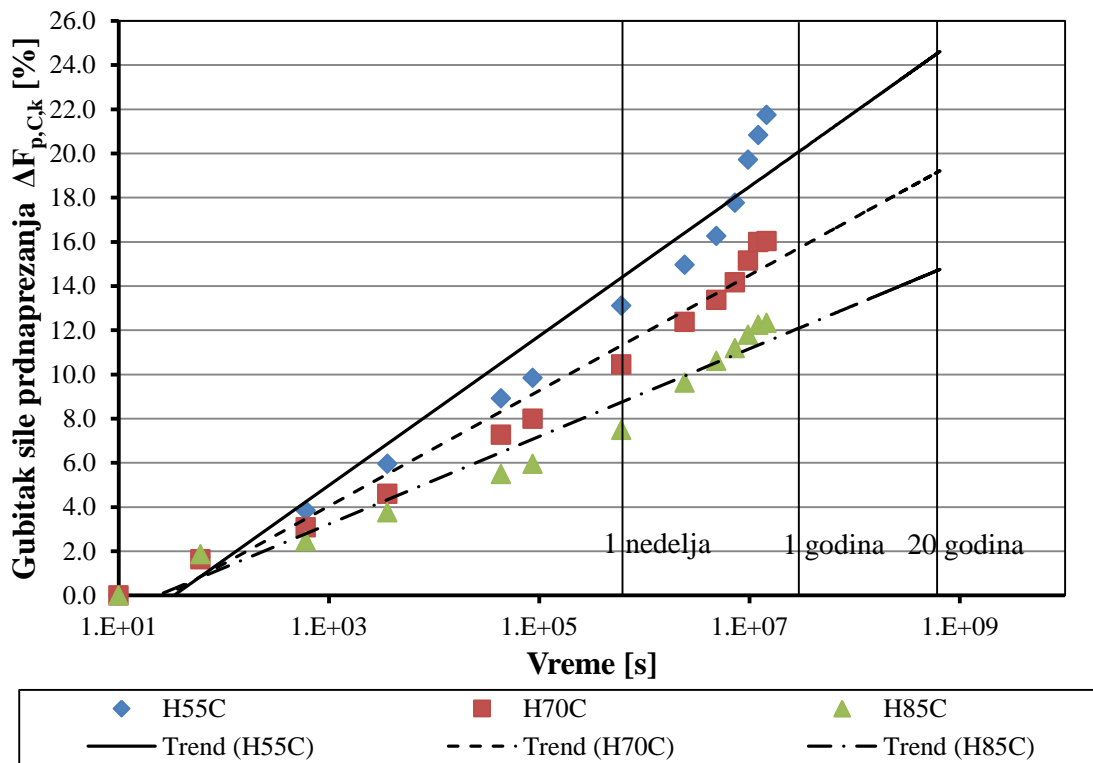
$\overline{\Delta F_{p,C}}$ - srednja vrednost gubitaka sile prednaprezanja,

$S_{\Delta F_{p,C}}$ - standardna devijacija gubitaka sile prednaprezanja.

Primenom navedenog izraza određene su karakteristične vrednosti gubitaka sile prednaprezanja, definisana njihova linearna promena kroz vreme i izvršena njena ekstrapolacija na period od 20 godina (slika 5.15 i slika 5.16).



Slika 5.15: Karakteristične vrednosti dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 s nakon ugradnje zavrtnja



Slika 5.16: Karakteristične vrednosti dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja u HBT zavrtnjevima u odnosu na silu ostvarenu 10 s nakon ugradnje zavrtnja

Na osnovu rezultata ekstrapolacije dobijene su sledeće ekstrapolacione krive:

- za HV zavrtnjeve dužine 50 mm:

$$\Delta F_{p,C,k}(t) = 1,2675 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 2,5729, R^2=0,9947 \quad 5.8$$

- za HV zavrtnjeve dužine 70 mm:

$$\Delta F_{p,C,k}(t) = 1,2385 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 3,7405, R^2=0,9730 \quad 5.9$$

- za HV zavrtnjeve dužine 90 mm:

$$\Delta F_{p,C,k}(t) = 1,0588 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 2,5108, R^2=0,9960 \quad 5.10$$

- za HBT zavrtnjeve dužine 55 mm:

$$\Delta F_{p,C,k}(t) = 1,4676 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 5,157, R^2=0,9569 \quad 5.11$$

- za HBT zavrtnjeve dužine 70 mm:

$$\Delta F_{p,C,k}(t) = 1,1344 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 3,7941, R^2=0,9749 \quad 5.12$$

- za HBT zavrtnjeve dužine 85 mm:

$$\Delta F_{p,C,k}(t) = 0,8613 \cdot \ln(31,536 \cdot 10^6 \cdot t) - 2,7183, R^2=0,9642 \quad 5.13$$

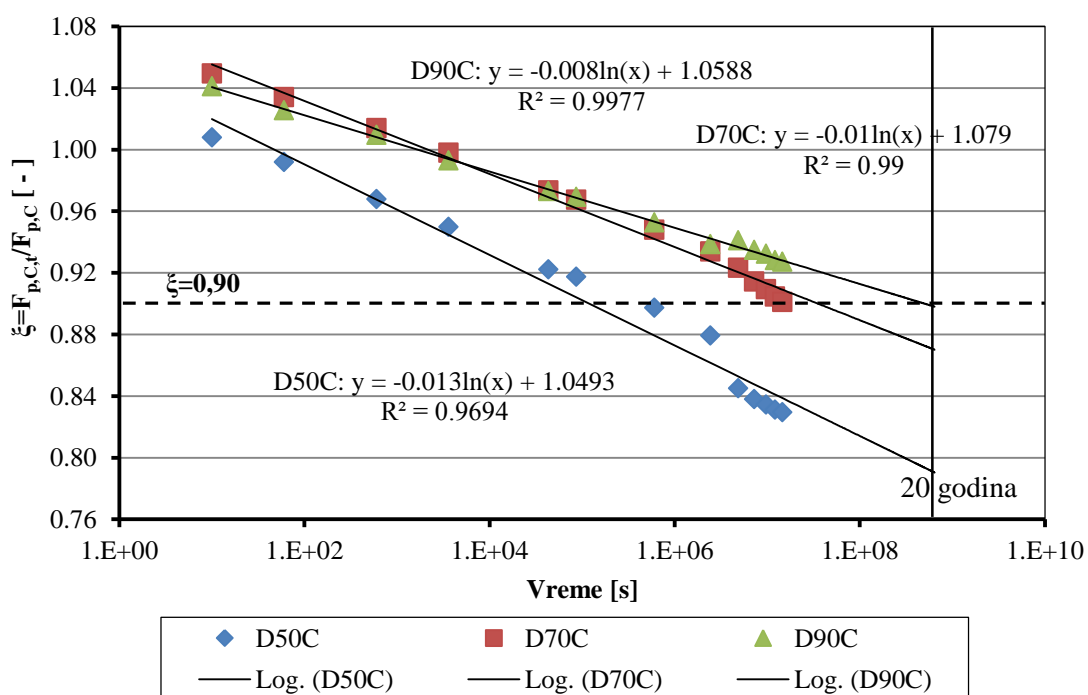
5.4.2 Odnos registrovane i minimalne propisane sile prednaprezanja u zavrtnju

Pored kvantifikacije gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima, sprovedenim istraživanjem dobijeni su dragoceni podaci za definisanje preostale sile prednaprezanja (nakon referentnog vremenskog perioda) u funkciji njene minimalne propisane vrednosti. Radi efikasnijeg prikaza dobijenih rezultata definisan je koeficijent $\zeta(t)$ koji predstavlja odnos stvarne sile prednaprezanja u zavrtnju $F_{p,C,t}$ i njene minimalne propisane vrednosti $F_{p,C}$, u trenutku t . Vodeći računa o odredbama standarda [23] (pritezanje se vrši na 110 % od propisane vrednosti momenta pritezanja) i u istraživanju primenjenom načinu ugradnje zavrtnjeva (pritegnuti na 100 % propisanog momenta pritezanja), ustanovljena je granična vrednost za HV zavrtnjeve, $\zeta = 0,90$. Dakle, smatra se da nosivost HV zavrtnjeva za koje je vrednost $\zeta \geq 0,90$ na kraju eksploatacionog perioda, nije ugrožena gubitkom sile prednaprezanja.

U slučaju HBT zavrtnjeva, koji se iz tehnoloških razloga ugrađuju u jednoj fazi (odjednom), ne postoji mogućnost diktiranja vrednosti unete sile prednaprezanja, kao ni mogućnost dotezanja zavrtnjeva. Može se smatrati da nosivost HBT zavrtnja koji na

kraju eksploatacionog perioda ima vrednost $\zeta \geq 1,00$ nije ugrožena usled gubitka sile prednaprezanja.

Na osnovu registrovanih vrednosti u referentnim vremenskim trenucima, a nakon statističke obrade primenom metode najmanjih kvadrata, određena je promena koeficijenta ζ kroz vreme, kako za HV (slika 5.17), tako i za HBT zavrtnjeve (slika 5.18). U oba slučaja izvršena je ekstrapolacija dobijenih krivih na period od 20 godina. Predmet ove analize su zavrtnjevi ugrađeni u uzorke sa antikorozijskom zaštitom. Slično se moglo uraditi i za zavrtnjeve ugrađene u uzorke bez antikorozijske zaštite, ali s obzirom da se radi o etalonskim uzorcima smatra se da to nije od interesa.

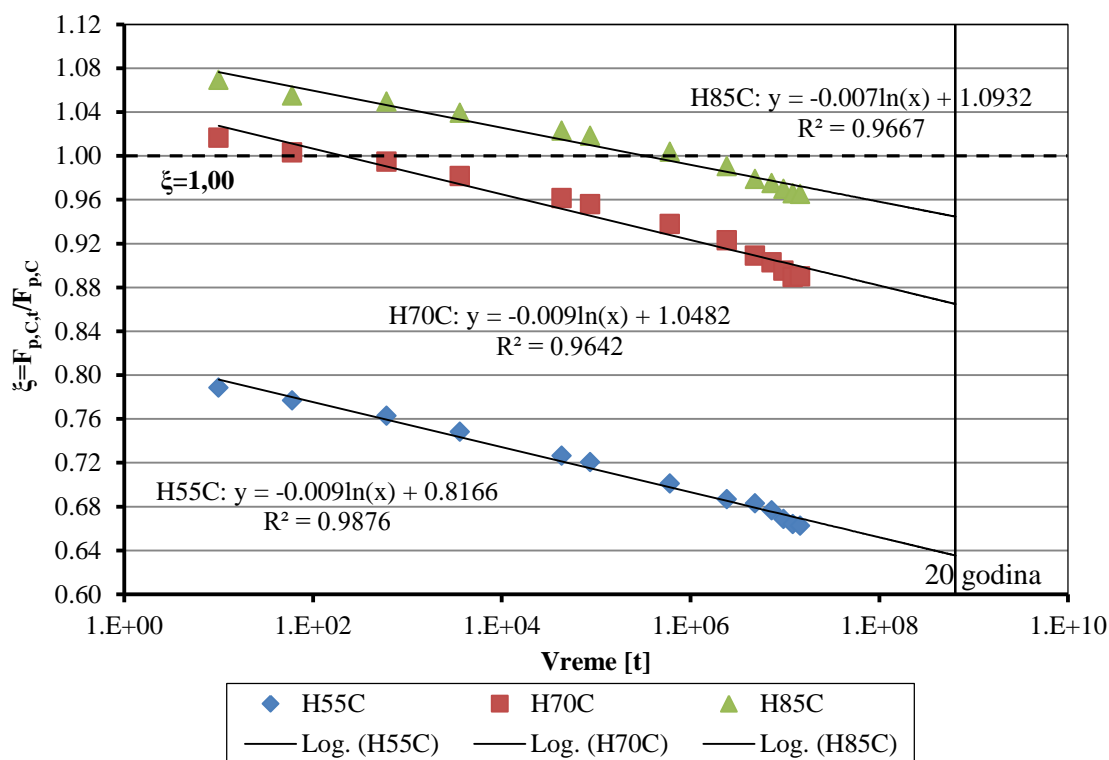


Slika 5.17: Promena koeficijenta ζ za HV zavrtnjeve tokom vremena

Na osnovu definisanih krivih napravljen je pregled vrednosti koeficijenta ζ nakon 24 nedelje od ugradnje zavrtnjeva (što je poslednji trenutak u kom su vrednosti dobijene eksperimentom) i nakon 20 godina što je kraj ekstrapolacionog perioda (tabela 5.10 i tabela 5.11).

Tabela 5.10: Vrednosti koeficijenta ζ za HV zavrtnjeve

Vremeski trenutak t	Vrednost koeficijenta ζ		
	D50C	D70C	D90C
24 nedelje	0,83	0,90	0,93
20 godina	0,79	0,86	0,89



Slika 5.18: Promena koeficijenta ξ za HBT zavrtnjeve tokom vremena

Tabela 5.11: Vrednosti koeficijenta ξ za HBT zavrtnjeve

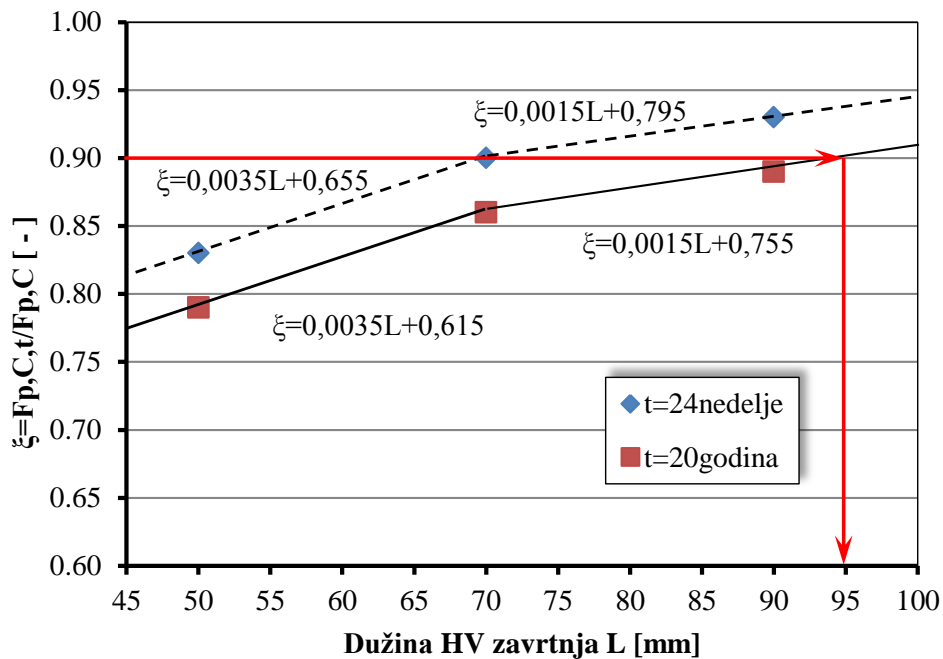
Vremeski trenutak t	Vrednost koeficijenta ξ		
	H55C	H70C	H85C
24 nedelje	0,66	0,89	0,97
20 godina	0,63	0,87	0,95

Iz prikazanih rezultata jasno je uočljivo da je prosečna vrednost koeficijenta ξ nakon 20 godina, za sve tri dužine zavrtnjeva, ispod graničnih vrednosti. Za HV zavrtnjeve on se kreće u granicama 0,79 – 0,89 i može se reći da je u slučaju zavrtnjeva dužine 90 mm, fenomen gubitka sile prednaprezanja gotovo zanemarljiv. Sa druge strane, prosečna vrednost koeficijenta ξ kod ispitivanih HBT zavrtnjeva kreće se u granicama 0,63 -0,95. Jasno je uočljivo veliko odstupanje ostvarene od propisane sile prednaprezanja kod najkraćih zavrtnjeva, što može kompromitovati njihovu primenu u tarnim spojevima. Ukoliko bi se želela odrediti granična dužina HBT i HV zavrtnjeva, iznad koje je gubitak sile prednaprezanja zanemarljiv, neophodno je sprovesti detaljniju analizu.

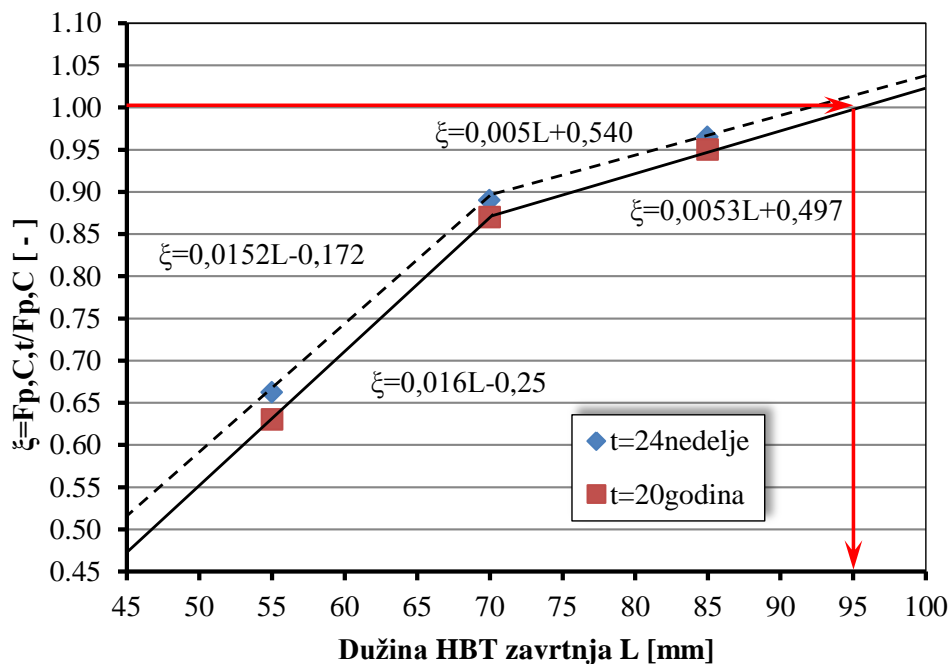
5.4.3 Dugoročni gubici sile prednaprezanja u funkciji dužine visokovrednog zavrtnja

Tri različite dužine primenjenih zavrtnjeva omogućavaju analizu gubitaka sile prednaprezanja u funkciji ovog parametra. Takva analiza je sprovedena sa ciljem da se predmetnim istraživanjem daju preporuke i za ostale dužine zavrtnjeva.

Na osnovu rezultata istraživanja prikazan je dijagram promene koeficijenta ξ u funkciji dužine HV i HBT zavrtnjeva (slika 5.19 i slika 5.20). Za vrednosti dobijene nakon 24 nedelje i 20 godina, analizirana je veza ξ -L kao parabolična ili kao bi-linearna. S obzirom da zavisnost u obliku kvadratne parabole nije dala realnu sliku izvan opsega dužina korišćenih zavrtnjeva, usvojena je bi-linearna funkcija. Kao prelomna tačka dijagrama usvojena je vrednost koja odgovara dužini zavrtnja od 70 mm. Ovako definisane krive mogu se ekstrapolirati na čitav opseg dužina definisanih standardom (45-155 mm za HV odnosno 45-115 mm za HBT zavrtnjeve).



Slika 5.19: Promena koeficijenta ξ u funkciji dužine HV zavrtnjeva



Slika 5.20: Promena koeficijenta ξ u funkciji dužine HBT zavrtnjeva

Na osnovu prikazane interpolacije i prethodno definisanih graničnih vrednosti koeficijenta ξ , jasno se može uočiti da je za zavrtnjeve (HV i HBT) dužine veće ili jednake 95 mm, fenomen gubitaka sile prednaprezanja minoran, pa se može zanemariti.

5.5 Numeričko i analitičko određivanje fleksibilnosti spojeva sa prednapregnutim visokovrednim zavrtnjevima

5.5.1 Ciljevi numeričkih analiza

U okviru ovog rada izvršena je numerička analiza primenom metode konačnih elemenata. U prvom redu numerička analiza je sprovedena u cilju utvrđivanja razloga odstupanja vrednosti dilatacija mernih traka unutar zavrtnjeva od očekivanih nominalnih vrednosti. Za oba tipa zavrtnjeva (HV i HBT) i njihove različite dužine, eksperimentalnim putem, dobijene su različite vrednosti relativnih odnosa merenih i nominalnih dilatacija u zavrtnjevima. Pretpostavlja se da je uzrok ovome različit položaj mernih traka u odnosu na deo zavrtnja na kom se nalazi navoj, kao i odnos dužina dela zavrtnja sa navojem i bez. Za potrebe analize ovog fenomena korišćeni su numerički modeli čija geometrija i granični uslovi odgovaraju postavci eksperimentalne kalibracije zavrtnjeva.

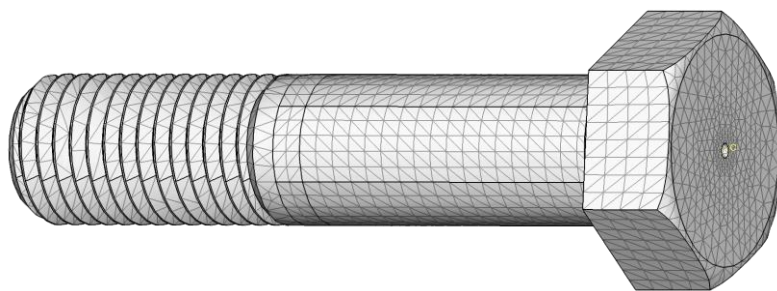
Drugi cilj numeričke analize je određivanje fleksibilnosti pojedinih delova zavrtnjeva t.j. utvrđivanje tačne zavisnosti promene rastojanja između dve podloške u funkciji promene sile u zavrtnju. Prvo je izvršena verifikacija postojećih analitičkih izraza za određivanje fleksibilnosti zavrtnjeva tipa HV, a zatim su na osnovu rezultata analize MKE date i preporuke za zavrtnjeve tipa HBT. Fleksibilnost zavrtnja, zajedno sa felksibilnošću steznog paketa, služi kao osnov za određivanje promene dilatacije slojeva premaza kroz vreme usled pojave puzanja, što uzrokuje pad sile prednaprezanja u zavrtnju.

5.5.1.1 Prikaz modela

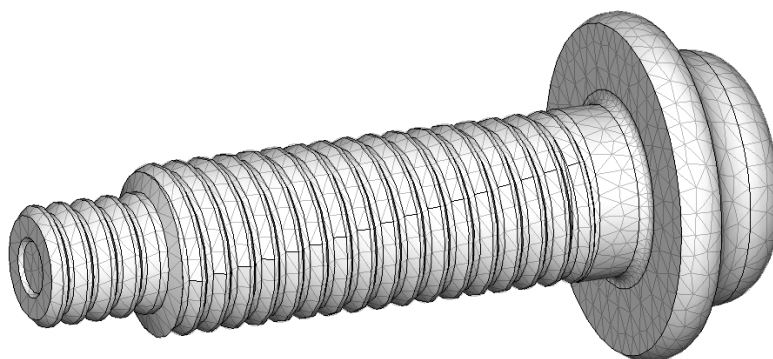
Numerička analiza sprovedena je koristeći široko rasprostranjeni softverski paket za proračun primenom metode konačnih elemenata ABAQUS [71].

U okviru primenjenih modela, definisani su delovi: zavrtnanj, podloška, navrtka, čaura, lepak za mernu traku i alat za unošenje sile prednaprezanja. Svi delovi u okviru modela su definisani svojom tačnom geometrijom (slika 5.21 i slika 5.22), kako bi uticaj geometrije na mestu navoja i u zoni glave, kao i međusobne interakcije ovih delova bile uzete u obzir. Specifičan oblik i odgovarajuća dubina navoja za zavrtnjeve tipa HBT adekvatno je reprodukovana u modelima na bazi MKE (slika 5.21b), a na osnovu izmerenih dimenzija. Svi zavrtnjevi su modelirani sa rupama u kojima je bio smešten lepak i merna traka u toku eksperimentalnog ispitivanja. Dubine rupa u numeričkim modelima odgovaraju srednje izmerenim dužinama rupa za različite dužine zavrtnjeva u okviru eksperimentalnih ispitivanja.

Za sve delove u modelima korišćeni su prostorni desetočvorni tetraedarski konačni elementi drugog reda, sa kvadratnim interpolacionim funkcijama (C3D10M). Pored toga što ovi konačni elementi pružaju mogućnost automatskog formiranja mreže na komplikovanim geometrijskim oblicima kakvi su ovde analizirani (slika 5.21 i slika 5.22), oni su i iz celokupne biblioteke softverskog paketa ABAQUS preporučeni za primenjeni tip analize [71].

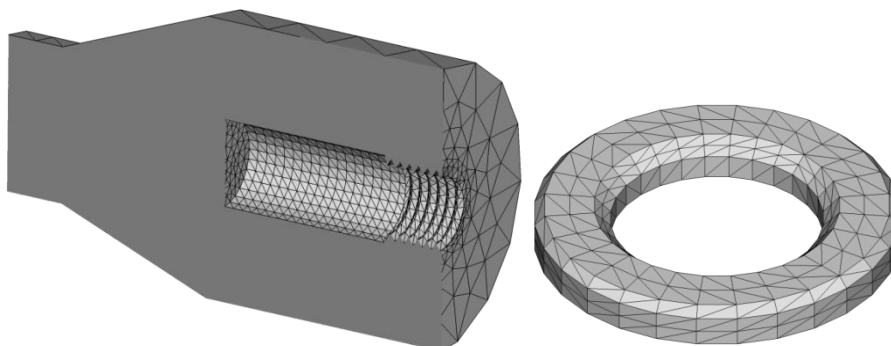


a) Standardni prednapregnuti zavrtnjevi tipa HV

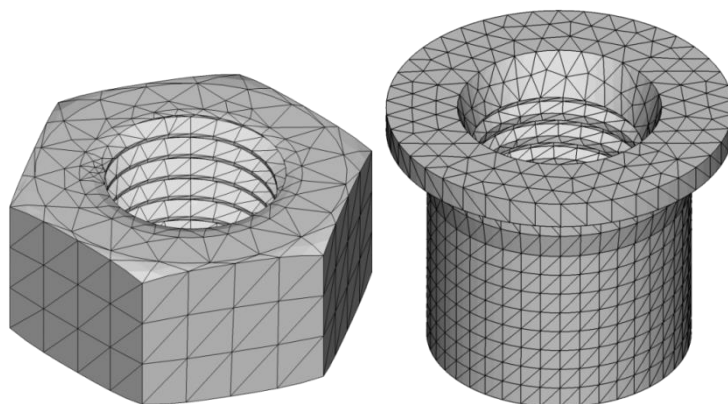


b) Zavrtnjevi tipa Huck BobTail (HBT)

Slika 5.21: Geometrija zavrtnjeva u modelima na bazi MKE.



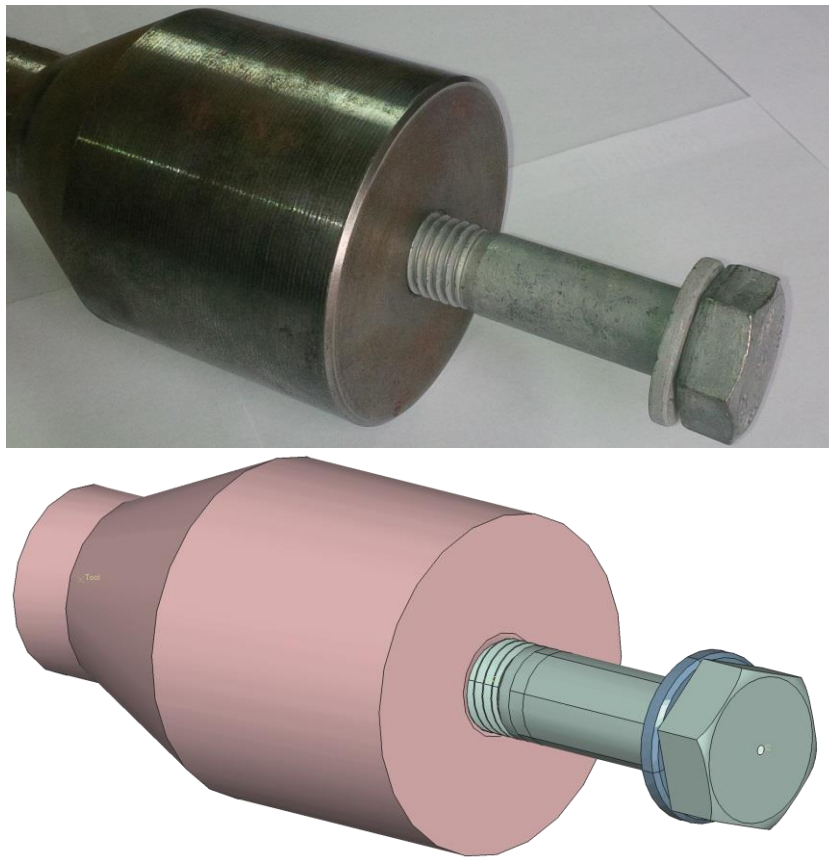
a) Alat za unošenje sile prednaprezanja b) Podloška za zavrtnjeve tipa HV



c) Navrtka za zavrtnjeve tipa HV d) Čaura za zavrtnjeve tipa HBT

Slika 5.22: Geometrija ostalih delovima u modelima.

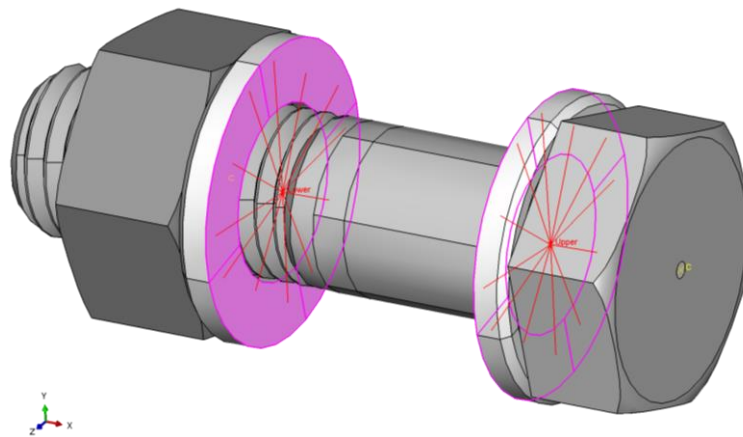
Prva faza numeričke analize predstavlja direktno poređenje se eksperimentalnim ispitivanjima kalibracije zavrtnjeva, zbog čega je za potrebe ovih analiza modeliran i alat za unošenje sile prednaprezanja (slika 5.23). U ovom modelu je opterećenje naneto identično kao i u eksperimentu, pomeranjem alata u pravcu podužne ose zavrtnja. Prilikom unošenja sile kontrolisanim deformacijama, drugi deo alata, koji ovde nije modeliran, je držao na mestu podlošku koja se nalazi ispod glave zavrtnja. U modelu na bazi MKE ovaj granični uslov idealizovan je tako što je donja površina podloške (slika 5.23) imala sprečene deformacije u pravcu podužne ose zavrtnja. Analiza rezultata i poređenje je vršeno očitavanjem vrednosti pomeranja alata, reaktivne sile i dilatacija unutar lepka.



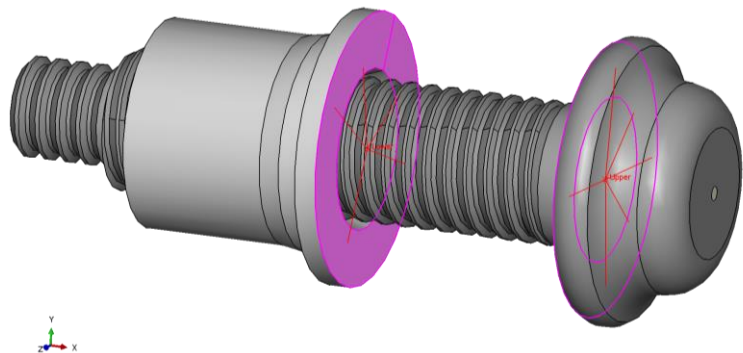
Slika 5.23: Model za direktno poređenje eksperimentalne i numeričke kalibracije zavrtnjeva tipa HV

Modeli druge faze numeričke analize (slika 5.24) korišćeni su za verifikaciju postojećih izraza za fleksibilnosti delova zavrtnjeva tipa HV i za definisanje takvih sličnih izraza za zavrtnjeve tipa HBT. Zbog toga su u okviru ovih modela definisani svi delovi koji su van steznog paketa, t.j. od podloške do podloške u slučaju zavrtnjeva tipa HV i od čaure do glave u slučaju zavrtnjeva tipa HBT. Između ovih površina

opterećenje je naneto kontrolom deformacija pri čemu je očitavana relativna sila zatezanja i dilatacije u lepku na mestu merne trake. Kontrolisano pomeranje je nanošeno između referentnih tačaka u centrima podloški (HV - Slika 5.24a) i površina čaure i glave (HBT - Slika 5.24b) za koje su pomenute površine bile kinematski vezane kao kruto telo.



a) Zavrtnjevi tipa HV



b) Zavrtnjevi tipa HBT

Slika 5.24: Geometrija modela za određivanje fleksibilnosti delova zavrtnjeva.

Spoj između lepka i rupe unutar zavrtnja definisan je direktnim kinematskim vezama između susednih čvorova delova modela koji predstavljaju zavrtnanj i lepak (*Tie Constraint*). Za sve ostale kontaktne parove (parove površina) u modelima, definisan je opšti kontakti kriterijum (*General Contact*) sa mogućnošću odvajanja („*Hard*“ *contact – Normal Behaviour*) i koeficijentom trenja od 0,14 („*Penalty*“ *formulation – Tangential Behaviour*). Softverski paket ABAQUS za primenjeni tip analize, automatski detektuje sve kontaktne parove u modelu i za te parove primenjuje zadati kriterijum.

5.5.1.2 Modeli materijala

Numerička analiza u okviru ovog istraživanja sprovedena je za potrebe analize rezultata koje se uglavnom nalaze u elastičnoj oblasti. Zbog toga je za delove podloške i alata za unošenje sile prednaprezanja usvojen jednostavan, elastičan, model ponašanja materijala u „*Abaqus-u*“. Usvojena je vrednost modula elastičnosti od $E = 210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ i Poasonov koeficijent $\nu = 0,3$. Za zavrtnjeve, navrtku i čauru je usvojen idealan elasto-plastičan model ponašanja, model bez ojačanja. Elastične karakteristike materijala su iste kao i za ostale delove, a granica razvlačenja od $f_y = 1000 \text{ MPa}$ je usvojena u skladu sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja (tabela 3.2 i tabela 3.4). Razlog za definisanje plastičnog ponašanja zavrtnjeva, navrtke i čaure je moguća lokalna plastifikacija u zoni navoja, čak i pri elastičnom ponašanju ostalih delova zavrtnjeva na nivou naprezanja koji odgovara punoj sili prednaprezanja. Lepak za ugradnju mernih traka opisan je prostim linearno-elastičnim modelom ponašanja, sa modulom elastičnosti $E = 3,5 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$, prema preporuci proizvođača.

5.5.1.3 Tip analize

U ovako definisanim modelima postoji veliki broj kontaktnih interakcija, sa obzirom da su zavrtnjevi i ostali elementi definisani sa svojom tačnom geometrijom u zoni navoja. Takođe, primenjen je elasto-plastičan model materijala, što sve zajedno predstavlja problem pri rešavanju numeričkog modela konvencionalnim „*implicitnim*“ metodama zbog poteškoća sa konvergencijom rezultata. Ovakve probleme je dosta uspešno moguće rešiti kvazi-statičkom analizom primenom dinamičkih „*eksplicitnih*“ solvera. Ovakav pristup je primenjen i za rešavanje ovde prikazanih numeričkih modela u okviru softverskog paketa „*Abaqus*“ (*Abaqus/Explicit*). U dinamičkoj eksplicitnoj analizi nije potrebno vršiti inverziju matrice krutosti, pa zbog toga i nema problema sa konvergencijom rezultata. Sa druge strane, pošto se vrši numerička integracija diferencijalne jednačine kretanja, veoma je važno usvojiti dovoljno mali vremenski interval integracije kako bi rezultati bili ispravni. Potrebni vremenski interval integracije softver određuje automatski, u zavisnosti od veličine najmanjeg elementa u okviru mreže i brzine prostiranja smičućih talasa kroz taj element (karakteristika materijala). Dinamički proračun u realnom vremenu eksperimenata bi zbog toga trajao jako dugo, i po nekoliko dana primenom današnjih konvencionalnih računara. Pošto je u okviru ovog istraživanja od interesa statičko ponašanje uzoraka, u kvazi-statičkoj analizi može

se izvršiti ili skraćenje vremena ili uvećanje masa kako bi vreme potrebno za proračun bilo skraćeno. U okviru analiza prikazanih u ovom istraživanju pimenjena je tehnika prostorno neuniformnog i kroz vreme promenljivog uvećanja masa konačnih elementa (*variable non-uniform mass scaling*). Ovaj proces softverski paket „*Abaqus*“ obavlja automatski za zadati željeni vremenski interval integracije. U modelima koji su ovde prikazani korišćen je interval vremenske integracije od $\Delta t = 0,0005$ s, a vreme nanošenja opterećenja iznosilo je $t = 10$ s.

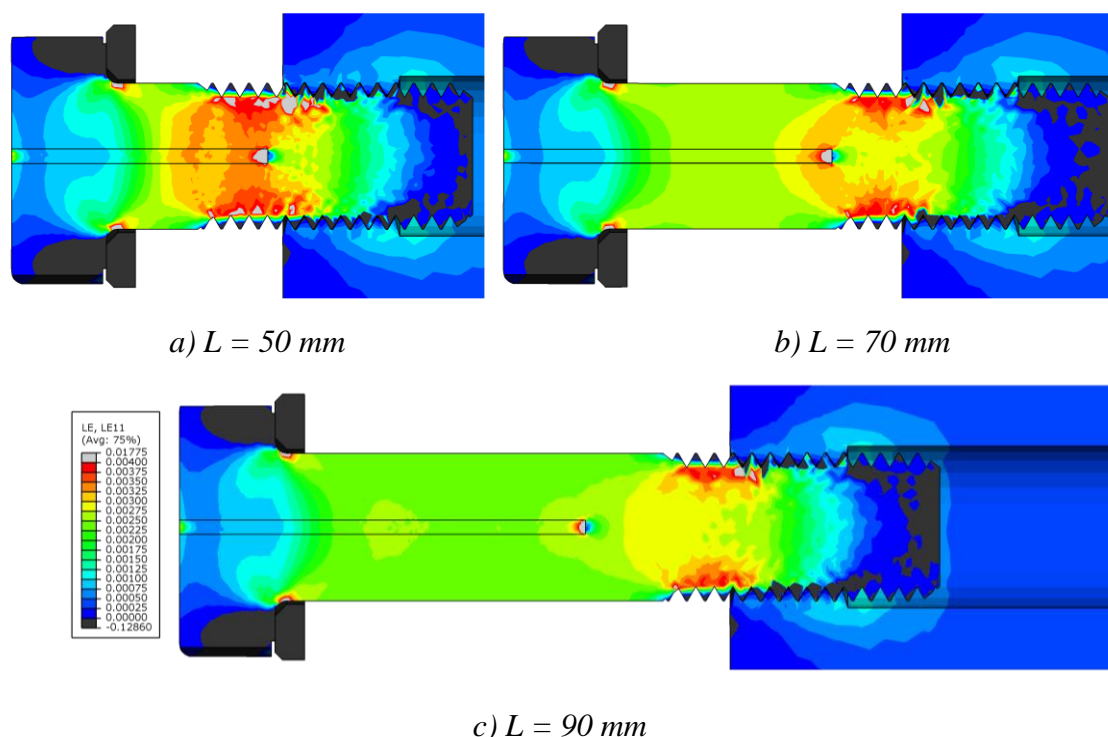
5.5.2 Rezultati i poređenje

Prikaz rezultata podeljen je u dva dela. Prvi deo se odnosi na poređenje rezultata numeričke analize i eksperimenata, na bazi stvarnih i nominalnih dilatacija na mestu merne trake u zavrtnjevima. Ovaj deo praktično predstavlja potvrdu verodostojnosti rezultata numeričke analize i bliže prikazuje podužnu raspodelu dilatacija u zavrtnjevima. Drugi deo predstavlja analizu fleksibilnosti pojedinih delova zavrtnjeva.

5.5.2.1 Dilatacije mernih traka

Prikaz podužnih dilatacija zatezanja, u podužnom preseku kroz zavrtnj tipa HV i kroz alat za kalibraciju, dat je (na osnovu rezultata numeričke analize) za različite dužine zavrtnjeva (slika 5.25). Podužne dilatacije su predstavljene bojama spektra u granicama od 0,0 do 0,004 mm/mm, i prikazane su pri istom nivou naprezanja koji odgovara sili prednaprezanja $F_{p,C} = 171,5$ kN, radi lakšeg poređenja. U numeričkoj analizi, položaj i dubina rupa za merne trake koje su ispunjene lepkom u potpunosti odgovara položaju ovih rupa u eksperimentima. Preporuka proizvođača mernih traka je da se ona nalazi u sredini debljine steznog paketa. Takođe, preporučeno je i da se sredina merne trake nalazi na približno 8-10 mm od dna rupe [67]. Sve ovo uzrokovalo je da se u tri razmatrana slučaja merna traka nalazila u tri različite zone u odnosu na položaj navoja. Ova činjenica u velikoj meri utiče na vrednost dilatacije na mestu merne trake, u tri različita slučaja, pri istoj vrednosti sile. Naime, dilatacija na mestu navoja je veća od dilatacije na mestu tela zavrtnja, zbog redukovane površine poprečnog preseka. Analogno tome, dilatacije na mestu glave su značajno manje od dilatacija na mestu tela zavrtnja. Konačno, koncentracija dilatacija na dnu rupe je veoma izražena, što se može uočiti u rezultatima za sve tri razmatrane dužine zavrtnjeva (slika 5.25).

U svim slučajevima, za oba tipa zavrtnjeva i za sve tri dužine, u eksperimentima koji odgovaraju kalibraciji zavrtnjeva, uočene su uvećane dilatacije koje su očitane sa mernih traka u odnosu na očekivane nominalne dilatacije za datu vrednost sile. Uvećane dilatacije na mestu merne trake mogu biti posledica tri fenomena: 1. redukovanog poprečnog preseka zavrtnja zbog postojanja rupe za mernu traku, 2. lokalne koncentracije dilatacija u zoni dna rupe i 3. uvećanih dilatacija u zoni navoja.



Slika 5.25: Raspodela podužnih dilatacija u zavrtnjevima tipa HV pri punoj sili prednaprezanja $F_{p,C}=171,5 \text{ kN}$.

Odnos stvarne i nominalne dilatacije na mestu merne trake, pri punoj sili prednaprezanja, određen je na osnovu rezultata eksperimenata $\alpha_{\text{EXP}} = \varepsilon_{\text{nom}}/\varepsilon_{\text{mt,EXP}}$ i numeričke analize $\alpha_{\text{MKE}} = \varepsilon_{\text{nom}}/\varepsilon_{\text{mt,MKE}}$ (tabela 5.12).

Pri punoj sili prednaprezanja, očekivana nominalna dilatacija u zavrtnju se može odrediti kao odnos nanete vrednosti sile ($F_{p,C}$) i aksijalne krutosti tela zavrtnja:

$$\varepsilon_{\text{nom}} = \frac{F_{p,C}}{E_z \cdot A_z} \quad 5.14$$

gde su:

E_z – modul elastičnosti materijala zavrtnja

A_z – površina poprečnog preseka zavrtnja

Za zavrtnjeve tipa HV pri određivanju nominalne površine korišćen je nazivni prečnik zavrtnja ($d = 20$ mm) dok je za zavrtnjeve tipa HBT korišćen izmereni spoljašnji prečnik navoja ($d = 19,6$ mm). Baza merenja merne trake je 6 mm, pa je dilatacija u numeričkoj analizi ϵ_{MKE} , koja odgovara osrednjenim eksperimentalno određenim vrednostima ϵ_{EXP} , određena kao osrednjena vrednost na dužini od 6 mm (slika 5.26 i slika 5.28 – osenčene zone).

Tabela 5.12: Odnosi nominalnih i stvarnih dilatacija na mestu merne trake

Zavrtnanj		$F_{p,C}$ [kN]	Nominalna dilatacija ϵ_{nom}	Dilatacija prema MKE $\epsilon_{mt, MKE}$	Izmerena dilatacija $\epsilon_{mt, EXP}$	Koef. varij. $V_{X, EXP}$	α_{MKE}	α_{EXP}	$\alpha_{MKE} / \alpha_{EXP}$
Tip	Dužina [mm]								
HV	50	171,5	0,00258	0,00322	0,00327	4,81	0,81	0,81	1,01
HV	70	171,5	0,00258	0,00281	0,00294	5,31	0,92	0,89	1,04
HV	90	171,5	0,00258	0,00263	0,00278	4,16	0,98	0,95	1,05
HBT	55	170,7	0,00268	0,00293	0,00307	4,02	0,92	0,87	1,05
HBT	70	170,7	0,00268	0,00309	0,00315	4,44	0,87	0,86	1,02
HBT	85	170,7	0,00268	0,00308	0,00317	3,75	0,87	0,84	1,03

Razlika u rezultatima eksperimentalno i numerički određenog faktora α je od 1 % do 5 % (tabela 5.12) pa se može zaključiti da numerička analiza dosta verno oslikava stvarno ponašanje zavrtnjeva oba tipa koji su ispitani u okviru ovog istraživanja. Razlike u rezultatima numeričke analize i eksperimenata mogu poticati od nominalno usvojene vrednosti modula elastičnosti u numeričkoj analizi ($E_{MKE} = 210 \cdot 10^3$ N/mm²) i stvarne vrednosti koja eksperimentalno nije utvrđena ali najčešće iznosi $205 \cdot 10^3$ N/mm².

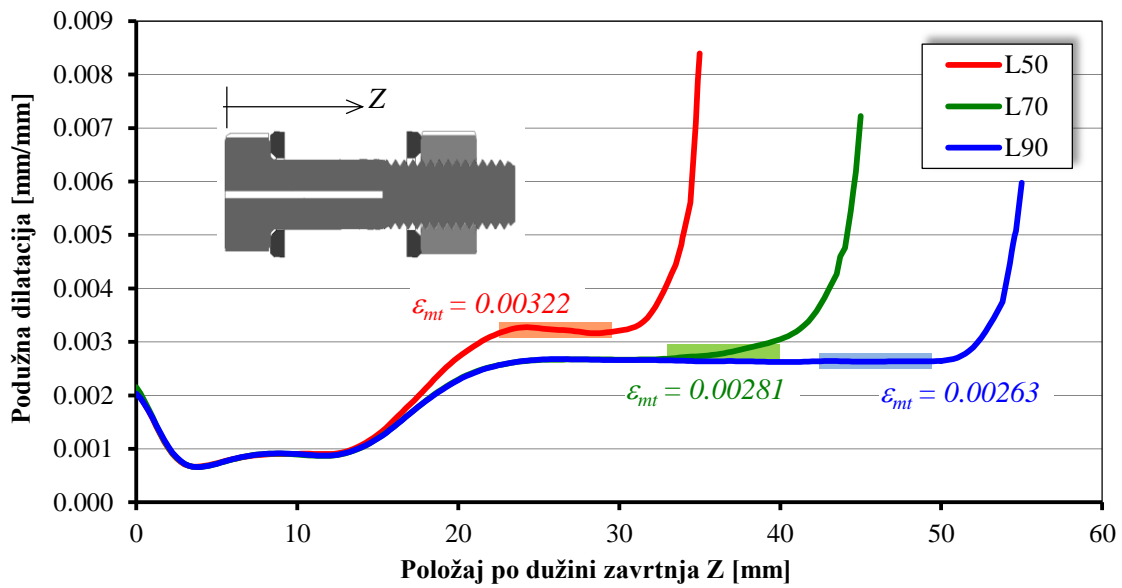
Da bi se uočene razlike u vrednostima dilatacija na mestu merne trake lakše objasnile, iz rezultata numeričke analize, prikazane su podužne dilatacije po visini zavrtnja u osi, t.j. duž lepka u rupi (slika 5.26 i slika 5.28). Ovakvi dijagrami prikazani su za oba tipa zavrtnjeva, za tri različite dužine, pri vrednostima sila koje odgovaraju silama prednaprezanja: $F_{p,C} = 171,5$ kN i $F_{p,C} = 170,7$ kN, za zavrtnjeve tipa HV i HBT, respektivno. Odmah se može uočiti da su dilatacije u zoni glave i u početnom delu koji odgovara telu zavrtnja identične za različite dužine zavrtnjeva što na još jedan način potvrđuje tačnost primenjenog načina vršenja numeričke analize.

U skoro svim slučajevima prisutan je svojevrsan „plato“ dilatacija koji odgovara središnjoj zoni zavrtnja sa konstantnim poprečnim presekom: telo zavrtnja u slučaju tipa HV i slobodan navoj u slučaju tipa HBT. Svakako da je očitavanje vrednosti dilatacije u

eksperimentima najpouzdanije ukoliko se merna traka nalazi u zoni ovog platoa. U slučajevima koji su ovde analizirani, položaji mernih traka (slika 5.26 i slika 5.28 - osenčene zone dužine 6 mm) poklapaju se sa zonom „platoa“ dilatacija. Dakle, preporuka proizvođača mernih traka da se njihova sredina nalazi na 8-10 mm od dna rupe je ispravna [67].

Analizirajući prikazane dijagrame mogu se izvesti zaključci o razlozima različitih vrednosti dilatacija za različite dužine zavrtnjeva pri istoj sili prednaprezanja. Za zavrtnjeve tipa HV (slika 5.26a) karakteristične su sledeće tri situacije:

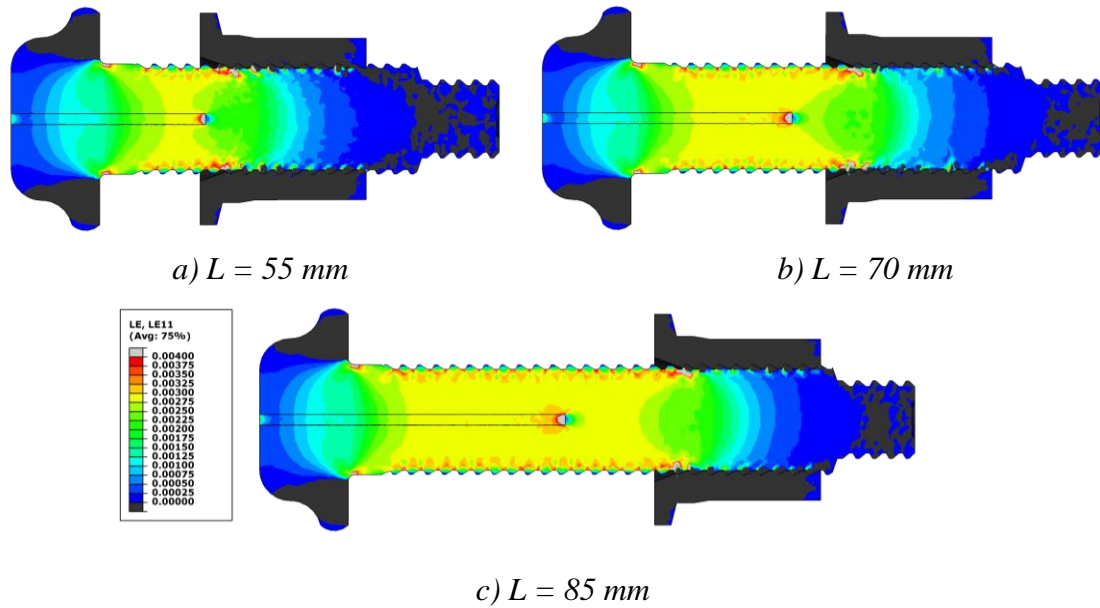
- U slučaju najkraćih zavrtnjeva ($L=50$ mm) zona „platoa“ nalazi se na mestu navoja, zbog veoma male dužine tela zavrtnja (slika 5.25a). Zbog toga je odnos stvarnih i nominalnih dilatacija u ovom slučaju značajno veći nego u preostala dva.
- U slučaju zavrtnjeva srednje dužine ($L=70$ mm) dno rupe se nalazi u prelaznoj zoni između tela zavrtnja i slobodnog navoja (slika 5.25b) gde su dilatacije uvećane zbog redukovanog poprečnog preseka. Zbog toga je u zoni duž merne trake (6 mm) prisutna promena dilatacija u izvesnoj meri, pa osrednjena vrednost dilatacije merne trake zavisi od dubine na kojoj se ona tačno nalazi. Zbog toga je baš za ove zavrtnjeve vrednost koeficijenta varijacije za eksperimentalno određeni kalibracioni koeficijent α_{EXP} najveća od ispitivanih zavrtnjeva tipa HV ($V_X = 5,31$, Tabela 5.12).
- U slučaju najdužih zavrtnjeva ($L=90$ mm) dno rupe se nalazi u središnjoj zoni tela zavrtnja (slika 5.25c), t.j. na „platoa“ dilatacija, koji je u ovom slučaju izražen zbog velike dužine konstantnog poprečnog preseka na mestu tela zavrtnja. Kako je u ovom slučaju merna traka značajno udaljena od svih prelaznih zona, dilatacije u zoni trake su konstantne pa je i dobijeno najveće poklapanje stvarnih i nominalnih dilatacija ($\alpha \approx 0,95$), sa najmanjim koeficijentom varijacije ($V_X = 4,16$, Tabela 5.12).



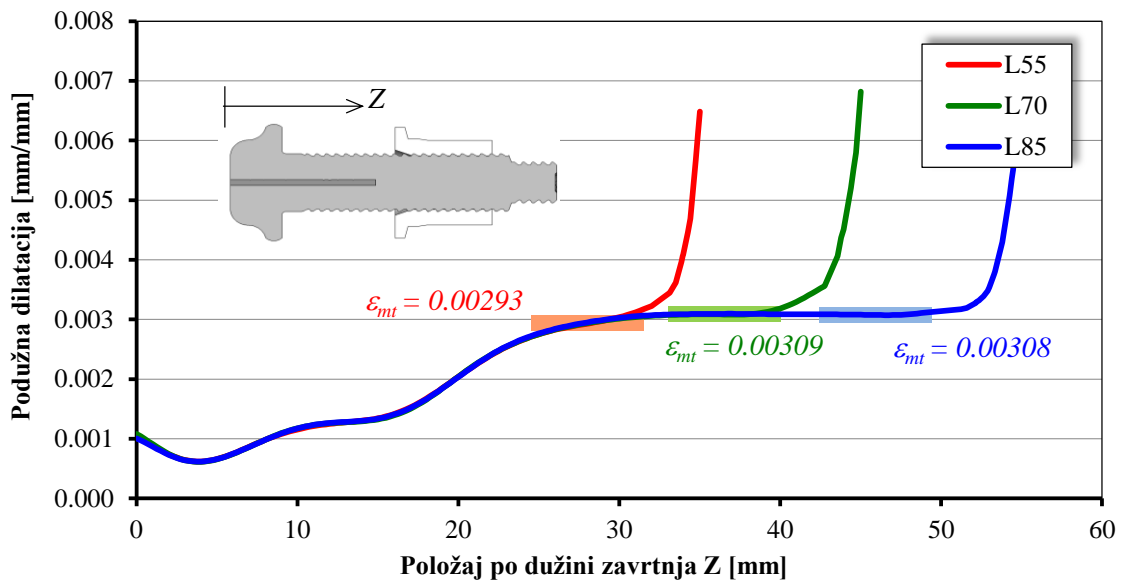
Slika 5.26: Podužne dilatacije HV zavrtnja pri punoj sili prednaprezanja - $F_{p,C} = 171,5$ kN

Za zavrtnjeve tipa HBT, tri različite dužine, karakteristične su sledeće dve situacije:

- Za najkraće zavrtnjeve ($L=55$ mm) dužina slobodnog navoja je relativno mala u odnosu na dužinu glave i kratkog tela (slika 5.27a) zbog čega ne postoji izražen plato dilatacija već su prelazne zone spojene. Dno rupe se nalazi u prelaznoj zoni između slobodnog i angažovanog navoja pa je varijacija dilatacija duž merne trake (6 mm) prisutna, što se odražava na nešto manje očitane vrednosti dilatacija nego u preostala dva slučaja (slika 5.28).
- Za najduže ($L=85$ mm) i za zavrtnjeve srednje dužine ($L=70$ mm) postoji izražen plato dilatacija jer je dužina slobodnog navoja značajna u poređenju sa ostalim delovima zavrtnja. Zbog toga su stvarne vrednosti dilatacija u ova dva slučaja skoro identične i približne su očekivanoj nominalnoj dilataciji koja bi odgovarala prečniku zavrtnja koji je definisan unutrašnjom linijom navoja ($d_3 = 18,2$ mm).



Slika 5.27: Raspodela podužnih dilatacija u zavrtnjevima tipa HBT pri punoj sili prednapreznaja $F=170,7 \text{ kN}$



Slika 5.28: Podužne dilatacije HBT zavrtnja pri punoj sili prednapreznaja - $F_{p,C}=170,7 \text{ kN}$

Za zavrtnjeve tipa HBT karakteristično je da imaju navoj skoro čitavom dužinom. Zbog toga je nivo dilatacija u zoni paketa, pri skoro identičnoj sili prednapreznaja, veći nego u slučaju zavrtnjeva tipa HV gde je prisutno puno telo zavrtnja (slika 5.25 i slika 5.27). Sa druge strane, zavrtnjevi tipa HBT imaju značajno veći prečnik na mestu navoja: $d_3 = 18,2 \text{ mm}$ prema $d_3 = 16,1 \text{ mm}$ za HBT i HV, respektivno, u modelima. Zbog toga je koncentracija dilatacija, a samim tim i napona, značajno manja u

poređenju sa klasičnim zavrtnjevima za prednaprezanje tipa HV. Ova činjenica svakako ukazuje na poboljšanu otpornost na zamor zavrtnjeva tipa HBT.

Kao što je ovde prikazano, dilatacije po dužini zavrtnjeva su izrazito neravnomerne (slika 5.26 i slika 5.28). Promena dužine zavrtnja pri određenom stanju naprezanja, koja je neophodna da bi se utvrdila promena debljine slojeva premaza kroz vreme, ne može se odrediti kao prost proizvod nominalne dilatacije u zavrtnju i dužine zavrtnja. Dakle, neohodno je razmatrati krutosti, t.j. fleksibilnosti pojedinih delova zavrtnjeva.

5.5.2.2 *Fleksibilnost zavrtnjeva*

Analitičkim putem, fleksibilnost zavrtnja se može odrediti uzimajući u obzir deformabilnosti pojedinačnih delova: tela zavrtnja, navoja, podloške, glave i navrtke. Nemački standard VDI 2330 [41] daje preporuke za određivanje fleksibilnosti pojedinih delova zavrtnja tipa HV što je detaljno opisano u delu 2.5. Kako bi se ove preporuke verifikovale i kako bi se utvrdile preporuke za zavrtnjeve tipa HBT primenom MKE određena je zavisnost promene rastojanja između dve navrtke i promene sile u zavrtnju. Proračun je izvršen na posebnim modelima, za svaki tip i dužinu zavrtnja.

Za pojedinačne delove HV zavrtnja dužine $L = 90$ mm, u skladu sa preporukama za dužine l_i i prečnike d_i zamenjujućih cilindričnih tela, određene su pojedinačne analitičke fleksibilnosti $\delta_{i,A}$ (tabela 5.13):

$$\delta_{i,A} = \frac{l_i}{E_i \cdot A_i} \quad 5.15$$

Izuzetak je napravljen u slučaju prečnika zavrtnja na mestu navoja d_3 za koji je usvojena tačna vrednost iz numeričkog modela $d_3 = 16,1$ mm umesto preporuke date u VDI 2230, tabela A12 [41] $d_3 = 16,9$ mm. U tabeli 5.12 uporedo su prikazane i vrednosti izduženja/skraćenja $\Delta l_{i,MKE}$ (slika 5.29a) razmatranih pojedinačnih delova zavrtnja dobijenih na osnovu rezultata numeričke analize primenom MKE, pri punoj sili prednaprezanja $F_{p,C} = 171,5$ kN. Deljenjem vrednosti promene dužine $\Delta l_{i,MKE}$ vrednošću sile $F_{p,C}$ dobijene su vrednosti fleksibilnosti svakog dela zavrtnja, određene numeričkom analizom $\delta_{i,MKE}$:

$$\delta_{i,MKE} = \frac{\Delta l_{i,MKE}}{F_{p,C}} \quad 5.16$$

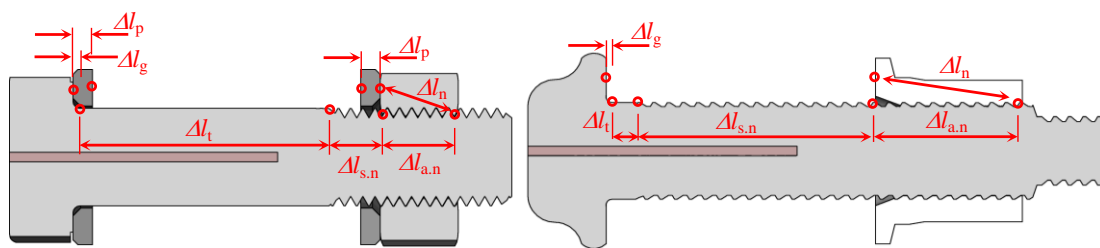
Tabela 5.13: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HV L=90 mm

Deo zavrtnja	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm ²]	$\delta_{i,A}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]	$\Delta l_{i,MKE}$ [mm]	$\delta_{i,MKE}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]	$\delta_{i,MKE} / \delta_{i,A}$
Glava	10 (11)	20	314	0,152 (0,167)	0,0295	0,172	1,13 (1,03)
Telo	51	20	314	0,773	0,132	0,770	0,99
Slobodni navoj	10,6	16,1	204	0,248	0,042	0,245	0,98
Angažovani navoj	10	16,1	204	0,234	0,0405	0,236	1,00
Navrtka	8 (13)	20	314	0,121 (0,197)	0,0354	0,206	1,7 (1,04)
Podloška ispod glave	4	21-36	672	0,028	0,0054	0,031	1,11
Podloška ispod navrtke	4	21-36	672	0,028	0,0051	0,030	1,05
Ukupno				1,58 (1,68)		1,69	1,07 (1,01)

Poređenjem analitički i numerički određenih vrednosti fleksibilnosti, utvrđeno je veoma dobro poklapanje (oko 5 % razlike rezultata), ukupno na nivou celog paketa zavrtnja. Posmatrajući pojedinačne delove, uočeno je da u slučaju glave zavrtnja i navrtke postoje nešto veća odstupanja. Zbog toga su za ove delove određene i vrednosti dužina zamenjujućih cilindričnih tela koje daju bolje rezultate u poređenju sa numeričkom analizom (vrednosti u zagradama, Tabela 5.13). Umesto originalnih preporuka prema VDI 2330 [41] za zamenjujuću dužinu glave i navrtke, $l_{glave} = 0,5d$ i $l_{navrtke} = 0,4d$, na osnovu prikazanih rezultata ovde se predlažu modifikovane preporuke:

$$l_{glave} = 0,55d \quad 5.17$$

$$l_{navrtke} = 0,65d \quad 5.18$$



a) Visokovredni zavrtnjevi tipa HV b) Zavrtnjevi tipa „Huck BobTail“ (HBT)

Slika 5.29: Pojedinačni delovi zavrtnjeva u kojima su očitavane promene dužine.

Na isti način su uz modifikovane zamenjujuće dužine glave i navrtke, određene i pojedinačne i ukupne fleksibilnosti zavrtnjeva dužine 70 i 50 mm, varirajući samo dužinu tela zavrtnja i dužinu slobodnog navoja (tabela 5.14 i tabela 5.15).

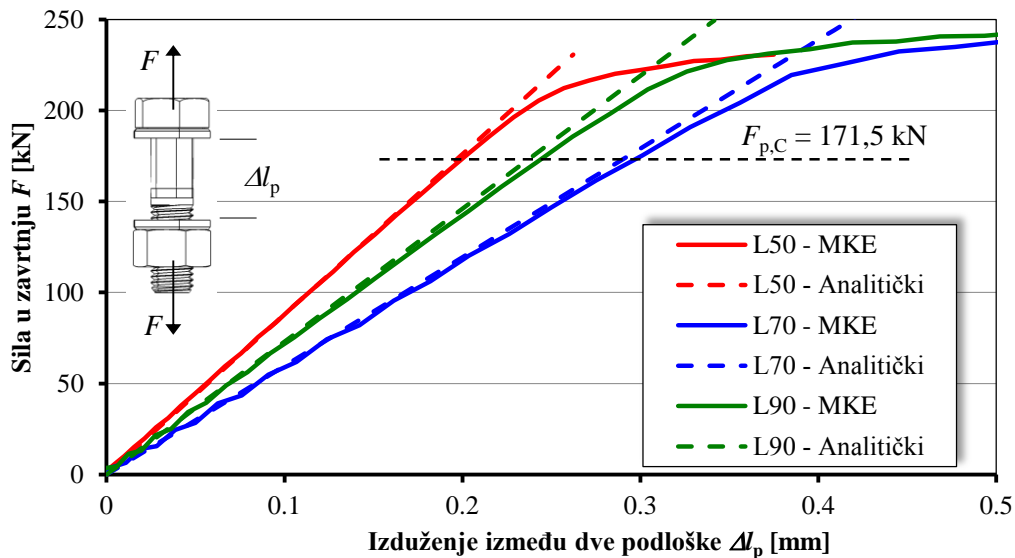
Tabela 5.14: Fleksibilnosti delova zavrtnja tipa HV L=70 mm

Deo zavrtnja	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm ²]	$\delta_{i,A}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]
Glava	11	20	314	0,167
Telo	31	20	314	0,470
Slobodni navoj	10,5	16,1	204	0,246
Angažovani navoj	10	16,1	204	0,234
Navrtka	13	20	314	0,197
Podloška ispod glave	4	36	672	0,028
Podloška ispod navrtke	4	36	672	0,028
Ukupno				1,370

Tabela 5.15: Fleksibilnosti delova zavrtnja tipa HV L=50 mm

Deo zavrtnja	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm ²]	$\delta_{i,A}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]
Glava	11	20	314	0,167
Telo	11	20	314	0,167
Slobodni navoj	13,5	16,1	204	0,316
Angažovani navoj	10	16,1	204	0,234
Navrtka	13	20	314	0,197
Podloška ispod glave	4	36	672	0,028
Podloška ispod navrtke	4	36	672	0,028
Ukupno				1,137

Ovako određene fleksibilnosti zavrtnjeva upoređene su sa rezultatima numeričke analize (slika 5.30). Dobijeno je skoro savršeno poklapanje u zoni elastičnog ponašanja, što potvrđuje opravdanost predloženih modifikacija preporuka za zamenjujuće dužine glave i navrtke. Za zavrtnjeve je u okviru numeričke analize primenjen model materijala koji uzima u obzir plastično ponašanje i lom. Sa prikazanog dijagrama (slika 5.30) se može videti da do nelinearnog ponašanja zavrtnja, t.j. do plastifikacije dolazi tek pri vrednostima sile koje su veće od sile prednapreznja.



Slika 5.30: Izduženje između podloški određeno numeričkim i analitičkim putem za zavrtnjeve tipa HV.

Za zavrtnjeve tipa HBT ne postoje preporuke za određivanje fleksibilnosti pojedinih delova zavrtnja u dosadašnjoj literaturi. Kako je za originalne preporuke za fleksibilnosti HV zavrtnjeva prema VDI 2330 [41] dobijeno dosta dobro poklapanje sa rezultatima numeričke analize, ista metodologija i numerički model su iskorišćeni za određivanje preporuka za zavrtnjeve tipa HBT. Za najduži zavrtnanj ($L = 85$ mm) su, iz rezultata numeričke analize, očitane vrednosti izduženja/skraćenja $\Delta l_{i,MKE}$ (slika 5.29b) svih pojedinačnih delova zavrtnja, pri punoj sili prednaprezanja $F_{p,C} = 170,7$ kN (tabela 5.16). Zatim su pretpostavljeni prečnici pojedinačnih delova zavrtnjeva. Za relativno kratko telo zavrtnja (deo tela zavrtnja bez navoja) usvojen je prečnik koji je izmeren $d = 19,6$ mm. Ova vrednost usvojena je i kao zamenjujući prečnik za glavu i čauru. Za slobodan i angažovani navoj usvojen je izmereni prečnik $d_3 = 18,2$ mm. U slučaju zavrtnjeva tipa HBT ne postoje podloške.

Tabela 5.16: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HBT $L=85$ mm

Deo zavrtnja	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm ²]	$\delta_{i,A}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]	$\Delta l_{i,MKE}$ [mm]	$\delta_{i,MKE}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]	$\delta_{i,MKE} / \delta_{i,A}$
Glava	9	19,6	302	0,142	0,025	0,146	1,03
Telo	4,8	19,6	302	0,076	0,0146	0,086	1,13
Slobodni navoj	50	18,2	260	0,915	0,152	0,890	0,97
Angažovani navoj	15	18,2	260	0,275	0,043	0,252	0,92
Čaura	9	19,6	302	0,142	0,023	0,135	0,95
Ukupno				1,55		1,51	0,97

Dužine tela i slobodnog navoja su fizički definisane i izmerene su u skladu sa stvarnim dužinama (slika 5.29b). Za ovako utvrđene dužine i prečnike tela i slobodnog navoja dobijeno je dosta dobro poklapanje analitičkih i numerički određenih vrednosti fleksibilnosti (tabela 5.16). Za ostale pojedinačne delove (glava, angažovani navoj i čaura) potrebno je odrediti zamenjujuće dužine u funkciji usvojenih prečnika, koje će adekvatno predstaviti fleksibilnosti ovih delova zavrtnja sa obzirom na njihov specifičan oblik. Za ove delove utvrđene su vrednosti zamenjujućih dužina koje daju dobro slaganje analitičkih i numeričkih rezultata za fleksibilnost tih delova: $l_{glave} = 9$ mm; $l_{a.navoja} = 15$ mm; $l_{čaura} = 9$ mm. Ako se uzme u obzir da je nazivni prečnik zavrtnja $d = 20$ mm, a da je stvarna dužina čaure $l_{čaura,nom} = 30$ mm, mogu se dati sledeće preporuke za dužine i prečnike zamenjujućih cilindričnih tela za proračun fleksibilnosti HBT zavrtnjeva:

- glava

$$l_{glave} = 0,45 \cdot d \quad 5.19$$

$$d_{glave} = 0,98 \cdot d \quad 5.20$$

- telo

$$l_{tela} = \text{izmerena vrednost} \quad 5.21$$

$$d_{tela} = 0,98 \cdot d \quad 5.22$$

- slobodni navoj

$$l_{s.navoja} = \text{izmerena vrednost} \quad 5.23$$

$$d_{s.navoja} = 0,91 \cdot d \quad 5.24$$

- angažovani navoj

$$l_{a.navoja} = 0,50 \cdot l_{čaura,nom} \quad 5.25$$

$$d_{a.navoja} = 0,91 \cdot d \quad 5.26$$

- čaura

$$l_{\text{čaura}} = 0,30 \cdot l_{\text{čaura,nom}} \quad 5.27$$

$$d_{\text{čaura}} = 0,98 \cdot d \quad 5.28$$

Na isti način su određene i pojedinačne i ukupne fleksibilnosti zavrtnjeva dužine 70 mm (tabela 5.17) i 55 mm (tabela 5.18), varirajući samo dužinu slobodnog navoja. Zamenjujuće dužine glave, angažovanog navoja i čaure usvojene su u skladu sa prethodnim preporukama.

Tabela 5.17: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HBT L=70 mm

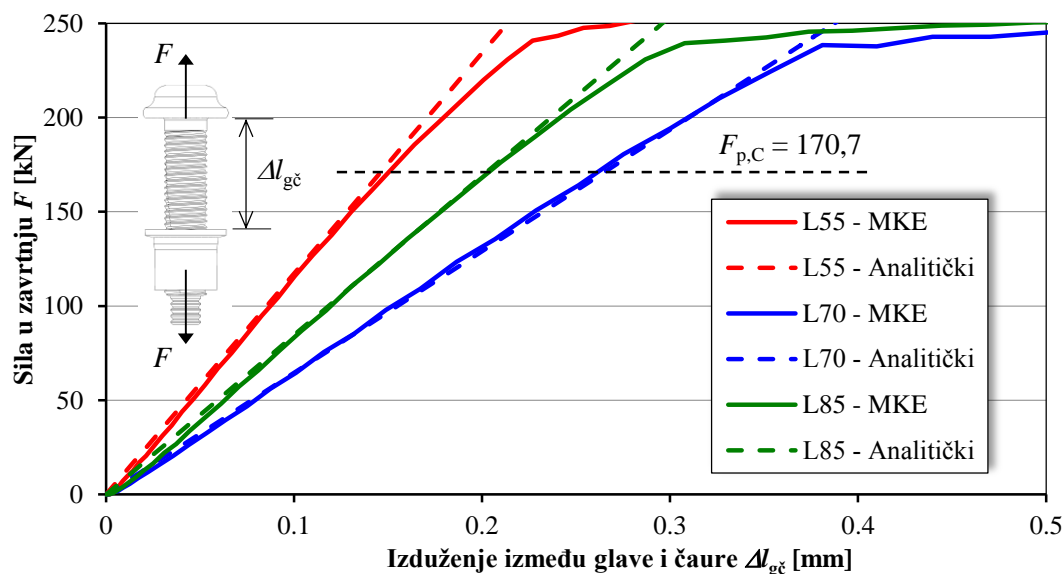
Deo zavrtnja	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm ²]	$\delta_{i,A}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]
Glava	9	19,6	302	0,142
Telo	4,8	19,6	302	0,076
Slobodni navoj	30	18,2	260	0,549
Angažovani navoj	15	18,2	260	0,275
Čaura	9	19,6	302	0,142
Ukupno				1,18

Tabela 5.18: Fleksibilnosti i deformacije delova zavrtnja tipa HBT L=55 mm

Deo zavrtnja	l_i [mm]	d_i [mm]	A_i [mm ²]	$\delta_{i,A}$ [mm/N · 10 ⁻⁶]
Glava	9	19,6	302	0,142
Telo	4,8	19,6	302	0,076
Slobodni navoj	12	18,2	260	0,220
Angažovani navoj	15	18,2	260	0,275
Čaura	9	19,6	302	0,142
Ukupno				0,85

Fleksibilnosti paketa zavrtnjeva određene u skladu sa prikazanim preporukama upoređene su sa rezultatima numeričke analize (slika 5.31). Dobijeno je skoro savršeno poklapanje u zoni elastičnog ponašanja, što potvrđuje opravdanost predloženih preporuka za zamenjujuće dužine glave, angažovanog navoja i čaure. U slučaju najkraćih zavrtnjeva tipa HBT uočeno je kod njih plastifikacija preseka počinje ranije, pri manjem nivou naprezanja (slika 5.31). Ovo se može pripisati povećanoj koncentraciji napona duž slobodnog dela tela zavrtnja (navoj i kratak deo tela bez navoja Slika 5.27a) i nepostojanja izraženog platoa sa konstantnim dilatacijama (slika

5.28). Ovo ujedno može biti i razlog većih inicijalnih gubitaka sile prednaprezanja u slučaju kratkih HBT zavrtnjeva (videti poglavlje 5.2). Naime, u trenutku prednaprezanja inicijalno se u zavrtnj unosi značajno veća sila od nominalne (od 32,8 % do 38,4 %), što kod najkraćih zavrtnjeva dovodi do plastifikacije tela zavrtnja. Zbog toga, u trenutku otpuštanja alata za prednaprezanje, povratna deformacija zavrtnja nije u celosti elastična, pa dolazi do značajnog inicijalnog smanjenja sile prednaprezanja u spoju.



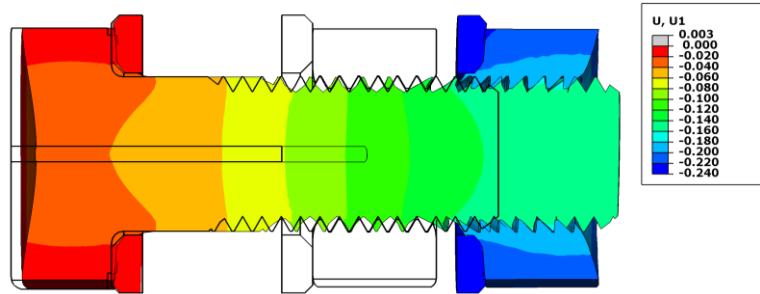
Slika 5.31: Izduženje između glave i čaure određeno numeričkim i analitičkim putem za zavrtnjeve tipa HBT.

5.5.2.3 Poređenje fleksibilnosti (deformabilnosti) zavrtnjeva

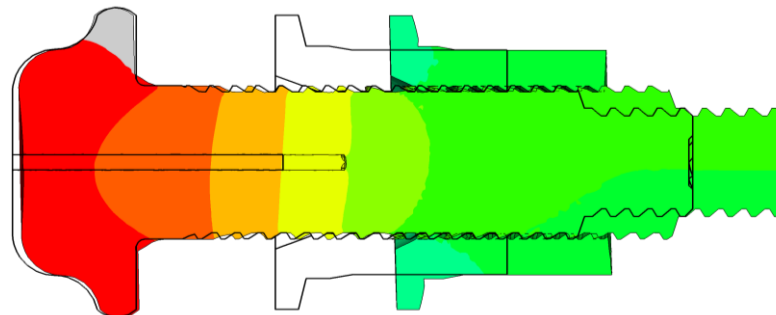
Deformacije zavrtnjeva tipa HV i tipa HBT su upoređene sa početnom geometrijom zavrtnjeva (slika 5.32) pri punoj sili prednaprezanja. Deformacije u podužnom pravcu su uvećane 50 puta, a bojama su predstavljene vrednosti podužnih deformacija. Uočeno je da je deformabilnost glave zavrtnja tipa HBT značajno manja od deformabilnosti glave standardnog zavrtnja tipa HV. Deo deformacije glave kod HV potiče od savijanja glave koja verovatno nije uzeta u obzir u originalnim analitičkim izrazima prema VDI 2330 [41]. Takođe u slučaju zavrtnjeva tipa HV postoje i podloške koje dodatno doprinose deformabilnosti ove zone zavrtnja.

U slučaju zavrtnja HV numeričkim modelom je uzet u obzir zazor koji postoji između navoja zavrtnja i navoja navrtke od 0.025 mm. Zbog toga su inicijalna pomeranja navrtke veća nego u slučaju zavrtnja tipa HBT.

Deformabilnost navoja unutar navrtke nije zanemarljiva u slučaju zavrtnjeva tipa HV (slika 5.32). Kod zavrtnjeva tipa HBT navoj je značajno „plići“ i izvesnog je optimizovanog oblika pa je deformabilnost navoja značajno manja.



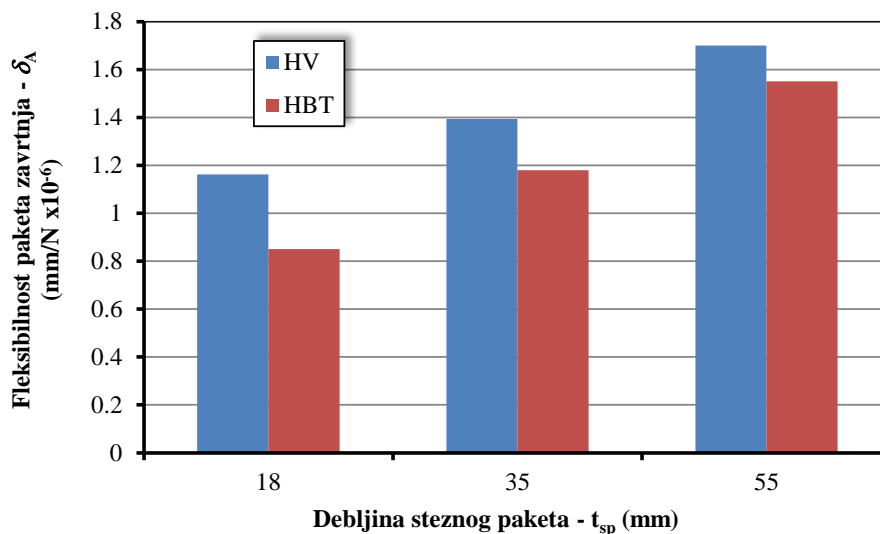
a) Visokovredni zavrtnjevi tipa HV - $F_{p,C} = 171,5 \text{ kN}$



b) Zavrtnjevi tipa „Huck BobTail“ (HBT) - $F_{p,C} = 170,7 \text{ kN}$

Slika 5.32: Deformacije delova zavrtnjeja pri punoj sili prednaprezanja.

Ukoliko se izvrši poređenje fleksibilnosti zavrtnjeva različitog tipa za istu debljinu steznog paketa (slika 5.33) dolazi se do zaključka da zavrtnjevi tipa HBT imaju veću krutost (manju fleksibilnost)



Slika 5.33: Poređenje fleksibilnosti zavrtnjeva tipa HV i HBT.

5.5.2.4 Fleksibilnost elemenata steznog paketa i ukupna fleksibilnost spoja

Da bi se mogla odrediti ukupna fleksibilnost spoja sa visokovrednim zavrtnjevima, pored fleksibilnosti zavrtnjeva, neophodno je odrediti i fleksibilnost elemenata steznog paketa. Specifičnost modela korišćenih u sprovedenoj numeričkoj analizi iziskuje modifikovanje izraza za fleksibilnost steznog paketa sa HV zavrtnjevima, datih u VDI 2330 i prikazanih u poglavlju 2.5, tako što će se iz debljine steznog paketa isključiti podloške. Naime, podloške HV zavrtnjeva spadaju u elemente steznog paketa ali je njihova fleksibilnost već uzeta u obzir pri određivanju fleksibilnosti zavrtnjeva, pa u modifikovanim izrazima za fleksibilnost elemenata steznog paketa HV zavrtnjeva figuriše redukovana debljina steznog paketa $l_{sp,red}$, u koju ulazi samo debljina čeličnih plača u spoju. Tako se izraz:

$$\delta_{sp} = \frac{2 \cdot \ln \left[\frac{(d_{podloške} + d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp} \cdot \tan \varphi - d_0)}{(d_{podloške} - d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp} \cdot \tan \varphi + d_0)} \right]}{E_{sp} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \tan \varphi} \quad 5.29$$

menja i glasi:

$$\delta_{sp} = \frac{2 \cdot \ln \left[\frac{(d_{podloške} + d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp,red} \cdot \tan \varphi - d_0)}{(d_{podloške} - d_0) \cdot (d_{podloške} + l_{sp,red} \cdot \tan \varphi + d_0)} \right]}{E_{sp} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \tan \varphi} \quad 5.30$$

Za slučaj HBT zavrtnjeva, kod kojih i inače nema podloški, umesto spoljašnjeg prečnika podloške usvaja se spoljašnji prečnik glave zavrtnja (odnosno nožice čaure) $d_{g/č}$, a debljina steznog paketa jednaka je debljini čeličnih ploča u spoju:

$$\delta_{sp} = \frac{2 \cdot \ln \left[\frac{(d_{g/č} + d_0) \cdot (d_{g/č} + l_{sp,red} \cdot \tan \varphi - d_0)}{(d_{g/č} - d_0) \cdot (d_{g/č} + l_{sp,red} \cdot \tan \varphi + d_0)} \right]}{E_{sp} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \tan \varphi} \quad 5.31$$

Sve rupe za zavrtnjeve izvedene su sa zazorom od 2 mm pa je $d_0=22$ mm. Spoljašnji prečnik podloške HV zavrtnja je $d_{podloške}=37$ mm, dok je kod HBT zavrtnjeva prečnik glave zavrtnja, odnosno nožice čaure 40 mm. Ugao $\varphi=35^\circ$, dok je modul elastočnosti elemenata steznog paketa usvojen kao $E_{sp}=210000$ N/mm². Za oba tipa i sve dužine zavrtnjeva prikazane su fleksibilnost zavrtnja, elemenata steznog paketa i ukupna fleksibilnost spoja (tabela 5.19).

Ovako određene fleksibilnosti spojeva sa visokovrednim HV zavrtnjevima i zavrtnjevima sa zaključavanjem tipa HBT predstavljaju osnov za analizu reoloških svojstava primenjenog cink-silikatnog premaza.

Tabela 5.19: Analitički određena fleksibilnost spojeva sa HV i HBT zavrtnjevima

Tip zavrtnja	Nazivna dužina [mm]	Debljina steznog paketa - $l_{sp,red}$ [mm]	Fleksibilnost zavrtnja - $\delta_{z,A}$ [mm/N·10 ⁻⁶]	Fleksibilnost steznog paketa - $\delta_{sp,A}$ [mm/N·10 ⁻⁶]	Fleksibilnost spoja - $\delta_{spoj,a,A}$ [mm/N·10 ⁻⁶]
HV	50	18	1,14	1,76	2,90
	70	35	1,37	1,86	3,23
	90	55	1,68	1,95	3,63
HBT	55	18	0,85	1,77	2,62
	70	35	1,18	1,86	3,04
	85	55	1,55	1,94	3,49

5.6 Reološka svojstva cink-silikatnog premaza „Resist 86“

Sprovedena teorijska analiza i određene fleksibilnosti HV i HBT zavrtnjeva omogućavaju da se na osnovu rezultata sopstvenog eksperimentalnog istraživanja odrede dilatacije steznog paketa koje potiču isključivo od puzanja (promene debljine) primenjenog cink-silikatnog premaza. Naime, primenom izraza:

$$\Delta l_{pr}(t) = \delta_{spoj,a,A} \cdot \Delta F_{p,C,pr}(t) \quad 5.32$$

$$\Delta F_{p,C,pr}(t) = \Delta F_{p,C}^C(t) - \Delta F_{p,C}^B(t) \quad 5.33$$

$$\Delta F_{p,C}^C(t) = \overline{F_{p,C}^C(t_3)} - \overline{F_{p,C}^C(t)} \quad 5.34$$

$$\Delta F_{p,C}^B(t) = \overline{F_{p,C}^B(t_3)} - \overline{F_{p,C}^B(t)} \quad 5.35$$

gde su:

- $\delta_{spoj,a,A}$ - analitički određena fleksibilnost spoja sa HV ili HBT zavrtnjevima,
- $\Delta F_{p,C,pr}(t)$ - smanjenje sile prednaprezanja u zavrtnju usled puzanja (promene debljine) primenjenog cink-silikatnog premaza, u trenutku t
- $\Delta F_{p,C}^C(t)$ - promena sile prednaprezanja u zavrtnju ugrađenom u uzorak sa antikorozijskom zaštitom (*coated*), ostvarena u trenutku t , u odnosu na vrednost sile prednaprezanja izmerenu 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti,

$\Delta F_{p,C}^B(t)$ - promena sile prednaprezanja u zavrtnju ugrađenom u uzorak bez antikorozijske zaštite (*blusted*), ostvarena u trenutku t , u odnosu na vrednost sile prednaprezanja izmerenu 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti,

$\overline{F_{p,C}^C}(t_3)$ - srednja vrednost sile prednaprezanja u svim zavrtnjevima istog tipa i dužine, ugrađenim u uzorke sa antikorozijskom zaštitom, 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja u zavrtnju,

$\overline{F_{p,C}^C}(t)$ - srednja vrednost sile prednaprezanja u svim zavrtnjevima istog tipa i dužine, ugrađenim u uzorke sa antikorozijskom zaštitom, u trenutku t

$\overline{F_{p,C}^B}(t_3)$ - srednja vrednost sile prednaprezanja u svim zavrtnjevima istog tipa i dužine, ugrađenim u uzorke bez antikorozijske zaštite, 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja u zavrtnju,

$\overline{F_{p,C}^B}(t)$ - srednja vrednost sile prednaprezanja u svim zavrtnjevima istog tipa i dužine, ugrađenim u uzorke bez antikorozijske zaštite, u trenutku t ,

moгуće je odrediti ukupnu promenu debljine cink-silikatnog premaza u spoju $\Delta l_{pr}(t)$, u posmatranom trenutku t , u odnosu na debljinu premaza 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne sile prednaprezanja u zavrtnju.

Uz pretpostavku o nominalnoj debljini premaza na svakoj od površina (3 čelične ploče – ukupno 6 površina sa nanetim premazom), što daje ukupnu debljinu premaza u spoju od $l_{pr}=450 \mu\text{m}$, moguće je odrediti ukupnu dilataciju premaza u spoju, u trenutku t :

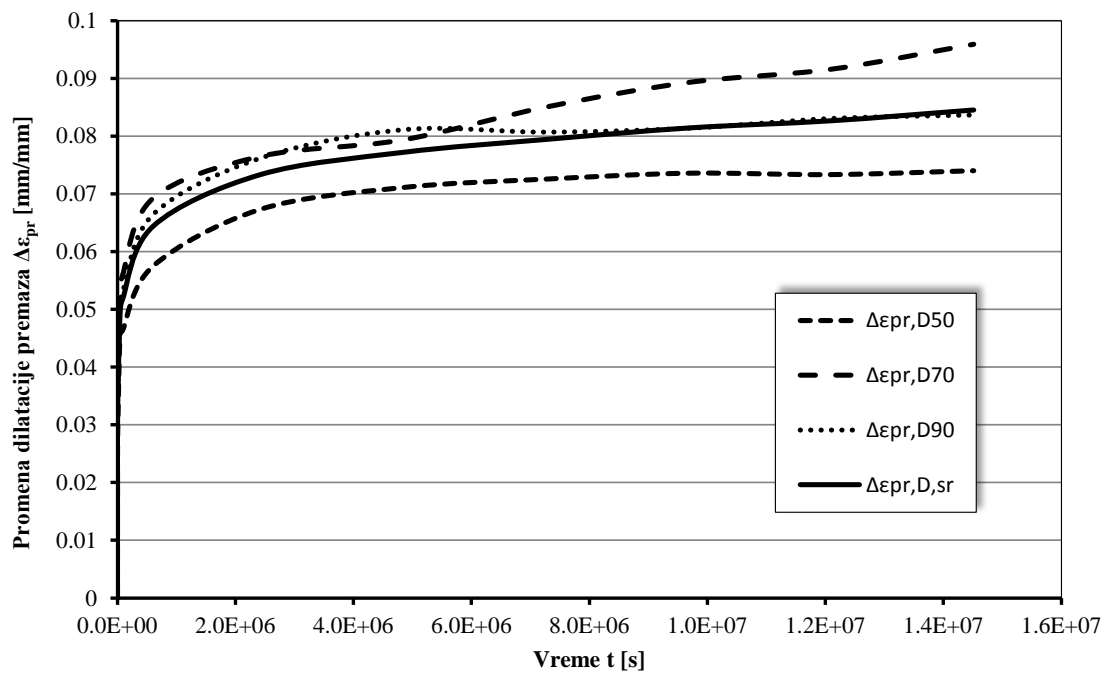
$$\Delta \varepsilon_{pr}(t) = \frac{\Delta l_{pr}(t)}{l_{pr}} \tag{5.36}$$

Dilatacija premaza koja se ostvaruje u toku ugradnje zavrtnja i prvih 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne sile prednaprezanja u zavrtnju, nije moguće odrediti na ovaj način, sa obzirom da je inicijalni modul elastičnosti premaza nepoznata veličina koju nije moguće odrediti na osnovu sprovedenog eksperimentalnog istraživanja.

Prikazane su promene ukupne dilatacije u spoju sa HV zavrtnjevima (tabela 5.20 i slika 5.34). Uz zanemarivanje inicijalnih dilatacija, srednja vrednost dilatacije premaza u spojevima sa HV zavrtnjevima, nakon 24 nedelje, dostiže vrednost od oko 8%. Jasno je da prednaprezanjem zavrtnjeva dolazi do plastifikacije slojeva cink silikatnog premaza pa se bilo kakva analiza ovog problema koja podrazumeva elastično ponašanje ne može primeniti.

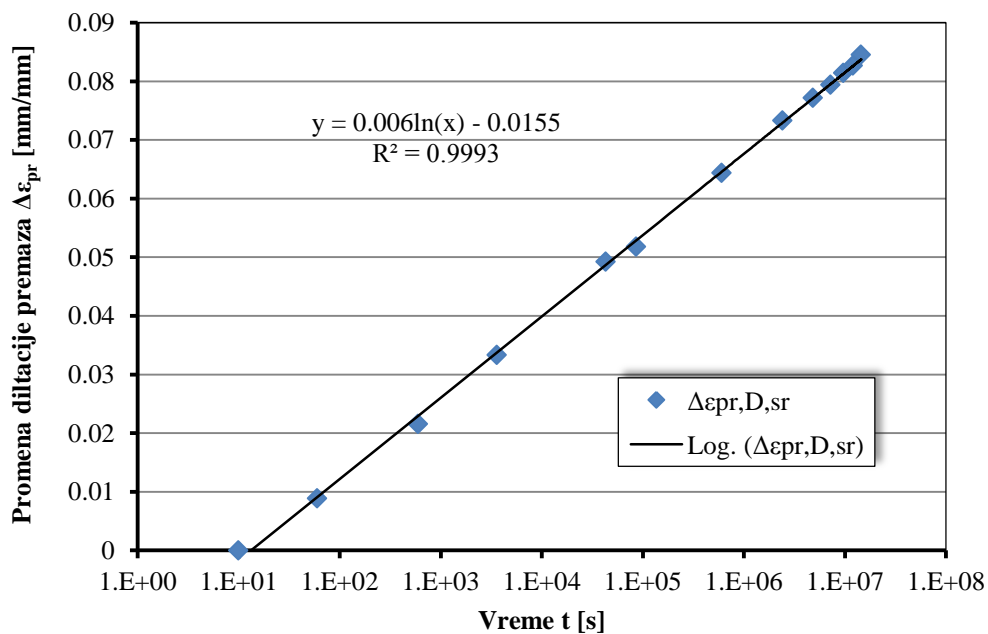
Tabela 5.20: Ukupna dilatacija premaza u spojevima sa visokovrednim HV zavrtnjevima

Vreme	D50		D70		D90		Srednja vrednost	
	$\Delta M_{pr,D50}$ [mm · 10 ⁻³]	$\Delta \varepsilon_{pr,D50}$ [mm/mm · 10 ⁻³]	$\Delta M_{pr,D70}$ [mm · 10 ⁻³]	$\Delta \varepsilon_{pr,D70}$ [mm/mm · 10 ⁻³]	$\Delta M_{pr,D90}$ [mm · 10 ⁻³]	$\Delta \varepsilon_{pr,D90}$ [mm/mm · 10 ⁻³]	$\Delta M_{pr,sr}$ [mm · 10 ⁻³]	$\Delta \varepsilon_{pr,D,sr}$ [mm/mm · 10 ⁻³]
0s	0	0	0	0	0	0	0	0
10s	0	0	0	0	0	0	0	0
1min	2.76	6.13	4.36	9.70	4.89	10.9	4.00	8.90
10min	8.38	18.6	10.9	24.2	9.82	21.8	9.70	21.6
1h	12.9	28.7	16.3	36.2	15.8	35.1	15.0	33.3
12h	20.5	45.6	23.1	51.3	22.9	50.8	22.2	49.3
24h	20.9	46.4	25.2	55.9	23.9	53.1	23.3	51.8
1n	25.9	57.5	31.2	69.3	29.9	66.4	29.0	64.4
4n	30.3	67.3	34.4	76.5	34.3	76.2	33.0	73.3
8n	32.0	71.1	35.7	79.3	36.5	81.1	34.7	77.2
12n	32.6	72.6	38.3	85.0	36.3	80.7	35.7	79.4
16n	33.1	73.6	40.2	89.3	36.6	81.4	36.6	81.4
20n	33.0	73.3	41.2	91.6	37.4	83.0	37.2	82.7
24n	33.3	74.0	43.2	95.9	37.6	83.7	38.0	84.5



Slika 5.34: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HV zavrtnjevima, u funkciji vremena

Kako bi se kriva promene dilatacije premaza kroz vreme mogla analitički lakše prikazati izvršen je njen prikaz u logaritamskoj razmeti.



Slika 5.35: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HV zavrtnjevima, u logaritamskoj funkciji vremena

Primenom metode najmanjih kvadrata, dobijena je linearna zavisnost koja se može predstaviti izrazom:

$$\Delta\varepsilon_{pr}(t) = 0,0058 \cdot \ln(t) - 0,015$$

5.37

gde su:

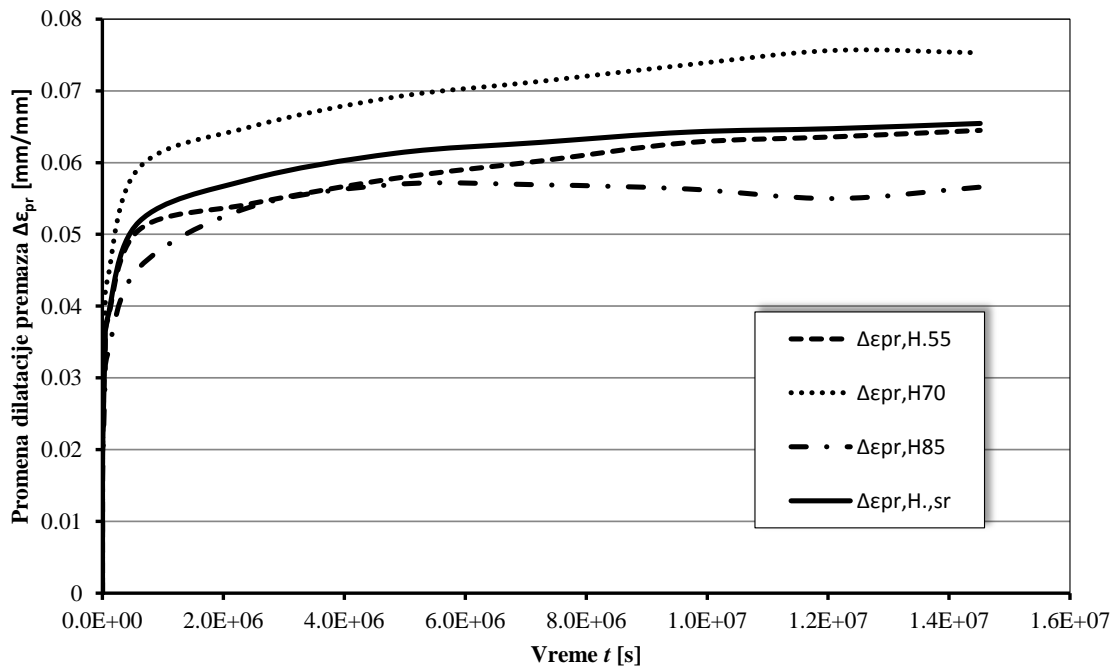
$\Delta\varepsilon_{pr}(t)$ - promena ukupne dilatacije premaza u spoju sa HV zavrtnjevima, u trenutku t

t - posmatrani vremenski trenutak u sekundama.

Ista analogija primenjena je i kod spojeva sa HBT zavrtnjevima. Analizom prikazanih rezultata (tabela 5.21 i slika 5.36) uočljivo je da srednja vrednost dilatacije cink-silikatnog premaza (uz zanemarivanje inicijalnih dilatacija) u spojevima sa HBT zavrtnjevima, nakon 24 nedelje, dostiže vrednost od oko 6,5%. I u ovom slučaju radi se o vrednostima dilatacija daleko u zoni plastičnog ponašanja posmatranih slojeva premaza.

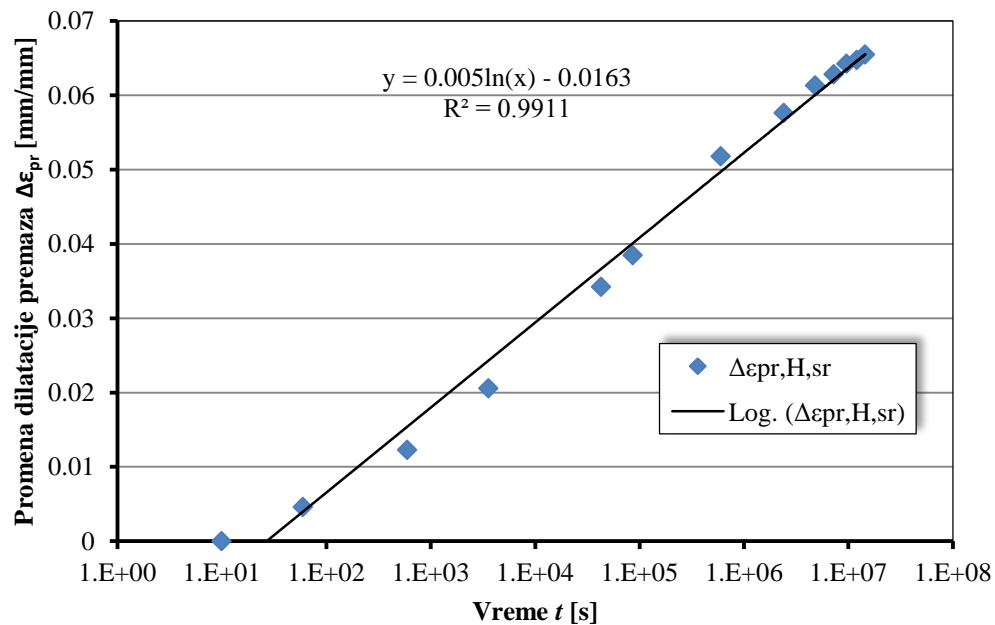
Tabela 5.21: Ukupna dilatacija premaza u spojevima sa visokovrednim HBT zavrtnjevima

Vreme	H55		H70		H85		Srednja vrednost	
	$\Delta\varepsilon_{pr,H55}$ [mm·10 ⁻³]	$\Delta\varepsilon_{pr,H55}$ [mm/mm·10 ⁻³]	$\Delta\varepsilon_{pr,H70}$ [mm·10 ⁻³]	$\Delta\varepsilon_{pr,H70}$ [mm/mm·10 ⁻³]	$\Delta\varepsilon_{pr,H85}$ [mm·10 ⁻³]	$\Delta\varepsilon_{pr,H85}$ [mm/mm·10 ⁻³]	$\Delta\varepsilon_{pr,sr}$ [mm·10 ⁻³]	$\Delta\varepsilon_{pr,H,sr}$ [mm/mm·10 ⁻³]
0s	0	0	0	0	0	0	0	0
10s	0	0	0	0	0	0	0	0
1min	1,66	3,68	1,82	4,04	2,73	6,07	2,07	4,60
10min	6,34	14,1	6,06	13,5	4,16	9,25	5,52	12,3
1h	9,83	21,8	10,1	22,5	7,80	17,3	9,25	20,6
12h	15,4	34,2	17,5	38,8	13,3	29,6	15,4	34,2
24h	17,2	38,1	19,7	43,9	15,0	33,3	17,3	38,5
1n	22,8	50,6	26,7	59,3	20,4	45,4	23,3	51,8
4n	24,4	54,2	29,2	64,9	24,2	53,7	25,9	57,6
8n	26,0	57,8	31,1	69,1	25,6	57,0	27,6	61,3
12n	27,1	60,2	32,1	71,3	25,6	56,9	28,3	62,8
16n	28,3	62,8	33,1	73,6	25,3	56,3	28,9	64,3
20n	28,6	63,6	34,0	75,6	24,7	55,0	29,1	64,7
24n	29,0	64,5	33,9	75,3	25,5	56,6	29,5	65,5



Slika 5.36: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HBT zavrtnjevima, u funkciji vremena

Kao i kod HV zavrtnjeva, izvršen je prikaz promene dilatacije premaza kroz vreme u logaritamskoj razmeti.



Slika 5.37: Promena dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HBT zavrtnjevima, u logaritamskoj funkciji vremena

Metodom najmanjih kvadrata dobijena je linearna zavisnost koja se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\Delta\varepsilon_{pr}(t) = 0,005 \cdot \ln(t) - 0,0163 \quad 5.38$$

gde su:

$\Delta\varepsilon_{pr}(t)$ - promena ukupne dilatacije premaza u spoju sa HV zavrtnjevima, u trenutku t

t - posmatrani vremenski trenutak u sekundama.

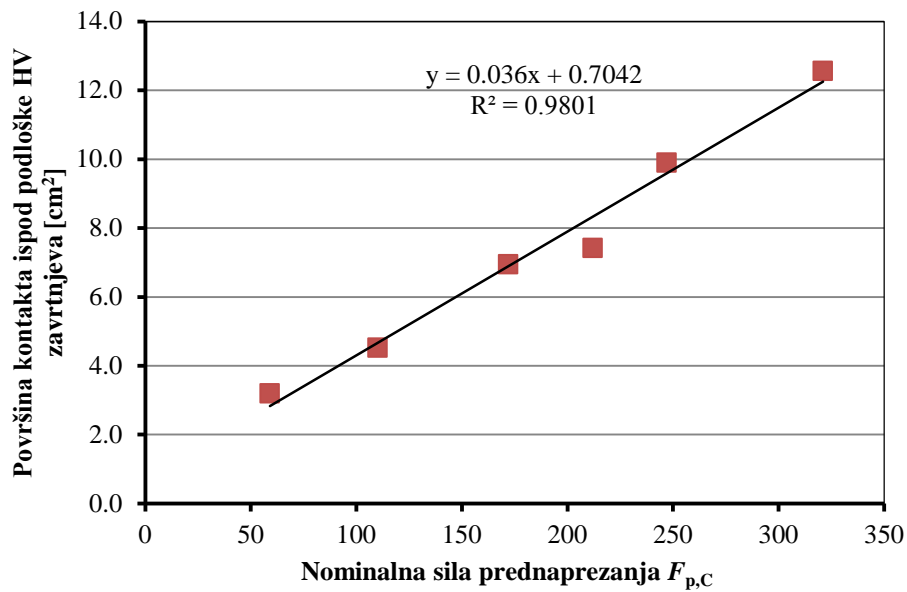
Kao i u slučaju HV zavrtnjeva, nije moguće ukupnu dilataciju premaza u spoju razložiti na pojedinačne slojeve:

- sloj 1, ispod podloški HV zavrtnjeva, odnosno ispod glave i nožice čaure HBT zavrtnjeva (ukupno dva sloja sa istim nivoom napona) i
- sloj 2, na kontaktu između susednih ploča (ukupno 4 sloja sa istim nivoom napona).

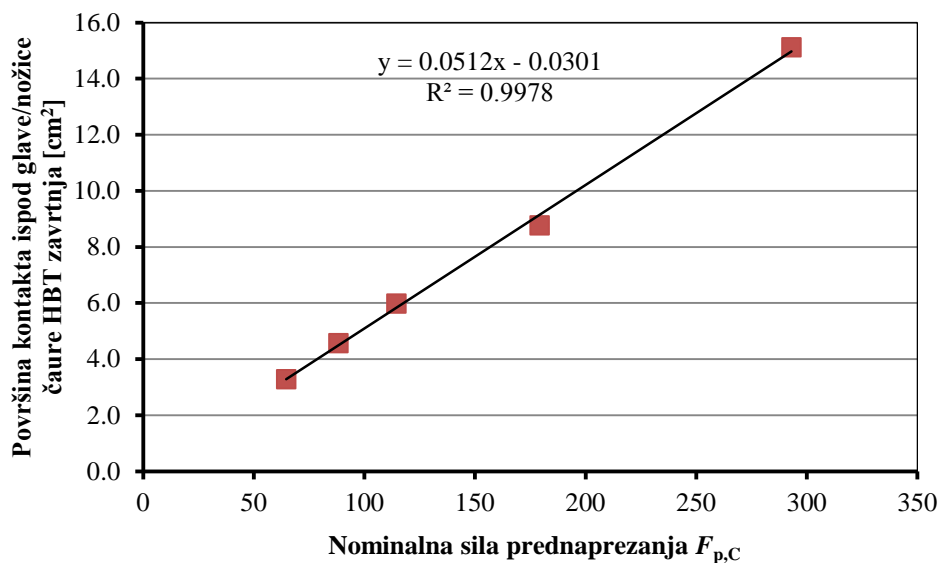
Da bi se ovo moglo uraditi, na osnovu raspoloživih rezultata eksperimentalnog istraživanja, neophodna je pretpostavka o elastičnom ponašanju slojeva premaza tj. o linearnoj vezi između napona i dilatacije svakog pojedinačnog sloja premaza. Ovakvu pretpostavku nije opravdano koristiti sa obzirom na nivo prikazanih dilatacija, pa je za ovakvu analizu neophodno sprovesti dodatna eksperimentalna istraživanja. Ova istraživanja podrazumevala bi uzorke sa premazom nanetim ili u vidu sloja 1 ili u vidu sloja 2. Etalonski uzorci se svakako podrazumevaju.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se dominantan deo dilatacije cink-silikatnog premaza odvija u zoni ispod podloški (kod HV zavrtnjeva), odnosno ispod glave i nožice čaure (kod HBT zavrtnjeva), dok su dilatacije premaza na kontaktu između susednih ploča značajno manje.

Kako bi se mogao izvesti zaključak o dimenziji zavrtnja koja dominantno utiče na ovaj fenomen (dužina ili prečnik) prikazana je promena površine kontakta između podloški HV zavrtnjeva i elemenata spoja (slika 5.38), odnosno površine kontakta glave i nožice čaure HBT zavrtnja i elemenata spoja, u funkciji nominalne sile prednaprezanja (slika 5.39).



Slika 5.38: Zavisnost nominalne sile prednaprezanja i površine kontakta ispod podloške HV zavrtnjeva



Slika 5.39: Zavisnost nominalne sile prednaprezanja i površine kontakta ispod glave/nožice čaure HBT zavrtnjeva

Sa prikazanih dijagrama jasno je uočljivo da se veza može smatrati linearnom, što dovodi do zaključka da sa porastom prečnika zavrtnja linearno raste i predmetna kontaktna površina (veza između nominalne sile prednaprezanja i kvadrata prečnika zavrtnja je konstantna). Dakle, napon na kontaktnoj površini ispod podloški (kod HV zavrtnjeva), odnosno ispod glave i nožice čaure (kod HBT zavrtnjeva) je konstantan za različite prečnike zavrtnjeva. Uz prethodno iznet zaključak da je dilatacija premaza na kontaktu između ploča u spoju značajno manja od dilatacije premaza ispod podloški

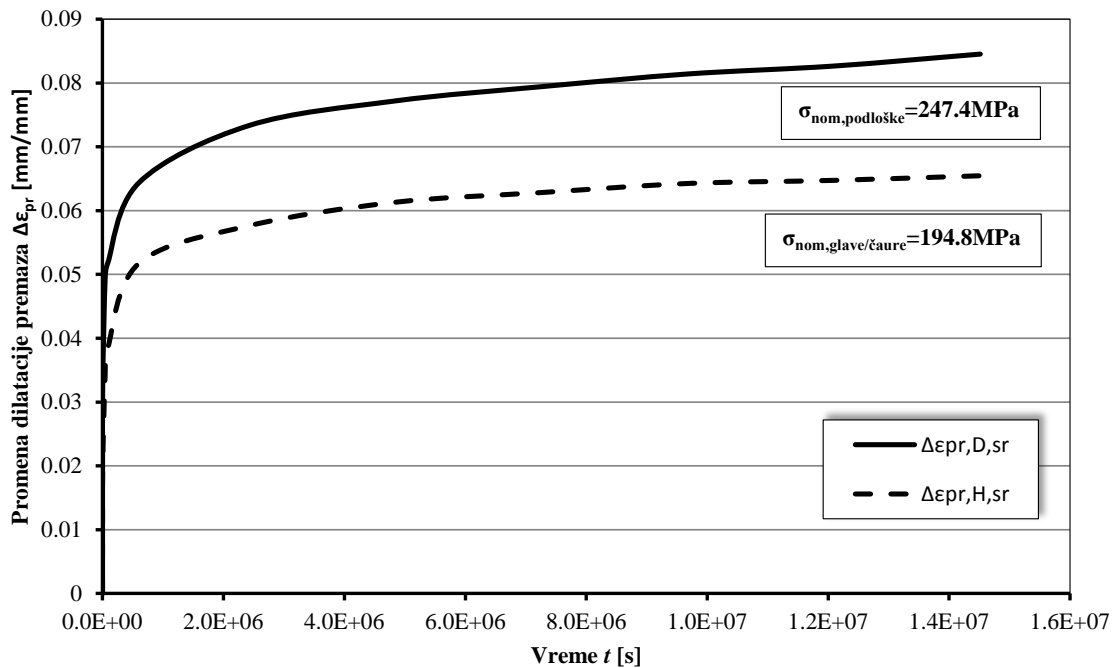
(odnosno glave i nožice čaure), može se zaključiti da ukupna dilatacija cink-silikatnog premaza u spoju dominantno zavisi od broja slojeva premaza tj. od njegove ukupne debljine u spoju. Kao potvrda ovog zaključka može poslužiti i poređenje ukupnih dilatacija u spoju sa HV i u spoju sa HBT zavrtnjevima (slika 5.39). Za površinu kontakta podloške i čeličnih ploča u spoju sa HV zavrtnjevima koja iznosi $A_{\text{podloške}}=6,95 \text{ cm}^2$ (spoljašnji prečnik podloške iznosi 37 mm, a prečnik rupe za zavrtnj 22 mm) i nominalnu vrednost sile prednaprezanja prema [29], dobija se vrednost kontaktnog napona $\sigma_{\text{nom,podloške}}=247,4 \text{ MPa}$. U slučaju spojeva sa HBT zavrtnjevima, za površinu kontakta glave zavrtnja (ili nožice čaure) i čeličnih ploča od $A_{\text{glave/čauure}}=8,77 \text{ cm}^2$ i nominalnu vrednost sile prednaprezanja prema [22], dobija se vrednost kontaktnog napona $\sigma_{\text{nom,glave/čauure}}=194,8 \text{ MPa}$. Za ovako određene napone imamo da je:

$$\frac{\sigma_{\text{nom,podloške}}}{\sigma_{\text{nom,glave/člave}}} = 1,27 \quad 5.39$$

Sa druge strane, sa priloženog dijagrama (slika 5.40) može se očitati odnos ukupnih dilatacija cink-silikatnog premaza u spoju sa HV i HBT zavrtnjevima, uz zanemarivanje dilatacija ostvarenih u prvih 10 sekundi nakon ugradnje zavrtnja, koji iznosi:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{\text{pr,D,sr}}}{\Delta \varepsilon_{\text{pr,H,sr}}} = 1,29 \quad 5.40$$

Na ovaj način je potvrđeno da za isti broj slojeva cink-silikatnog premaza (istu ukupnu debljinu premaza u spoju) njegova ukupna diltacija zavisi od površine kontakta između podloški (kod HV zavrtnjeva), odnosno glave i nožice čaure (kod HBT zavrtnjeva) i čeličnih ploča u spoju.



Slika 5.40: Poređenje ukupne dilatacije cink-silikatnog premaza u spojevima sa HV i HBT zavrtnjevima

Uticaj dilatacije (smanjenja debljine) premaza na gubitak sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima svakako dominantno zavisi od debljine steznog paketa (samim tim i od dužine zavrtnja), pa kod zavrtnjeva istog prečnika imamo veći gubitak sile prednaprezanja kod kraćih zavrtnjeva (manja debljina steznog paketa).

Ovi zaključci se mogu potvrditi sprovođenjem dodatnih eksperimentalnih istraživanja. Primena numeričke analize za modeliranje spojeva sa visokovrednim zavrtnjevima, koja bi u obzir uzela i ponašanje slojeva cink-silikatnog premaza, u ovom trenutku, nije moguća. Naime, modeliranje ponašanja premaza kao zasebnog sloja u spoju, podrazumeva poznavanje njegovih mehaničkih svojstava, pre svega modula elastičnosti i σ - ε dijagrama, koji su u ovom trenutku nepoznanica, a pitanje je da li ih je uopšte moguće odrediti.

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA

Polazeći od želje da se primenom novih materijala i elemenata u građevinarstvu približimo spojevima koje nije potrebno održavati, ovo istraživanje ima za cilj da upozna stručnu javnost sa novim materijalima i elementima i da pruži zaključke koji će biti osnov za unapređenje tehnologije izvođenja tarnih spojeva. Izučavanjem postojećih publikacija, sprovedenim sopstvenim eksperimentalnim istraživanjem kao i analitičkim proračunima i numeričkim analizama, dat je značajan doprinos razumevanju ponašanja tarnih spojeva, kao najčešćeg tipa spoja kod dinamički opterećenih elemenata čeličnih konstrukcija.

Svi zaključci i preporuke rezultat su sopstvenih teorijsko-eksperimentalnih istraživanja i odnose se na primenjene materijale i elemente: zavrtnjeve HBT i HV prečnika 20 mm i cink-silikatni premaz „Resist 86“. Navedeni elementi korišćeni su za formiranje spojeva sa dvostrukim preklopom (bez AKZ ili zaštićene cink-silikatnim premazom u šest slojeva, nominalne debljine sloja 75 μm), sa zavrtnjevima na međusobnom rastojanju od $3d_0$.

Analizom rezultata istraživanja sprovedenog u okviru ove disertacije izvedeni su sledeći zaključci:

1. Primena cink-silikatnog premaza „Resist 86“ je veoma efikasan način antikorozijske zaštite tarnih spojeva. Najbolji rezultati u pogledu koeficijenta trenja dobijeni su ugradnjom elemenata konstrukcije 7 do 10 dana nakon nanošenja premaza. Na taj način, na tarnim površinama ostvaruje se koeficijent trenja u granicama $0,45 \leq \mu \leq 0,50$, što je dovoljno da se predmetni spojevi mogu svrstati u kategoriju hrapavosti A ili B, prema važećim standardima [29].
2. Sa aspekta ujednačenosti maksimalnih vrednosti sile prednaprezanja ostvarenih u postupku ugradnje, HBT su povoljniji od HV zavrtnjeva. Na uzorku od 63 zavrtnja, za HBT zavrtnjeve koeficijent varijacije je 4,3 %, a za HV zavrtnjeve 8,5 %.

3. Najveći deo gubitaka sile prednaprezanja nastaje u prve dve sekunde nakon ugradnje HBT zavrtnjeva, odnosno u prvih 10 sekundi nakon ugradnje HV zavrtnja. Ovi inicijalni gubici sile prednaprezanja, koji dominantno zavise od metode ugradnje zavrtnjeva, veći su kod HBT nego kod HV zavrtnjeva.
4. Na inicijalne gubitke sile prednaprezanja u HV zavrtnjevima utiče i način ugradnje. Poređenjem rezultata dobijenih kod zavrtnjeva ugrađenih moment ključem (najčešće primenjivana metoda u našoj zemlji) i kod zavrtnjeva ugrađenih običnim ključem, jasno je uočljivo da su inicijalni gubici sile prednaprezanja manji u slučaju primene običnog ključa i to 18 - 28 % za zavrtnjeve dužine 50 mm, 70 mm i 90 mm.
5. U periodu od 12 h nakon ugradnje zavrtnjeva nastaju kratkotrajni gubici sile prednaprezanja. Bez obzira na primenjeni tip zavrtnja, uticaj AKZ na ove gubitke je zanemarljiv. Svi ispitivani zavrtnjevi, osim HBT dužine 55 mm, nakon 12 h od ugradnje, imali su silu prednaprezanja veću od minimalne propisane vrednosti. Sila u HBT zavrtnjevima dužine 55 mm, bila je čak 28 % manja od minimalne propisane vrednosti, čime je dovedena u pitanje granična nosivost spoja na proklizavanje. U trenutku pritezanja inicijalno se u HBT zavrtnjeve unosi značajno veća sila od nominalne (od 32,8 % do 38,4 %), što kod najkraćih dovodi do plastifikacije tela zavrtnja. Zbog toga, u trenutku otpuštanja alata za prednaprezanje, povratna deformacija zavrtnja nije u celosti elastična, pa dolazi do značajnog inicijalnog smanjenja sile prednaprezanja u spoju.
6. Uticaj redosleda ugradnje visokovrednih zavrtnjeva, u smislu smanjenja sile prednaprezanja u već ugrađenim zavrtnjevima u trenutku ugradnje narednog zavrtnja, nije uočljiv kod spojeva sa po tri HV i HBT zavrtnja, na međusobnom rastojanju $3d_0$. U slučaju spojeva debljine 18 mm ovi gubici iznose manje od 1 %, pa se mogu zanemariti.
7. Uticaj eksploatacionog dinamičkog opterećenja (usled kojeg ne dolazi do plastifikacije niti proklizavanja elemenata spoja) na gubitak sile prednaprezanja u HBT i HV zavrtnjevima može se zanemariti.

8. Dugoročni gubici sile prednaprezanja, nastali u periodu od 10 sekundi do 24 nedelje od ugradnje zavrtnjeva, izraženiji su kod HV u odnosu na HBT zavrtnjeve.
9. Značajan deo dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja potiče od puzanja slojeva cink-silicijatnog premaza. Na bazi rezultata registrovanih na 128 zavrtnjeva, udeo gubitaka sile usled puzanja slojeva cink-silikatnog premaza iznosi oko 50%.
10. Na osnovu izvedenih izraza za promenu gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima u toku vremena (poglavlje 5.4), moguće je proceniti njihovu vrednost u bilo kom trenutku u toku eksploatacije konstrukcije.
11. Kao pokazatelj nivoa ostvarene sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima, u proizvoljnom vremenskom trenutku, definisan je koeficijent ξ koji predstavlja odnos sile prednaprezanja u visokovrednom zavrtnju i njene minimalne propisane vrednosti. Izvedeni su izrazi za promenu koeficijenta ξ u toku vremena (poglavlje 5.4.2), čijom primenom je moguće odrediti vrednost preostale sile prednaprezanja u bilo kom vremenskom trenutku tokom eksploatacije konstrukcije.
12. Ekstrapolacijom usvojene bi-linearne zavisnosti između koeficijenta ξ i dužine zavrtnja L , na čitav opseg dužina primenjenih zavrtnjeva, može se zaključiti da je fenomen gubitka sile prednaprezanja u viskovrednim HV i HBT zavrtnjevima zanemarljiv za zavrtnjeve dužine veće ili jednake od 95 mm.
13. Numeričkom analizom, primenom metode konačnih elemenata, modifikovani su postojeći izrazi za fleksibilnost HV zavrtnjeva, dati u [41]. Takođe, za HBT zavrtnjeve definisani su izrazi za fleksibilnost pojedinih delova zavrtnja, kao i spoja u celini (poglavlje 5.5.2.2), što do sada nije postojalo u literaturi.
14. Na osnovu definisanih izraza za fleksibilnost HV i HBT zavrtnjeva i rezultata sopstvenih eksperimentalnih istraživanja, definisani su izrazi za promenu ukupne dilatacije cink-silikatnog premaza u spoju, kroz vreme (poglavlje 5.6). Dobijene vrednosti odnose se na period nakon prvih deset sekundi od dostizanja maksimalne vrednosti sile prednaprezanja u zavrtnjevima, pa ne obuhvataju inicijalne dilatacije slojeva cink-silikatnog premaza.

15. Vrednost ukupne dilatacije premaza u spoju ne zavisi od prečnika zavrtnja, dok je uticaj dužine zavrtnja veoma mali, sa obzirom da se dominantan deo dilatacije realizuje ispod navrtki HV zavrtnjeva, odnosno ispod glave i nožice čaure HBT zavrtnjeva. Ukupna dilatacija slojeva cink-silikatnog premaza u spoju dominantno zavisi od broja zaštićenih površina tj. od ukupne debljine premaza u spoju.

U cilju postizanja potpunog razumevanja ponašanja tarnih spojeva i šire praktične primene dobijenih rezultata, kao i težnje ka spojevima koji ne zahtevaju održavanje, neophodna su dalja istraživanja. Neke od preporuka u kom pravcu bi trebalo nastaviti započeta ispitivanja su:

- određivanje rezidualnih koeficijenta trenja (nakon dužeg vremenskog perioda) u slučaju primene cink-silikatnog premaza. Na taj način bi se dobila kompletna slika uticaja pada sile u zavrtnjevima na funkcionisanje veze, kao i dragocen doprinos primeni predmetnog premaza u tarnim spojevima. U nastavku eksperimentalnog određivanja rezidualnih koeficijenata trenja, uzorci se mogu opteretiti do loma čime će se dobiti slika promene sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima pri lomu smicanjem i pritiskom po omotaču rupe. Sve ovo je moguće sprovesti na uzorcima korišćenim za određivanje dugoročnih gubitaka sile prednaprezanja, primenom pravilnog rasporeda mernih uređaja (ekstenzometara) i kidalice dovoljnog kapaciteta (oko 1200 kN);
- sprovođenje dodatnih eksperimenata čime bi se rezultati istraživanja potvrdili i proširili na različite vrste i prečnike zavrtnjeva, kao i na različite debljine AKZ;
- kako se tarni spojevi najčešće javljaju na konstrukcijama koje nisu termički izolovane (mostovi, antenski stubovi...) uticaj promene temperature na promenu sile prednaprezanja u zavrtnjevima svakako treba istražiti;
- sprovođenje eksperimentalnog ispitivanja krupnih modela koji odgovaraju relanim elementima konstrukcije, na primer montažnog nastavka čeličnog profila ili veze štapa ispune antenskog stuba za čvorni lim. Međusobni uticaj ugradnje zavrtnjeva na gubitak sile prednaprezanja ispitivan je na nivou tri

zavrtnja u jednom spoju. Na ovaj način bi se mogao sagledati međusobni uticaj zavrtnjeva u većoj seriji;

- unapređenje postojećih proračunskih postupaka i njihovo implementiranje u standarde.

7. LITERATURA

- [1] Ljubomir M. Vlajić: Ponašanje spojeva sa visokovrednim zavrtnjevima pri eksploatacionom i graničnom opterećenju, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, 1993. godina.
- [2] Zlatko A. Marković: Prilog analizi nosivosti mehaničkih spojnih sredstava kod tankozidnih čeličnih elemenata, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 2002. godina.
- [3] Z. Marković, D. Buđevac, J. Dobrić, N. Fric, M. Knežević: Specific behaviour of thin-walled member joints with fasteners, *Građevinar* 64 (2012) 3, str. 217-230, UDK 624.014.24:69.022.5.
- [4] Sedlacek G., Kammel C.: Zum Dauerverhalten von GV-Verbindungen in verzinkten Konstruktionen – Erfahrungen mit Vorspannkraftverlusten, *Stahlbau*, Vol. 70, Issue 12, pp. 917 – 926, Ernst & Sohn, 2001.
- [5] Bickford, J. H.: An introduction to the design and behaviour of bolted joints -3rd edition, revised and expanded, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1995.
- [6] Jun Yang, John T. DeWolf: Mathematical Model of Relaxation in High-Strength Bolted Connections, *Journal of Structural Engineering* 125 (1999), str. 803-809.
- [7] Fisher J. W., Struik J. H. And Kulak G. L.: Guide to design criteria for bolted and riveted joints, Wiley, New York, 1974.
- [8] Yang J.: Relaxation of high-strength bolted connections with galvanized steel, MS theses, University of Connecticut, Storrs, Conn., 1997.
- [9] DeWolf, J. T., Yang, J.: Relaxation in high-strength bolted connections with galvanized steel, Final report, Project 96-4, JHR 98-262 University of Connecticut, Storrs, Connecticut, USA, 1998
- [10] A. Cruz, R. Simões, R. Alves: Slip factor in slip resistant joints with high strength steel, *Journal of Constructional Steel Research*, 70 (2012), 280-288.
- [11] Charles-Darwin Annan, Albert Chiza: Slip resistance of metalized–galvanized faying surfaces in steel bridge construction, *Journal of Constructional Steel Research*, 95 (2014), 211-219.
- [12] Charles-Darwin Annan, Albert Chiza: Characterization of slip resistance of high strength bolted connections with zinc-based metallized faying surfaces, *Engineering Structures*, 56 (2013), 2187-2196.
- [13] M. Popovska, B. Petreski, P. Cvetanovski, D. Popovski: Experimental procedure for slip factor determining at connections with preloaded bolts, *e-GFOS* 5, 8 (2014), 37-43.
- [14] A Brief History of Huck Manufacturing Company, https://www.alcoa.com/fastening_systems/commercial/en/resources/data/Product_Bulletins/PB587%20Huck%20History.pdf, dostupno 06. marta 2014., 12:15h

- [15] Christoph Hans-Albert Städler: Schließringbolzen ohne Sollbruchstelle für wartungsfreie Verbindungen im Nutzfahrzeug- und Stahlbau, Genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.), Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, 2012.
- [16] Alcoa Fastening Systems, Product Catalog, Fastening Systems, Huck U-Spin Lockbolts, http://www.alcoa.com/global/en/products/product.asp?prod_id=903, dostupno 06. marta 2014., 11:50h
- [17] Huck BobTail, The Next Generation Lockbolts, KVT Solutioneering, 09/2013, http://www.kvt-fastening.de/media/cbac7236-5480-a5b6-6c95-0247c81e83dc/KVT_Huck-BobTail_EN_092013_web.pdf, dostupno 06. marta 2014., 12:50
- [18] NOF Metal Coatings Group, Geomet Coatings, , <http://www.anochrome.com/wp-content/uploads/2012/01/NOF.pdf>, dostupno 06. marta 2014., 12:45
- [19] BobTail, Huck's next generation lockbolt, Alcoa Fastening Systems, 2010, http://www.alcoa.com/fastening_systems/commercial/catalog/pdf/huck/en/AF1032%20BOBTAIL.pdf, dostupno 06. oktobra 2014., 18:00.
- [20] Nenad Fric, Boris Gligić, Jelena Dobrić, Zlatko Marković: Wind towers – design of friction connection for assembling sections of tubular steel towers, Journal of applied engineering science, 10(2012)1, 221, 49 - 52, doi:10.5937/jaes10-1670.
- [21] Alcoa Fastening Systems, Huck News, http://www.afshuck.net/en/more_information/News.html?article=1, dostupno 01. oktobra 2014., 08:30
- [22] Schließringbolzensysteme - Berechnung von Verbindungen nach Eurocode 3 und VDI 2230, DVS-Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. und EFB-Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V., 2014.
- [23] EN 1090-2: 2008: Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures, CEN (European Committee for Standardization), 2008.
- [24] EN 14399-4:2005;, High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 4: System HV - Hexagon bolt and nut assemblies, CEN (European Committee for Standardization), 2005.
- [25] EN 14399-6:2005, High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 6: Plain chamfered washers, CEN (European Committee for Standardization), 2005.
- [26] PEINER HV – Structural bolt sets, http://www.peiner-ut.com/fileadmin/user_upload/PDFs/PUT-Steel_construction-e.pdf, dostupno 01. oktobra 2014., 10:30
- [27] GP „Mostogradnja“ AD, Vlajkovićeve 19a, Biro za kontrolu kvaliteta, Laboratorija za ispitivanje: Izveštaji o ispitivanju koeficijenta trenja „ μ “ tarnog spoja pritegnutog V.V. vijcima, pripremljenog po sistemu „RESIST 86“ (Jotun), april-jun 2010. godine, Beograd.

- [28] GP „Mostogradnja“ AD, Vlajkovićeve 19a, Biro za kontrolu kvaliteta, Laboratorija za ispitivanje: Izveštaji o ispitivanju koeficijenta trenja „ μ “ tarnog spoja pritegnutog V.V. vijcima, pripremljenog po sistemu „RESIST 86“ (Jotun), septembar 2013. godine, Beograd.
- [29] EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, CEN (European Committee for Standardization), 2005.
- [30] Dakota Ultrasonics, Mini – Max bolt tension monitor, Operation manual, <http://www.dakotaultrasonics.com/manuals/MINIMAXv212man.pdf>, dostupno 01. oktobra 2014., 14:00
- [31] Jotun Norway, Technical data sheet for Resist 86, [http://wwwda.jotun.com/jotun/paints/20020020.nsf/wwwProductDatabase/F89C5FE225EEC6CEC12568F500261088/\\$file/TDS%20-%20Resist%2086%20-%20English%20\(uk\)%20-%20Issued.11.06.2012.pdf](http://wwwda.jotun.com/jotun/paints/20020020.nsf/wwwProductDatabase/F89C5FE225EEC6CEC12568F500261088/$file/TDS%20-%20Resist%2086%20-%20English%20(uk)%20-%20Issued.11.06.2012.pdf), dostupno 11. Oktobra 2013., 18:30
- [32] SRPS U.E7.140:1985, Spojevi sa vijcima visoke klase čvrstoće kod nosećih čeličnih konstrukcija - Tehnički uslovi, 1985.
- [33] SRPS EN 1090-2:2012: Izvođenje čeličnih i aluminijumskih konstrukcija — Deo 2: Tehnički zahtevi za čelične konstrukcije, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [34] SRPS EN 1993-1-8: Evrokod 3 – Projektovanje čeličnih konstrukcija – Deo: 1-8: Projektovanje veza, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [35] Lj. Vlajić: Visokovredni zavrtnjevi u građevinskim konstrukcijama, Saobraćajni institut CIP Beograd, Subotica 2012. godine
- [36] Husson W.: Friction Connections with Slotted Holes for Wind Towers, Licentiate Theses, Luleå University of Technology. 2008.
- [37] ISO 8501-1:2007: Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Visual assessment of surface cleanliness — Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings, International organization for standardization, 1998.
- [38] Hot-rolled weather resistant COR-TEN, <http://www.ruukki.com/Steel/Steel-products/Hot-rolled-steels/Hot-rolled-weather-resistant-COR-TEN>, dostupno 30. septembra 2014., 17:30
- [39] M. Veljkovic, C. Heistermann, W. Husson, M. Limam, M. Feldmann, J. Naumes, D. Pak, T. Faber, M. Klose, K-U. Fruhner, L. Krutschinna, C. Baniotopoulos, I. Lavasas, A. Pontes, E. Ribeiro, M. Hadden, R. Sousa, L. da Silva, C. Rebelo, R. Simoes, J. Henriques, R. Matos, J. Nuutinen, H. Kinnunen: High-strength tower in steel for wind turbines (HISTWIN), Final Raport, 2012.
- [40] A. Cruz, R. Simões, R. Alves: Slip factor in slip resistant joints with high strength steel, *Journal of Constructional Steel Research*, 70 (2012), 280-288, doi:10.1016/j.jcsr.2011.11.001.
- [41] VDI 2230, Part 1: Systematic calculation of high duty bolted joints – Joints with one cylindrical bolt, VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, Germany, 2003

- [42] Christian Kammel, Gerhard Sedlacek: Dauerverhalten von GV-Verbindungen bei verzinkten Konstruktionen im Freileitungs-, Mast- und Kaminbau, Forschungsbericht P 409, Düsseldorf, 2001.
- [43] Pavlović M, Heistermann C, Veljković M, Pak D, Feldmann M, Rebelo C, Simões da Silva L. Connections in towers for wind converters, Part I: Evaluation of down-scaled experiments, *Journal of Constructional Steel Research* (submitted).
- [44] Natalie Stranghönera, Markus Schiborra, Ralf Glienke: Procedure test of slip-resistant connections according to EN 1090-2, EUROSTEEL 2014, September 10-12, 2014, Naples, Italy.
- [45] Hwan-Seon Nah, Hyeon-Ju Lee, Kang-Seok Kim, Jin-Ho Kim and Woo-Bum Kim: Evaluating Relaxation of High-strength Bolts by Parameters on Slip Faying Surfaces of Bolted Connections, *International Journal of Steel Structures*, September 2010, Vol 10, No 3, 295-303
- [46] ASTM F 2280-06 (2006): Twist off type tension control structural bolt/nut/washer assemblies, steel, heat treated, 150ksi minimum tensile strength, ASTM International, Philadelphia, P.A., USA.
- [47] ASTM A490: Quenched and Tempered Alloy Steel Bolts for Structural Steel Joints, American Society for Testing and Materials.
- [48] Heistermann C.: Behaviour of Pretensioned Bolts in Friction Connections, Licentiate Theses, Luleå University of Technology. 2011.
- [49] C. Heistermann, M. Veljkovic, R. Simões, C. Rebelo, L. Simões da Silva: Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes, *Journal of Constructional Steel Research* 82 (2013), 223-233.
- [50] Heistermann C.: Resistance of friction connections with open slotted holes in towers for wind turbines, Doctoral Theses, Luleå University of Technology, November 2014.
- [51] Alcoa Fastening Systems: Bobtail – Huck’s next generation lockbolt. No pintail, fast installation, vibration resistant. ½”-1”, 12mm-20mm, AF1032 0410 2.5M. 2010., http://www.alcoa.com/fastening_systems/commercial/catalog/pdf/huck/en/AF1032%20BOBTAIL.pdf, dostupno 24. oktobra 2013, 13:30.
- [52] Nord-Lock – Bolt Securing System, Technical Information, <http://www.nord-lock.com/nord-lock/wedge-locking/washers/introduction/>, dostupno 01. oktobra 2014., 06:30
- [53] August Friedberg GmbH, Achternbergstr. 38a, 45884 Gelsenkirchen, Germany, www.august-friedberg.de, dostupno 01. oktobra 2014., 06:40
- [54] EN1990:2002: Eurocode — Basis of structural design, CEN (European Committee for Standardization), 2002.
- [55] Hydratight Bolt ScopePro, <http://www.hydratight.com/en/products/bolt-load-monitoring/boltscope-pro>, dostupno 01. oktobra 2014., 14:30
- [56] HBM, KMR force washer for monitoring tasks, Data Sheet, <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b0204.pdf>, dostupno 01. oktobra 2014., 14:50

- [57] HBM, PaceLine CFW Piezoelectric force washer, Data Sheet, <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b2586.pdf>, dostupno 01. oktobra 2014., 15:00
- [58] HBM, Amplifier system MGCplus with display and control panel AB22A/AB32, Operating Manual, <http://www.hbm.com.pl/pdf/b0534.pdf>, dostupno 13. oktobra 2014, 14:00
- [59] dataTaker, DT85G Series 3 GeoLogger, Technical Specifications, http://www.deltainstrumenti.it/misura/datataker/DT85G_Serie3.pdf, dostupno 13. oktobra 2014, 14:10
- [60] dataTaker, CEM20 Channel Expansion Module, Technical Specifications, <http://www.grantinstruments.com/media/4293/cem20.pdf>, dostupno 13. oktobra 2014, 14:20
- [61] D. Stanković: Fizičko-tehnička merenja, Naučna knjiga 1987., Beograd.
- [62] J. Velojić: Merenje i akvizija podataka u procesima ispitivanja građevinskih modela, Diplomski rad, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija Beograd, Beograd 2014.
- [63] N. Fric: Merenje gubitka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima, seminarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 2012.
- [64] List-magnetic, Coating Thickness Meterrs – Easy-Check, Tehnical Data Sheet, http://team-trade.si/upload/teamtrade/mo_files/lang_slo/1243885307gmqygUF8EB.pdf, dostupno 30. novembar 2013., 11:15
- [65] Elcometer 456, Coating Thickness Gauge, Operating instructions, <http://isurplus.com.au/manuals/Elcometer%20456%20User%20Manual.pdf> dostupno 16. maja 2014., 10:20
- [66] Fischer, Dualscope MPOR, Tehnical Data Sheet, http://hangan.co/BV/downloads/TDS_MPOR_DUAL_en_902-001_05-2011.pdf dostupno 30. novembra 2013., 11:20
- [67] Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Bolt strain gauge series BTM, http://www.tml.jp/e/product/strain_gauge/catalog_pdf/BTMseries.pdf, dostupno 14. oktobra 2013, 17:10
- [68] Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Strain gauge adhesives, https://www.tml.jp/e/product/strain_gauge/catalog_pdf/adhesive_list.pdf, dostupno 16. maja 2014., 13:20
- [69] EN 1993-1-9: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, CEN (European Committee for Standardization), 2005.
- [70] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH - HBM, Strain transducer DD1 Data shet, <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b0529.pdf>, dostupno 17. novembra 2013., 14:00
- [71] ABAQUS User Manual. Version 6.12. Providence, RI, USA: DS SIMULIA Corp; 2012.

- [72] SRPS EN 10025:2003: Toplovaljani proizvodi od nelegiranih konstrukcionih čelika - Tehnički zahtevi za isporuku, Institut za standardizaciju Srbije, 2003.
- [73] SRPS EN 14399-4:2009: Kompleti za prednapregnute vijčane spojeve nosećih konstrukcija - Deo 4: Sistem HV - Kompleti šestostranih vijaka i navrtki, 2009.

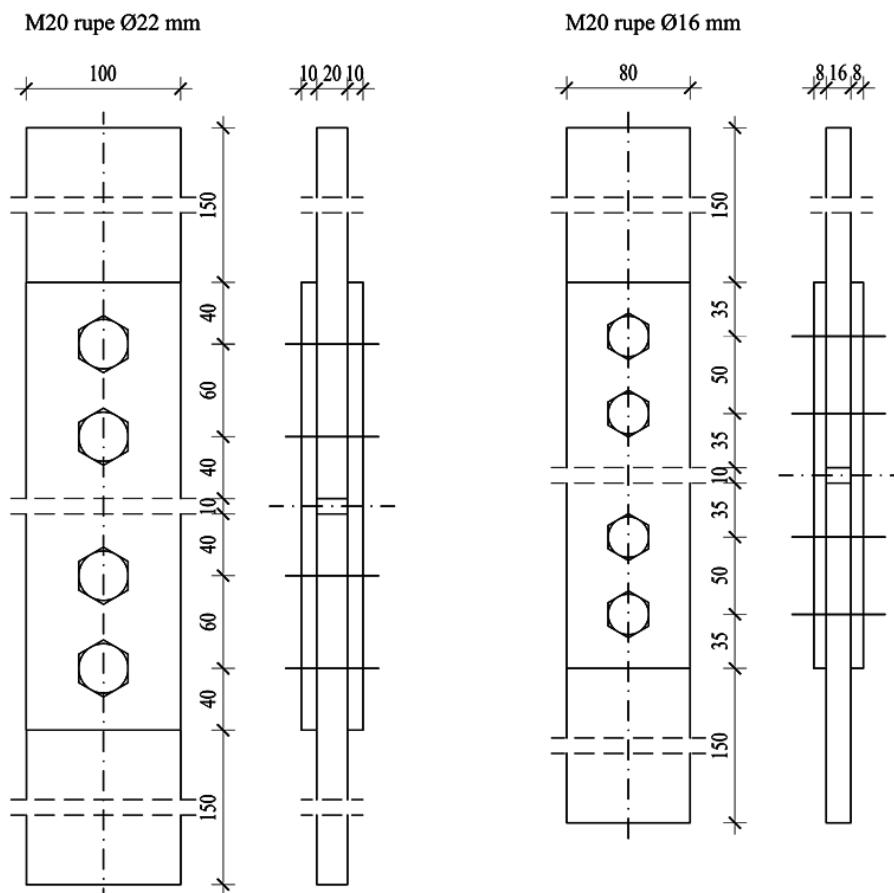
PRILOG A – Određivanje koeficijenta trenja

A.1 Uvod

U ovom prilogu prikazan je postupak eksperimentalnog određivanja koeficijenta trenja μ u tarnim spojevima pritegnutim visokovrednim zavrtnjevima, ukoliko se tarne površine obrade po sistemu “Resist 86” proizvođača „Jotun“. Celokupan postupak sproveden je u pogonima i Laboratoriji za ispitivanje firme “Mostogradnja” iz Beograda.

Ispitivanje koeficijenta trenja izvršeno je u svemu prema odredbama standarda SRPS U.E7.140:1985 [32], na epruvetama na kojima se tarne površine pripremaju po postupku koji se ispituje, a zatim opterećuju na zatezanje po utvrđenom programu ispitivanja.

Jedan set za ispitivanje sastoji se od šest epruveta. Tri epruvete pritežu se zavrtnjevima M16, a tri zavrtnjevima M20 (slika A.1).



Slika A.1: Epruvete za određivanje koeficijenta trenja [32]

A.2 Postupak ispitivanja

Osnovne faze ispitivanja obuhvatile su:

- obradu tarnih površina,
- pritezanje visokovrednih zavrtnjeva na epruvetama, i
- određivanje koeficijenta trenja μ .

Za potrebe ovog istraživanja, epruvete se izrađuju od čelika kvaliteta S355JRG2, u svemu prema standardu SRPS EN 10025:2003 [72]. Obrada tarnih površina vrši se u svemu prema tehnologiji antikorozijske zaštite po sistemu "RESIST 86" koju je propisao proizvođač. Priprema površina epruveta izvršena je peskarenjem do stepena Sa 2,5 (ISO 8501-1:2007 [37]), abrazivom "Medium G" prečnika 30-50 μm .

Posle čišćenja epruveta, na suhu površinu četkom nanet je premaz "RESIST 86" (tabela A.1) u dva sloja, prema preporuci proizvođača.

Tabela A.1: Podaci o komponentama korišćenog premaza „Resist 86“

Sistem AKZ „Resist 86“ proizvođača „Jotun“	
Komponenta	Broj šarže
A	EE023488599.2
B	2898

Prosečna debljina suvog premaza (DFT), merena u karakterističnim tačkama, iznosila je:

1. za epruvete sa rupama \varnothing 16 mm DFT = 88,4 μm (min d = 65,4 μm , a max d = 110 μm) mereno nakon 24 sata,
2. za epruvete sa rupama \varnothing 20 mm DFT = 91,8 μm (min d = 60,5 μm , a max d = 124 μm) mereno nakon 24 sata.

U trenutku nanošenja premaza evidentirani su uslovi ambijenta (tabela A.2).

Tabela A.2: Uslovi ambijenta pri nanošenju premaza

Datum	Temperatura vazduha [°C]	Temperatura podloge [°C]	Tačka rose [°C]	Relativna vlažnost [%]
26.08.2013.	19,2	17,5	14,7	76,0

Posle sušenja epruvete su prenete u Laboratoriju za ispitivanje. Uzorci su do ispitivanja čuvani u zatvorenom prostoru, ali bez posebnih mogućnosti kontrolisanja temperature i relativne vlažnosti vazduha okoline tokom sušenja premaza.

Pritezanje uzoraka izvršeno je zavrtnjevima klase čvrstoće 10.9, izrađenim prema standardu SRPS EN 14399-4:2009 [73]. Proizvođač zavrtnjeva je firma „FV Gradac“.

Visokovredni zavrtnjevi su u epruvete ugrađeni u kompletu: zavrtnanj, navrtka i dve podloške. Pritezanje je izvršeno moment ključem (“*RAHSOL*” tip “*D*”, opsega 280-760 Nm) tako što je za svaki pojedini zavrtnanj utvrđena sila pritezanja F_p koja se ostvaruje određenim momentom pritezanja. Ovaj postupak u potpunosti odgovara načinu na koji se oni pritežu na gradilištu. Moment ključ baždaren je na momentnoj vagi “*RAHSOL 2000*”, opsega 100-2000 Nm.

Svaki zavrtnanj jednoznačno je obeležen, a postignuta sila pritezanjem u svakom zavrtnju kontrolisna je na mehaničkom tenzimetru („*STAHLWILLE 797*“, opsega 0-300 kN), pre i posle ispitivanja. Naime, visokovredni zavrtnjevi koji se koriste za ovo ispitivanje nakon ugradnje (unošenje pune sile prednaprezanja) ostaju u zoni elastičnosti pa je moguće vršiti njihovo prednaprezanje više puta. Zavrtnjevi se pre ugradnje pritežu moment ključem na tenzimetar i pri tome se određuje tačna vrednost sile koja se u njima ostvaruje nakon ugradnje. Sledeći korak je ugradnja zavrtnjeva u uzorke i određivanje koeficijenta trenja. Na kraju, isti zavrtnjevi ponovo se pritežu moment ključem u tenzimetru i još jednom određuje sila prednaprezanja koja se u njima javlja. Za proračun koeficijenta trenja uzima se srednja od ove dve izmerene vrednosti sile prednaprezanja. Ukupna sila pritezanja ΣF_{pi} predstavlja zbir pojedinačnih sila pritezanja zavrtnjeva na gornjoj odnosno donjoj polovini epruvete (po dve ukupne sile).

Ispitivanje epruveta sprovedeno je na mašini za ispitivanje materijala zatezanjem (kidalica) sa mernim pretvaračima sile “*SCAIME CA40X40t C4 CH 10e*”, kapaciteta 800 kN. Na epruvetu se pre ispitivanja pričvršćeni komparateri, po 2 komada sa gornje i donje strane epruvete (slika A.2). Na taj način se pratilo relativno pomeranje između tačaka A i C u odnosu na tačku B i registrovale obe sile pri kojima je nastalo proklizavanje gornjeg odnosno donjeg dela. Za silu proklizavanja F_t usvojena je sila pri kojoj nastaje relativno pomeranje tačaka A i C u odnosu na tačku B veće od $\delta = 150 \mu\text{m}$.

Pojedinačni koeficijenti trenja μ_i , koji se odnose na gornji ili donji deo svake epruvete, određeni su prema izrazu:

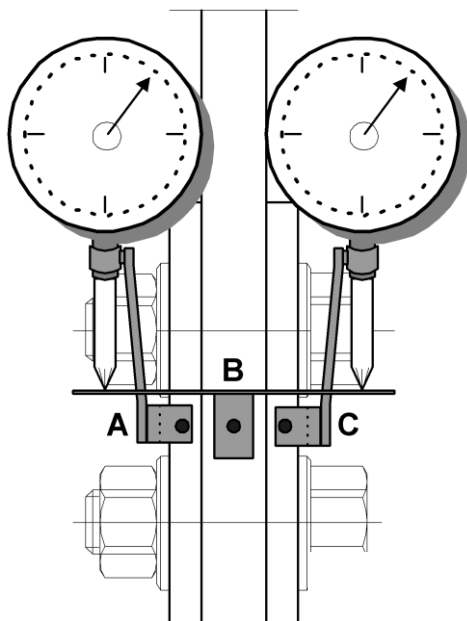
$$\mu_i = \frac{F_t}{2 \cdot \sum F_{pi}} \quad \text{A.1}$$

Za sve ispitane epruvete određene su vrednosti standardne devijacije:

$$S_{\mu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{sr} - \mu_i)^2}{n-1}} \quad \text{A.2}$$

i koeficijenta varijacije:

$$c_v = \frac{S_{\mu}}{\mu_{sr}} \cdot 100 \leq 8\% \quad \text{A.3}$$



Slika A.2: Određivanje sile trenja

A.3 Program ispitivanja

Program ispitivanja podrazumevao je:

- ispitivanje tri epruvete pritegnute zavrtnjevima M16, koje su pritegnute na punu silu prednapreznja 10 dana po nanošenju premaza i odmah zatim ispitane,
- ispitivanje tri epruvete pritegnute zavrtnjevima M20, koje su pritegnute na punu silu prednapreznja 10 dana po nanošenju premaza i odmah zatim ispitane,

Srednje vrednosti sile pritezanja F_p epruveta utvđene su prema [32] i iznose:

- za zavrtnjeve M16 $F_p = 99$ kN,
- za zavrtnjeve M20 $F_p = 154$ kN.

A.4 Rezultati ispitivanja

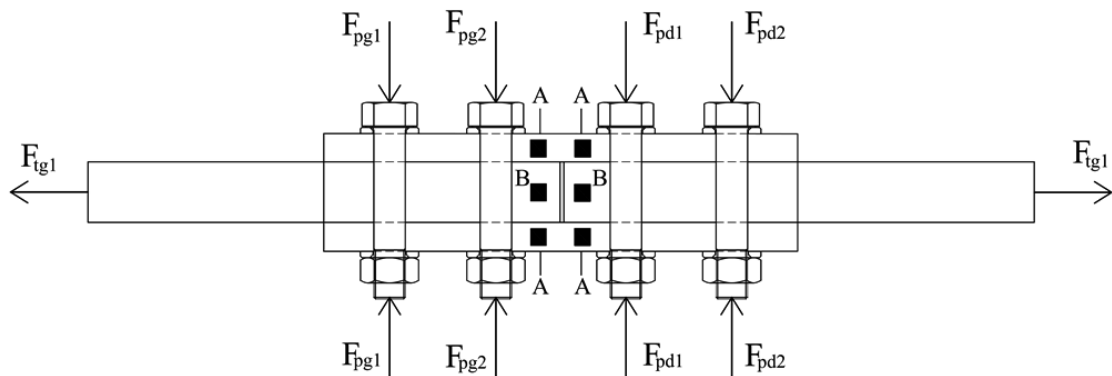
Za potrebe obrade i prikaza rezultata usvojene su sledeće oznake (slika A.3):

F_{pg1} , F_{pg2} – sile u zavrtnjevima na gornjoj strani epruvete,

F_{pd1} , F_{pd2} – sile u zavrtnjevima na donjoj strani epruvete,

F_{tg1} – sila proklizavanja na gornjoj strani epruvete i

F_{td1} – sila proklizavanja na donjoj strani epruvete.



Slika A.3: Šematski prikaz sile koje deluju na uzorak i mernih mesta za postavljanje tenziometara

Izvršen je tabelarni prikaz rezultata koeficijenta trenja za svaku epruvetu, odvojeno za gornje i donje tarne ravni (tabela A.3 i tabela A.4).

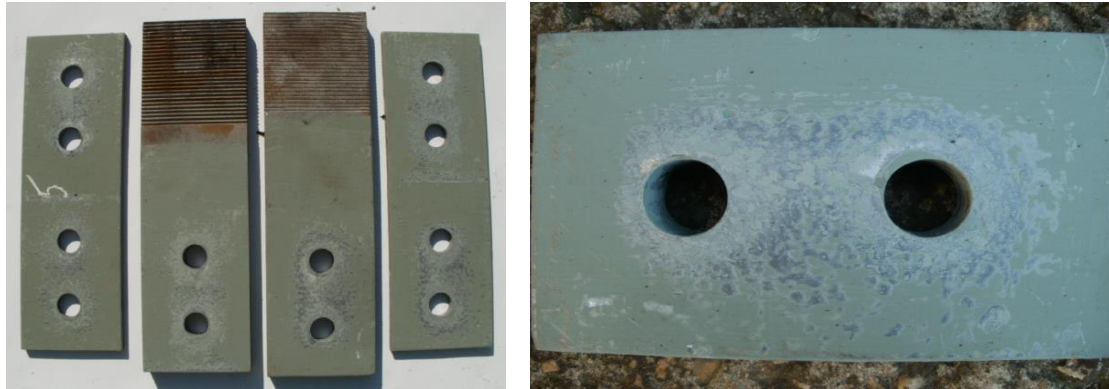
Nakon izvršenog ispitivanja i uklanjanja uzorka iz kidalice izvršeno je njihovo fotografisanje. Na priloženim slikama epruveta (slika A.4 i slika A.5) jasno su uočljive zone angažovanja trenja oko zavrtnjeva. Takođe, može se videti da nema oštećenja osnovnog materijala u zoni rupe za spojna sredstava odnosno da u toku ispitivanja zavrtnjevi nisu bili izloženi smicanju.

Tabela A.3: Koeficijenti trenja na epruvetama pritegnutim zavrtnjevima M16

Epruveta	Tarna površ	DFT [μm]	Sile u zavrtnjevima F_{pg} i F_{pd} [kN]		Ukupna sila pritezanja F_p [kN]	Sila proklizavanja F_t [kN]	Koeficijent trenja μ
E1M16	G	88,4	$F_{pg1}=100$	$F_{pg2}=100$	200	203,8	0,51
	D	88,4	$F_{pd1}=103$	$F_{pd2}=107$	210	203,8	0,48
E2M16	G	88,4	$F_{pg1}=107$	$F_{pg2}=107$	214	208,2	0,49
	D	88,4	$F_{pd1}=108$	$F_{pd2}=115$	223	208,2	0,47
E3M16	G	88,4	$F_{pg1}=92$	$F_{pg2}=93$	185	190,1	0,51
	D	88,4	$F_{pd1}=91$	$F_{pd2}=90$	181	190,1	0,52
Srednja vrednost							0,50
Standardna devijacija							0,0197
Koeficijent varijacije [%]							3,90

Tabela A.4: Koeficijenti trenja na epruvetama pritegnutim zavrtnjevima M20

Epruveta	Tarna površ	DFT [μm]	Sile u zavrtnjevima F_{pg} i F_{pd} [kN]		Ukupna sila pritezanja F_p [kN]	Sila proklizavanja F_t [kN]	Koeficijent trenja μ
E1M20	G	91,8	$F_{pg1}=160$	$F_{pg2}=170$	330	324,6	0,49
	D	91,8	$F_{pd1}=164$	$F_{pd2}=163$	327	324,6	0,50
E2M20	G	91,8	$F_{pg1}=160$	$F_{pg2}=154$	314	285,2	0,45
	D	91,8	$F_{pd1}=152$	$F_{pd2}=145$	297	285,2	0,48
E3M20	G	91,8	$F_{pg1}=162$	$F_{pg2}=170$	332	306,8	0,46
	D	91,8	$F_{pd1}=177$	$F_{pd2}=155$	332	306,8	0,46
Srednja vrednost							0,47
Standardna devijacija							0,0197
Koeficijent varijacije [%]							4,20



Slika A.4: Epruvete pritegnute zavrtnjevima M16 – izgled nakon ispitivanja



Slika A.5: Epruvete pritegnute zavrtnjevima M20 – izgled nakon ispitivanja

PRIOLOG B – Debljina cink silikatnog premaza

B.1 Debljina AKZ na čeličnim pločama faze I eksperimenta

Tabela B.1: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 5 mm

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
5.1	5	a	Easy-check FE-S	77	81	71	91	70	70	79	67	75.8
			Fischer	77	47	44	56	88	66	80	52	63.8
		b	Easy-check FE-S	91	50	75	61	48	52	57	57	61.4
			Fischer	54	55	59	52	61	71	79	62	61.6
5.2	5	a	Easy-check FE-S	72	70	56	66	77	63	53	60	64.6
			Fischer	75	59	76	52	76	70	83	65	69.5
		b	Easy-check FE-S	71	72	84	67	73	82	85	77	76.4
			Fischer	95	64	65	81	73	76	77	76	75.9
5.3	5	a	Easy-check FE-S	76	95	74	73	75	60	67	55	71.9
			Fischer	58	56	62	82	61	60	71	72	65.3
		b	Easy-check FE-S	79	79	86	88	59	52	80	80	75.4
			Fischer	86	103	68	58	82	64	65	57	72.9
5.4	5	a	Easy-check FE-S	61	77	64	78	65	76	80	85	73.3
			Fischer	93	50	65	66	70	89	70	69	71.5
		b	Easy-check FE-S	83	100	62	92	79	113	77	91	87.1
			Fischer	66	97	70	81	73	85	79	92	80.4
5.5	5	a	Easy-check FE-S	62	63	65	78	59	70	67	65	66.1
			Fischer	64	70	60	54	77	48	60	53	60.8
		b	Easy-check FE-S	85	65	82	72	67	58	52	48	66.1
			Fischer	59	65	84	70	45	53	64	56	62.0
5.6	5	a	Easy-check FE-S	87	53	75	77	87	59	60	57	69.4
			Fischer	85	64	76	77	79	79	74	57	73.9
		b	Easy-check FE-S	60	65	54	71	50	58	50	61	58.6
			Fischer	51	65	60	51	78	50	61	62	59.8
5.7	5	a	Easy-check FE-S	67	63	93	72	81	70	58	58	70.3
			Fischer	62	53	50	54	70	59	82	56	60.8
		b	Easy-check FE-S	85	76	71	56	78	70	69	62	70.9
			Fischer	62	50	56	56	77	70	62	70	62.9
5.8	5	a	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	63	65	77	64	60	62	51	66	63.5
		b	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	60	61	50	61	38	67	53	53	55.4

Tabela B.2: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 8 mm

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
8.1	8	a	Easy-check FE-S	94	79	84	86	80	78	88	58	80.9
			Fischer	87	61	75	71	83	69	88	70	75.5
		b	Easy-check FE-S	94	91	68	57	87	78	66	80	77.6
			Fischer	71	103	61	79	74	74	77	67	75.8
8.2	8	a	Easy-check FE-S	70	53	78	50	86	50	62	52	62.6
			Fischer	68	70	64	65	69	85	92	54	70.9
		b	Easy-check FE-S	60	81	66	101	91	69	74	82	78.0
			Fischer	60	62	70	76	78	79	70	70	70.6
8.3	8	a	Easy-check FE-S	85	75	73	68	69	72	61	56	69.9
			Fischer	80	53	55	74	87	75	58	47	66.1
		b	Easy-check FE-S	65	78	58	75	67	61	66	55	65.6
			Fischer	82	85	65	61	62	98	62	58	71.6
8.4	8	a	Easy-check FE-S	89	57	59	60	74	67	61	100	70.9
			Fischer	77	55	60	60	72	65	65	65	64.9
		b	Easy-check FE-S	68	86	54	59	69	67	82	88	71.6
			Fischer	67	83	61	84	86	65	74	65	73.1

Tabela B.3: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 10 mm

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
10.1	10	a	Easy-check FE-S	70	58	50	52	51	57	62	54	56.8
			Fischer	46	48	51	54	54	46	64	48	51.4
		b	Easy-check FE-S	75	58	46	54	62	45	70	49	57.4
			Fischer	59	59	59	47	85	55	77	43	60.5
10.2	10	a	Easy-check FE-S	53	69	106	70	79	80	77	75	76.1
			Fischer	55	71	58	50	72	94	59	55	64.3
		b	Easy-check FE-S	58	71	58	64	67	65	66	71	65.0
			Fischer	73	70	50	65	68	60	67	50	62.9
10.3	10	a	Easy-check FE-S	74	52	58	57	76	52	53	66	61.0
			Fischer	46	43	61	52	66	81	69	54	59.0
		b	Easy-check FE-S	103	90	66	56	75	78	70	72	76.3
			Fischer	82	72	58	55	58	69	68	42	63.0
10.4	10	a	Easy-check FE-S	65	75	76	75	62	75	73	86	73.4
			Fischer	56	64	68	66	64	77	55	65	64.4
		b	Easy-check FE-S	65	85	70	84	68	76	67	68	72.9
			Fischer	53	55	59	58	55	53	63	64	57.5
10.5	10	a	Easy-check FE-S	67	66	66	49	65	75	56	75	64.9
			Fischer	85	67	52	60	56	60	61	70	63.9
		b	Easy-check FE-S	92	96	60	92	77	85	70	86	82.3
			Fischer	73	76	74	96	69	84	67	70	76.1
10.6	10	a	Easy-check FE-S	68	54	49	51	49	54	58	56	54.9
			Fischer	62	56	51	62	45	68	59	59	57.8
		b	Easy-check FE-S	89	64	82	89	77	77	77	61	77.0
			Fischer	81	61	65	55	58	75	90	56	67.6
10.7	10	a	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	65	61	66	62	58	76	59	86	66.6
		b	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	72	55	54	62	45	73	66	64	61.4
10.8	10	a	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	74	75	54	60	49	65	47	59	60.4
		b	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	47	51	41	44	56	48	42	56	48.1

Tabela B.4: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 1

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
15.1	15	a	Easy-check FE-S	77	69	66	74	73	69	70	55	69.1
			Fischer	71	55	50	57	81	50	50	70	60.5
		b	Easy-check FE-S	62	78	60	61	74	67	52	60	64.3
			Fischer	51	61	67	53	40	60	58	51	55.1
15.2	15	a	Easy-check FE-S	62	64	51	54	72	76	73	67	64.9
			Fischer	67	71	62	57	62	53	64	60	62.0
		b	Easy-check FE-S	75	77	70	76	63	72	66	64	70.4
			Fischer	70	60	57	66	79	62	72	69	66.9
15.3	15	a	Easy-check FE-S	84	80	87	83	80	78	98	83	84.1
			Fischer	84	67	56	79	58	70	76	90	72.5
		b	Easy-check FE-S	66	63	74	62	57	89	72	86	71.1
			Fischer	80	54	68	74	50	71	53	54	63.0
15.4	15	a	Easy-check FE-S	90	69	73	70	52	73	83	76	73.3
			Fischer	76	84	52	83	74	71	72	92	75.5
		b	Easy-check FE-S	64	55	57	80	66	72	59	70	65.4
			Fischer	74	61	40	58	77	65	55	55	60.6
15.5	15	a	Easy-check FE-S	50	61	64	86	71	91	59	78	70.0
			Fischer	52	50	59	69	61	80	59	80	63.8
		b	Easy-check FE-S	70	55	66	63	84	75	58	74	68.1
			Fischer	66	78	62	61	71	62	53	89	67.8
15.6	15	a	Easy-check FE-S	87	104	104	110	90	102	78	91	95.8
			Fischer	77	86	105	107	93	100	90	103	95.1
		b	Easy-check FE-S	63	64	59	61	54	74	50	80	63.1
			Fischer	57	54	64	67	55	89	74	58	64.8
15.7	15	a	Easy-check FE-S	73	50	64	69	56	47	50	64	59.1
			Fischer	68	54	55	61	47	57	53	72	58.4
		b	Easy-check FE-S	63	67	72	69	70	68	66	82	69.6
			Fischer	64	58	47	97	69	79	63	55	66.5
15.8	15	a	Easy-check FE-S	63	77	75	82	97	57	82	76	76.1
			Fischer	81	53	70	55	78	72	78	57	68.0
		b	Easy-check FE-S	53	54	57	57	64	56	58	66	58.1
			Fischer	40	60	56	73	61	64	50	56	57.5

Tabela B.5: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 2

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
15.9	15	a	Easy-check FE-S	59	58	68	67	63	56	63	69	62.9
			Fischer	70	60	51	51	70	62	55	50	58.6
		b	Easy-check FE-S	57	90	57	100	71	84	87	90	79.5
			Fischer	69	67	60	73	70	76	79	97	73.9
15.10	15	a	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	69	65	53	67	65	74	54	65	64.0
		b	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	56	59	59	70	56	68	69	69	63.3
15.11	15	a	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	56	57	58	65	68	65	65	68	62.8
		b	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	53	96	53	89	59	87	65	62	70.5
15.12	15	a	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	58	63	59	64	62	67	56	56	60.6
		b	Easy-check FE-S	/	/	/	/	/	/	/	/	0.0
			Fischer	66	72	41	87	60	63	60	62	63.9

Tabela B.6: Faza I - debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 25 mm

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
25.1	25	a	Easy-check FE-S	64	61	74	85	78	93	82	58	74.4
			Fischer	52	66	72	80	85	64	65	105	73.6
		b	Easy-check FE-S	63	66	69	67	70	61	66	53	64.4
			Fischer	51	56	71	59	51	67	52	51	57.3
25.2	25	a	Easy-check FE-S	61	81	57	57	63	96	68	59	67.8
			Fischer	48	59	51	58	66	70	52	78	60.3
		b	Easy-check FE-S	60	42	67	79	60	61	56	53	59.8
			Fischer	51	51	44	44	48	62	70	64	54.3
25.3	25	a	Easy-check FE-S	89	55	68	70	63	66	68	66	68.1
			Fischer	69	56	66	85	60	82	57	60	66.9
		b	Easy-check FE-S	65	54	69	56	59	52	70	60	60.6
			Fischer	52	51	58	40	55	54	74	41	53.1
25.4	25	a	Easy-check FE-S	66	66	54	71	65	80	71	85	69.8
			Fischer	57	80	66	51	62	62	73	56	63.4
		b	Easy-check FE-S	77	64	71	55	67	102	67	67	71.3
			Fischer	87	60	91	57	62	85	78	71	73.9

B.2 Debljina AKZ na čeličnim pločama faze II eksperimenta

Tabela B.7: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 5 mm

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometer	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
5.9	5	a	Elcometer 456	61	45	56	48	46	60	57	58	53.7
			Fischer	47	47	40	44	40	51	53	54	47.0
		b	Elcometer 456	92	110	120	82	107	90	91	79	96.4
			Fischer	89	84	109	85	111	64	99	94	91.9
5.10	5	a	Elcometer 456	55	52	56	64	54	46	53	63	55.3
			Fischer	68	47	61	54	40	46	35	35	48.3
		b	Elcometer 456	53	60	59	48	58	61	76	51	58.1
			Fischer	58	49	59	50	42	45	61	52	52.0
5.11	5	a	Elcometer 456	72	70	61	54	45	61	64	51	59.7
			Fischer	61	55	42	53	38	54	58	51	51.5
		b	Elcometer 456	54	49	41	48	70	41	64	66	54.0
			Fischer	53	43	50	55	44	55	49	53	50.3
5.12	5	a	Elcometer 456	69	105	87	75	47	79	52	71	73.1
			Fischer	58	57	70	81	73	91	58	62	68.8
		b	Elcometer 456	63	58	56	70	51	73	53	54	59.8
			Fischer	52	61	46	55	43	53	43	43	49.5
5.13	5	a	Elcometer 456	55	53	56	46	56	70	52	59	56.1
			Fischer	46	54	48	47	51	56	53	47	50.3
		b	Elcometer 456	59	80	52	81	49	76	56	75	65.9
			Fischer	68	70	53	79	47	80	49	71	64.6
5.14	5	a	Elcometer 456	70	57	57	42	55	62	63	75	60.1
			Fischer	52	44	46	44	41	46	52	49	46.8
		b	Elcometer 456	53	43	51	41	54	44	49	43	47.2
			Fischer	45	38	41	35	33	35	48	35	38.8
5.15	5	a	Elcometer 456	53	61	44	68	49	42	50	60	53.4
			Fischer	74	89	46	62	55	56	72	56	63.8
		b	Elcometer 456	50	61	53	51	53	54	55	47	53.0
			Fischer	39	49	44	42	40	42	48	42	43.3
5.16	5	a	Elcometer 456	65	56	59	65	60	51	59	49	58.0
			Fischer	61	70	49	63	60	48	47	54	56.5
		b	Elcometer 456	52	63	52	49	47	52	47	48	51.3
			Fischer	38	49	46	47	43	50	67	43	47.9

Tabela B.8: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 8 mm

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometer	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
8.5	8	a	Elcometer 456	65	64	60	65	47	57	65	55	59.8
			Fischer	44	70	48	87	48	58	48	40	55.4
		b	Elcometer 456	59	44	55	55	49	63	80	61	58.2
			Fischer	66	51	52	55	50	51	40	53	52.3
8.6	8	a	Elcometer 456	49	68	45	94	53	85	45	47	60.8
			Fischer	45	69	45	55	47	49	55	63	53.5
		b	Elcometer 456	47	46	72	50	56	77	64	63	59.4
			Fischer	46	58	74	44	51	62	61	69	58.1
8.7	8	a	Elcometer 456	49	47	47	54	52	55	65	55	52.9
			Fischer	61	45	41	43	41	42	47	51	46.4
		b	Elcometer 456	52	52	63	66	55	46	62	47	55.4
			Fischer	40	48	40	60	44	52	49	47	47.5
8.8	8	a	Elcometer 456	51	61	53	44	43	59	48	68	53.4
			Fischer	43	51	55	38	39	66	66	49	50.9
		b	Elcometer 456	56	83	85	56	45	58	63	55	62.7
			Fischer	56	64	68	64	44	42	54	41	54.1

Tabela B.9: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 10 mm

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometer	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
10.9	10	a	Elcometer 456	43	76	46	68	54	58	51	61	57.1
			Fischer	53	78	56	64	51	63	53	53	58.9
		b	Elcometer 456	50	57	57	72	50	41	49	53	53.5
			Fischer	38	45	43	54	46	47	36	37	43.3
10.10	10	a	Elcometer 456	57	61	45	43	49	45	54	53	50.6
			Fischer	49	41	41	39	40	42	47	78	47.1
		b	Elcometer 456	47	44	58	49	58	44	48	55	50.2
			Fischer	43	36	49	52	68	46	38	42	46.8
10.11	10	a	Elcometer 456	69	67	60	54	46	51	50	69	58.3
			Fischer	58	64	51	50	40	49	36	46	49.3
		b	Elcometer 456	80	72	54	64	64	69	56	60	64.8
			Fischer	50	68	52	49	52	67	67	44	56.1
10.12	10	a	Elcometer 456	63	72	77	73	73	50	53	54	64.4
			Fischer	45	73	68	61	50	49	48	59	56.6
		b	Elcometer 456	64	95	49	49	57	54	56	49	58.9
			Fischer	46	78	61	74	39	43	40	42	52.9
10.13	10	a	Elcometer 456	63	44	63	59	52	43	52	49	53.2
			Fischer	57	67	54	45	46	41	41	49	50.0
		b	Elcometer 456	51	43	46	55	57	62	48	42	50.5
			Fischer	43	52	40	47	51	51	42	40	45.8
10.14	10	a	Elcometer 456	83	99	53	50	75	64	70	64	69.6
			Fischer	58	87	56	65	54	53	52	59	60.5
		b	Elcometer 456	66	62	70	52	51	67	65	67	62.5
			Fischer	64	50	63	47	49	87	59	65	60.5
10.15	10	a	Elcometer 456	56	83	63	73	66	80	58	79	69.6
			Fischer	55	69	65	73	61	54	56	67	62.5
		b	Elcometer 456	62	61	53	51	51	52	54	42	53.2
			Fischer	50	60	41	55	47	56	52	42	50.4
10.16	10	a	Elcometer 456	74	66	67	66	61	69	67	58	65.9
			Fischer	66	43	66	56	62	56	60	53	57.8
		b	Elcometer 456	61	74	53	72	66	71	57	76	66.2
			Fischer	54	70	62	74	53	49	61	55	59.8

Tabela B.10: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 1

Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometer	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
15.13	15	a	Elcometer 456	66	107	66	104	68	77	84	58	78.6
			Fischer	89	96	71	78	54	77	57	58	72.5
		b	Elcometer 456	62	105	83	104	83	48	75	65	78.2
			Fischer	63	75	52	66	74	45	64	47	60.8
15.14	15	a	Elcometer 456	59	49	73	49	55	67	76	67	61.8
			Fischer	47	64	60	77	64	55	49	63	59.9
		b	Elcometer 456	89	62	86	74	47	69	54	63	67.9
			Fischer	75	70	76	79	58	54	58	55	65.6
15.15	15	a	Elcometer 456	64	77	44	59	59	68	58	77	63.1
			Fischer	59	87	52	50	49	60	57	58	59.0
		b	Elcometer 456	48	59	49	51	49	53	62	55	53.2
			Fischer	44	46	40	40	42	48	45	53	44.8
15.16	15	a	Elcometer 456	43	97	79	62	74	73	56	90	71.5
			Fischer	52	84	84	40	62	84	50	74	66.3
		b	Elcometer 456	64	57	41	58	47	63	49	48	53.3
			Fischer	55	53	55	52	46	45	48	46	50.0
15.17	15	a	Elcometer 456	50	70	64	57	57	80	58	69	63.1
			Fischer	36	51	55	44	48	51	53	66	50.5
		b	Elcometer 456	58	73	45	77	57	61	64	68	62.8
			Fischer	50	89	40	64	54	69	48	44	57.3
15.18	15	a	Elcometer 456	46	47	50	44	56	48	46	51	48.5
			Fischer	36	41	45	48	48	38	37	39	41.5
		b	Elcometer 456	55	56	59	50	66	63	68	70	60.7
			Fischer	49	61	57	50	63	42	46	52	52.5
15.19	15	a	Elcometer 456	67	59	64	73	51	49	52	50	58.0
			Fischer	47	44	43	50	43	37	42	43	43.6
		b	Elcometer 456	55	62	64	46	49	53	49	52	53.8
			Fischer	42	36	46	43	46	47	47	47	44.3
15.20	15	a	Elcometer 456	64	72	79	69	70	68	84	76	72.8
			Fischer	47	66	71	58	49	62	48	76	59.6
		b	Elcometer 456	62	71	60	55	53	65	55	57	59.7
			Fischer	51	43	60	59	41	48	41	41	48.0

Tabela B.11: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 15 mm – deo 2

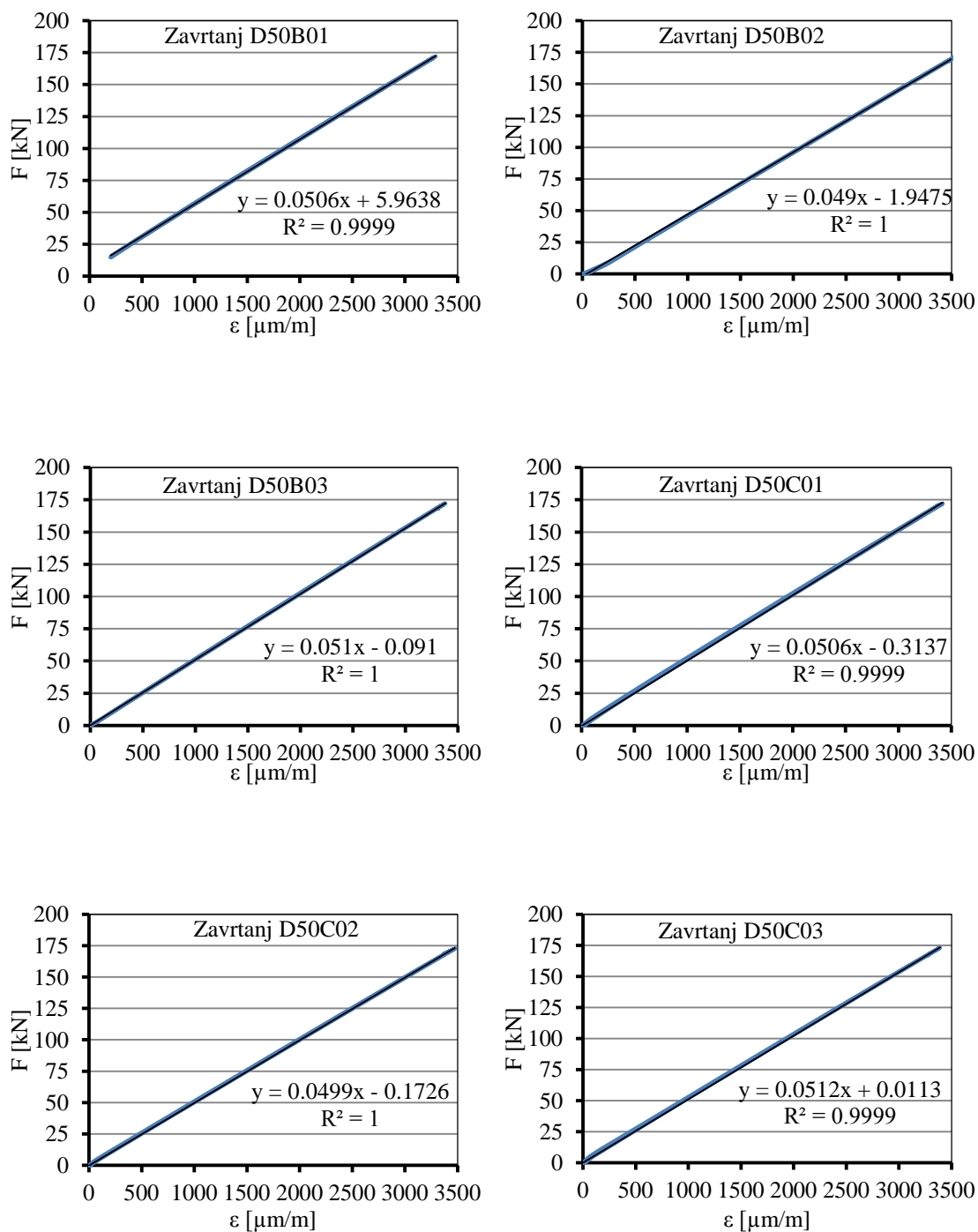
Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima t_{akz} [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
15.21	15	a	Elcometer 456	69	72	66	68	77	73	66	62	69.2
			Fischer	52	52	62	52	62	54	54	51	54.9
		b	Elcometer 456	53	73	68	100	58	77	60	90	72.4
			Fischer	52	66	59	88	61	68	48	86	66.0
15.22	15	a	Elcometer 456	61	56	63	59	65	71	72	81	66.1
			Fischer	47	55	52	54	54	68	58	65	56.6
		b	Elcometer 456	72	99	49	83	71	68	51	61	69.2
			Fischer	54	110	67	67	54	48	53	53	63.3
15.23	15	a	Elcometer 456	64	82	65	66	59	81	62	54	66.6
			Fischer	50	75	49	71	52	73	55	46	58.9
		b	Elcometer 456	55	75	61	62	58	67	53	62	61.7
			Fischer	44	59	53	60	46	49	58	52	52.6
15.24	15	a	Elcometer 456	61	50	57	71	64	60	69	69	62.6
			Fischer	50	45	63	55	54	61	52	49	53.6
		b	Elcometer 456	104	107	81	82	73	83	81	65	84.6
			Fischer	82	95	42	87	60	64	67	73	71.3

Tabela B.12: Faza II – debljina AKZ na čeličnim pločama debljine 25 mm

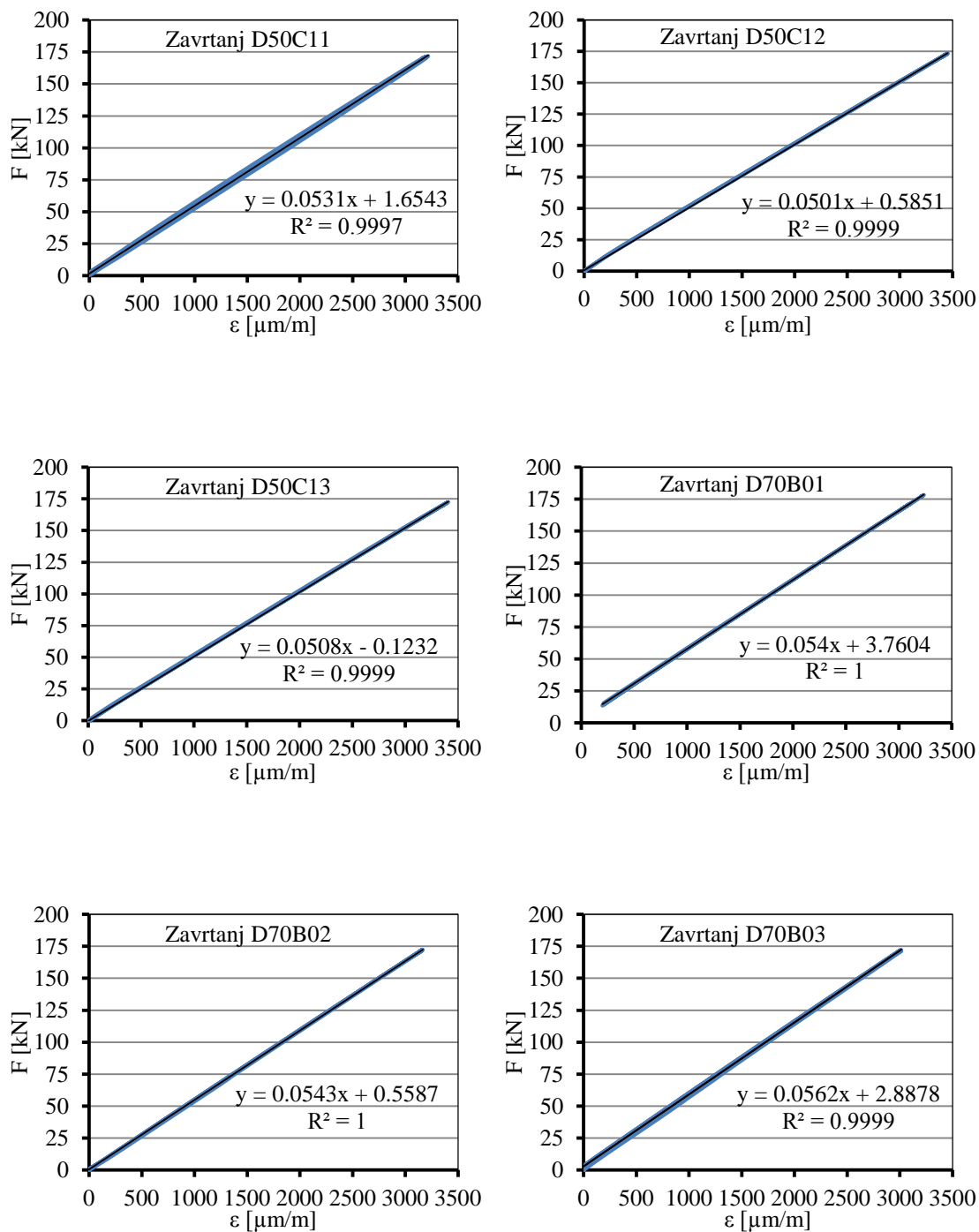
Čelične ploče [mm]			Debljina AKZ (Jotun Resist 86) po mernim mestima [μm]									
Ploča	t_{pl}	Strana	Elkometar	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{t_{akz}}$
25.5	25	a	Elcometer 456	65	68	60	65	50	53	55	54	58.7
			Fischer	50	53	47	71	61	55	47	46	53.8
		b	Elcometer 456	76	76	60	66	63	78	98	72	73.5
			Fischer	66	58	53	69	55	70	56	57	60.5
25.6	25	a	Elcometer 456	59	53	62	52	54	58	62	62	57.6
			Fischer	54	51	52	44	65	58	54	52	53.8
		b	Elcometer 456	76	52	72	58	64	71	67	61	65.1
			Fischer	53	43	63	67	55	63	70	64	59.8
25.7	25	a	Elcometer 456	50	45	48	49	49	53	50	47	48.7
			Fischer	49	39	33	38	44	37	45	42	40.9
		b	Elcometer 456	67	61	77	71	65	89	93	70	74.1
			Fischer	60	59	69	73	55	65	49	60	61.3
25.8	25	a	Elcometer 456	51	48	54	53	57	58	49	45	51.7
			Fischer	57	43	46	55	44	45	42	57	48.6
		b	Elcometer 456	77	61	57	45	69	70	73	65	64.5
			Fischer	61	49	57	49	56	77	44	53	55.8

PRILOG C – Dijagrami kalibracionih krivih

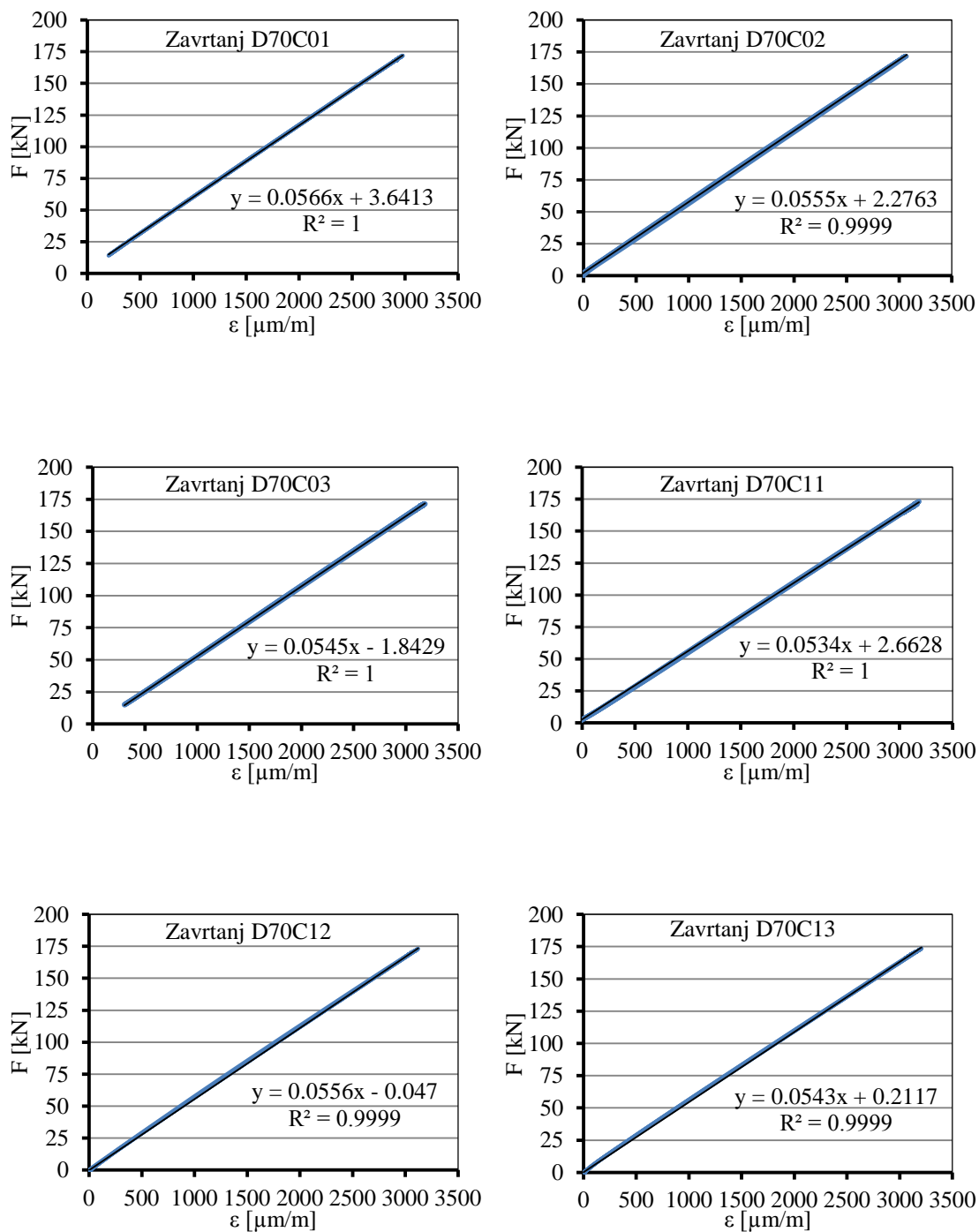
C.1 Kalibracione krive za HV zavrtnjeve – faza I



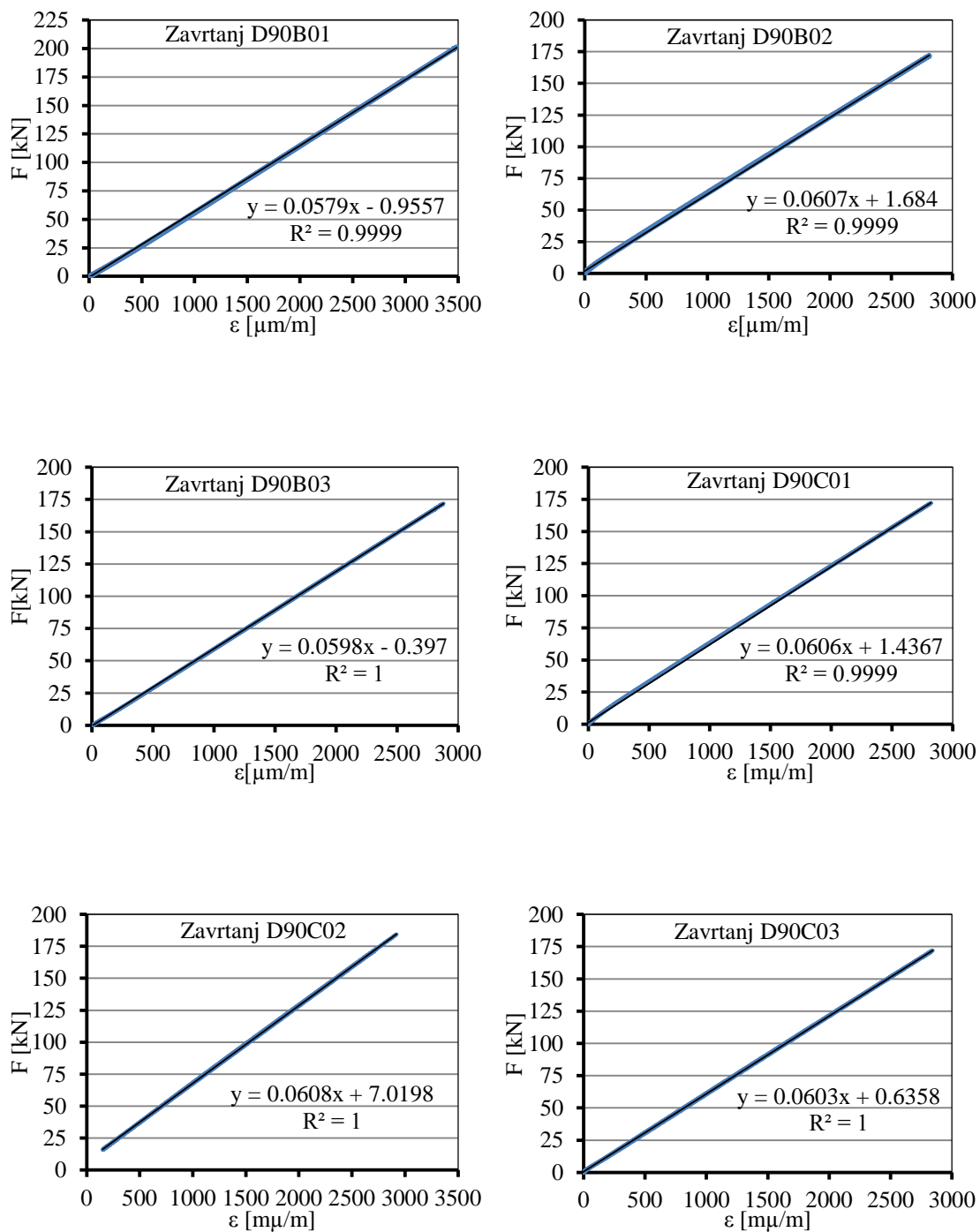
Slika C.1: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D1 i D2



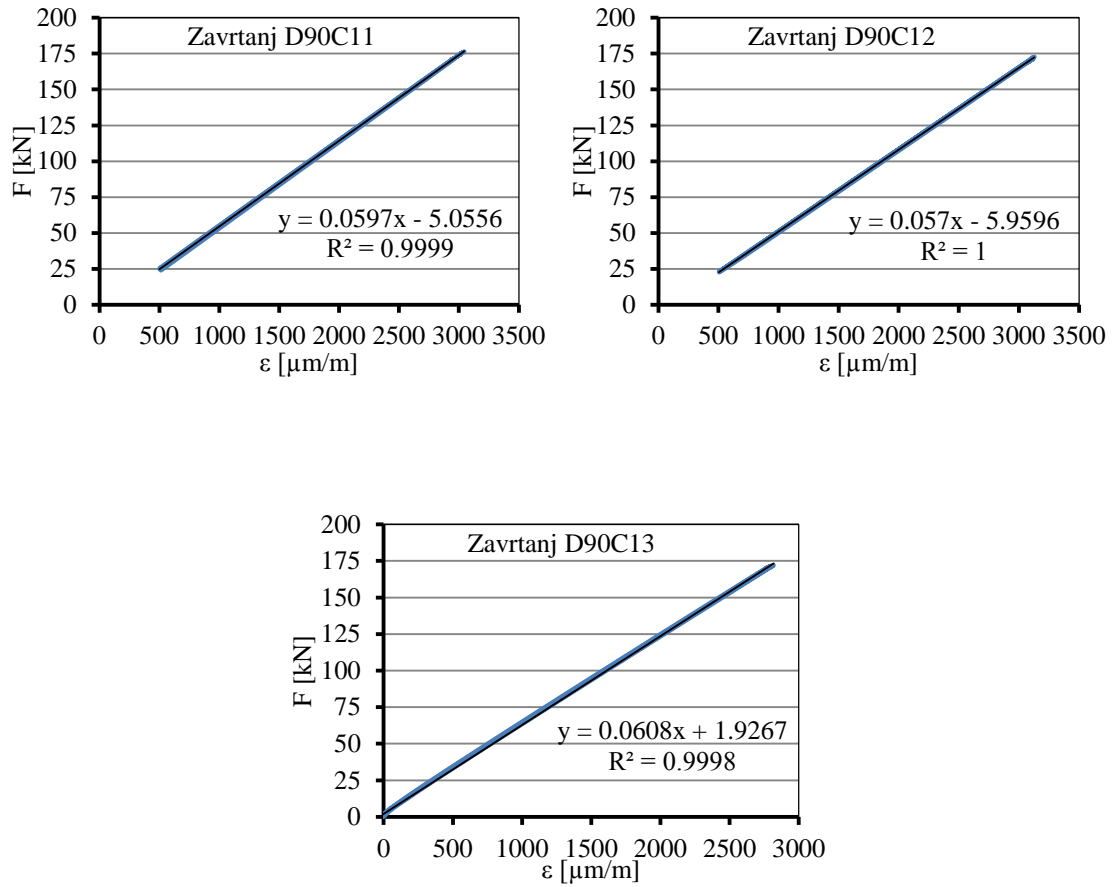
Slika C.2: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D3 i D4



Slika C.3: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D5 i D6

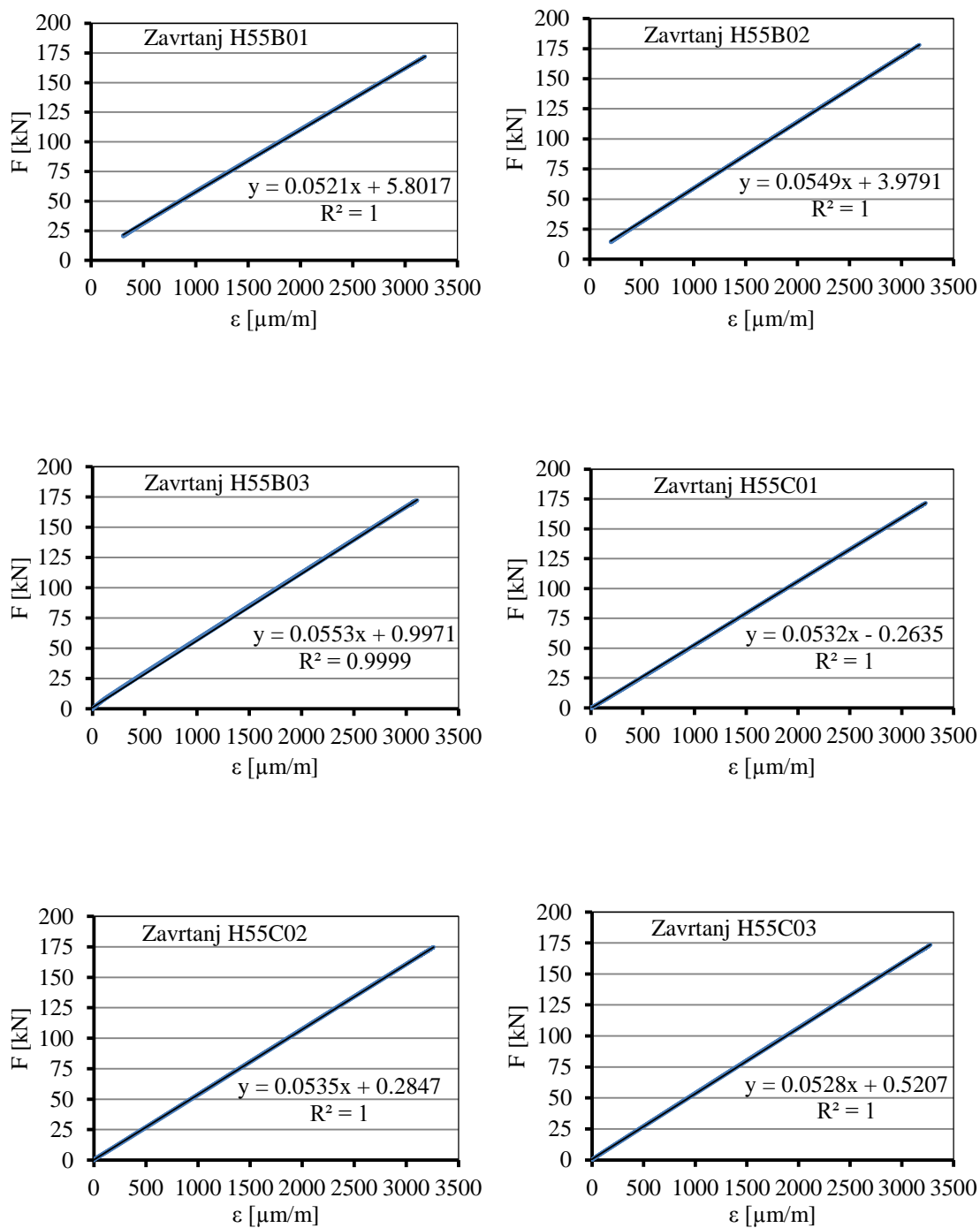


Slika C.4: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D7 i D8

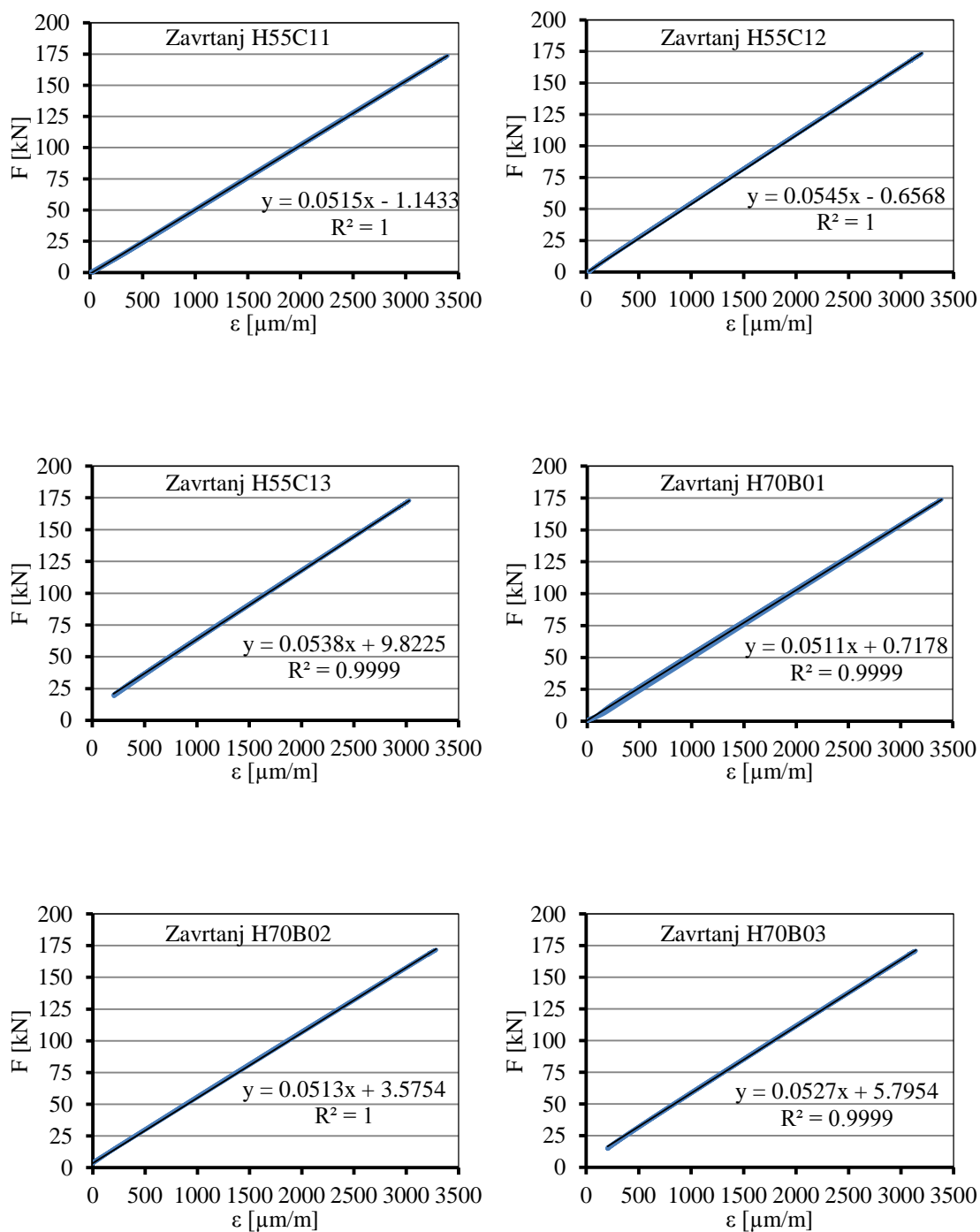


Slika C.5: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorak D9

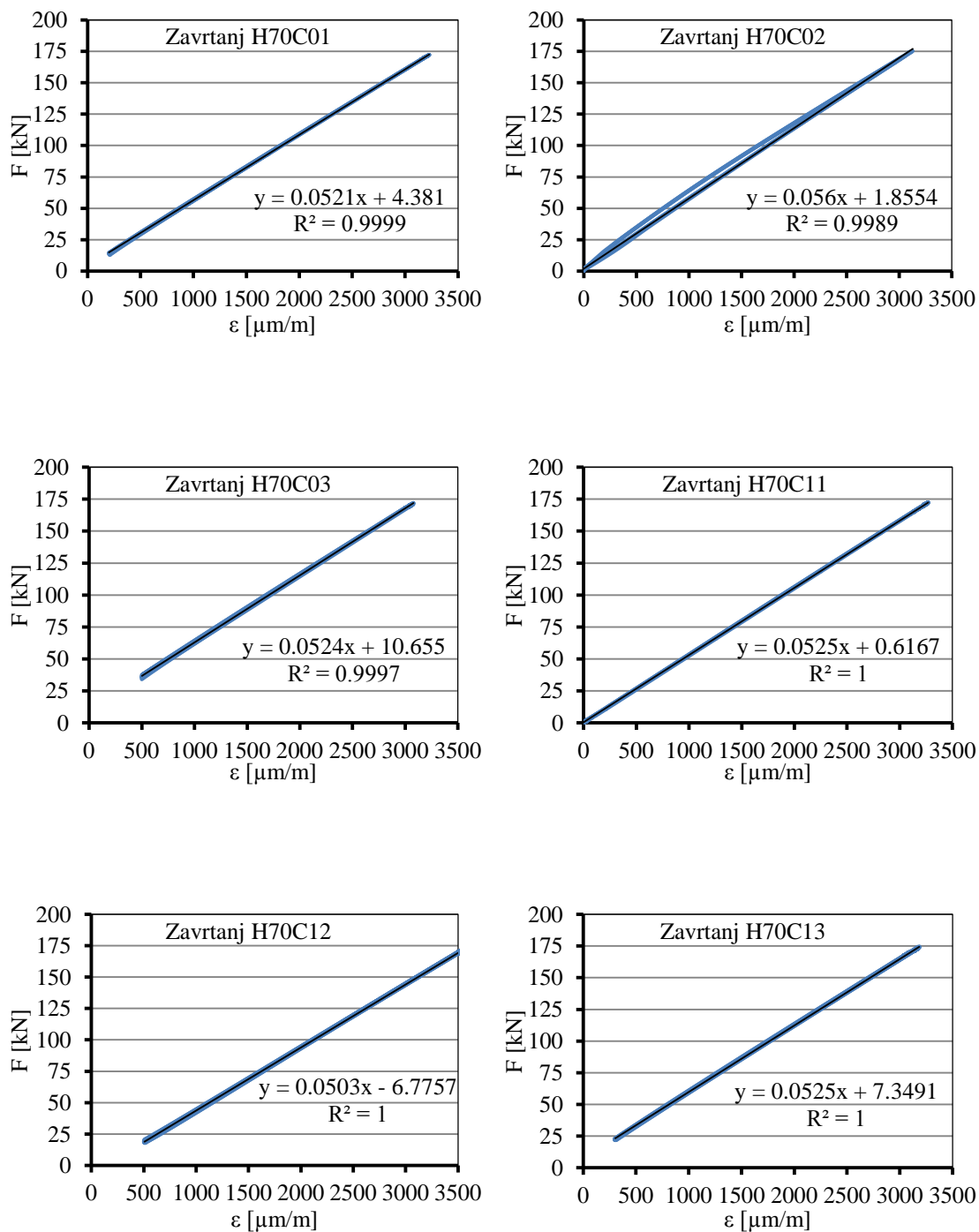
C.2 Kalibracione krive za HBT zavrtanje – faza I



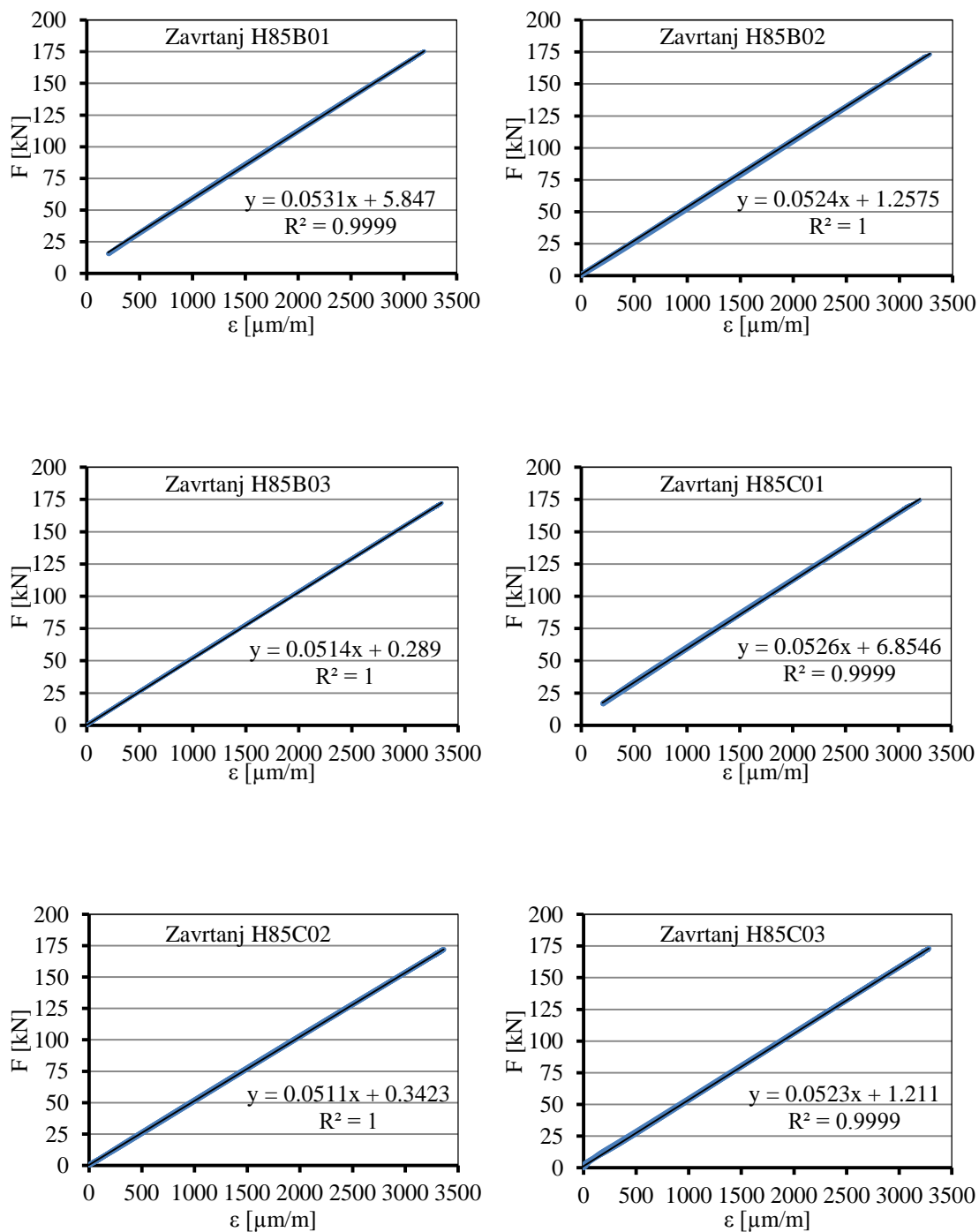
Slika C.6: Kalibracione krive za HBT zavrtanje ugrađene u uzorke H1 i H2



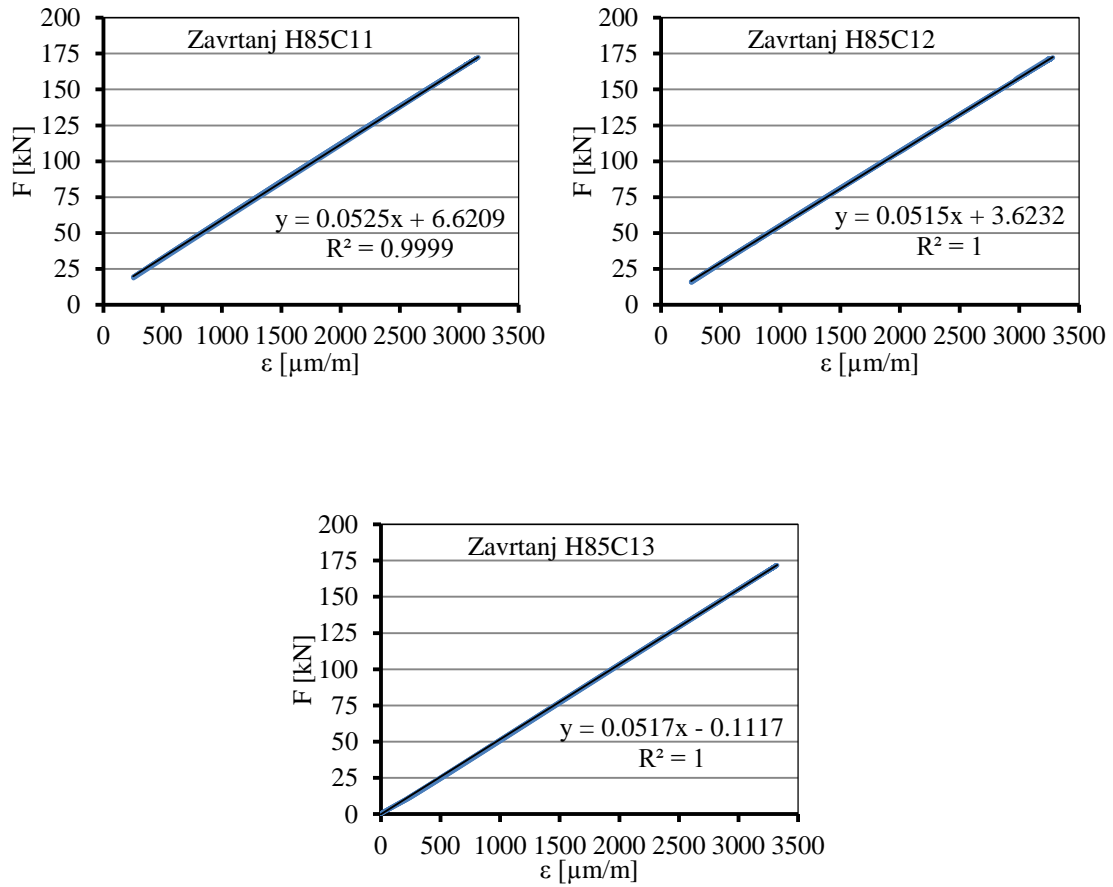
Slika C.7: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H3 i H4



Slika C.8: Kalibracione krive za HBT zavrtanje ugrađene u uzorke H5 i H6

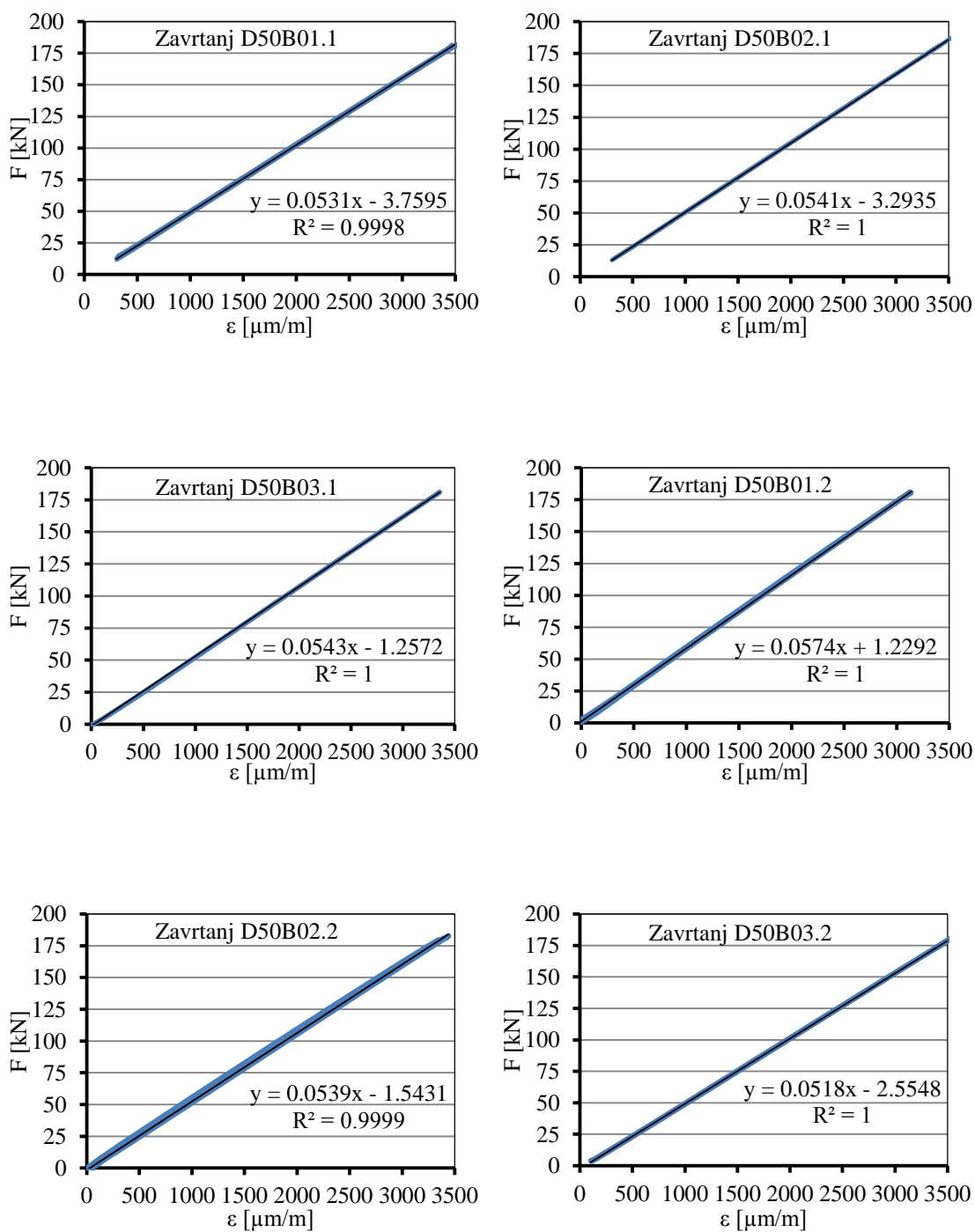


Slika C.9: Kalibracione krive za HBT zavrtanje ugrađene u uzorke H7 i H8

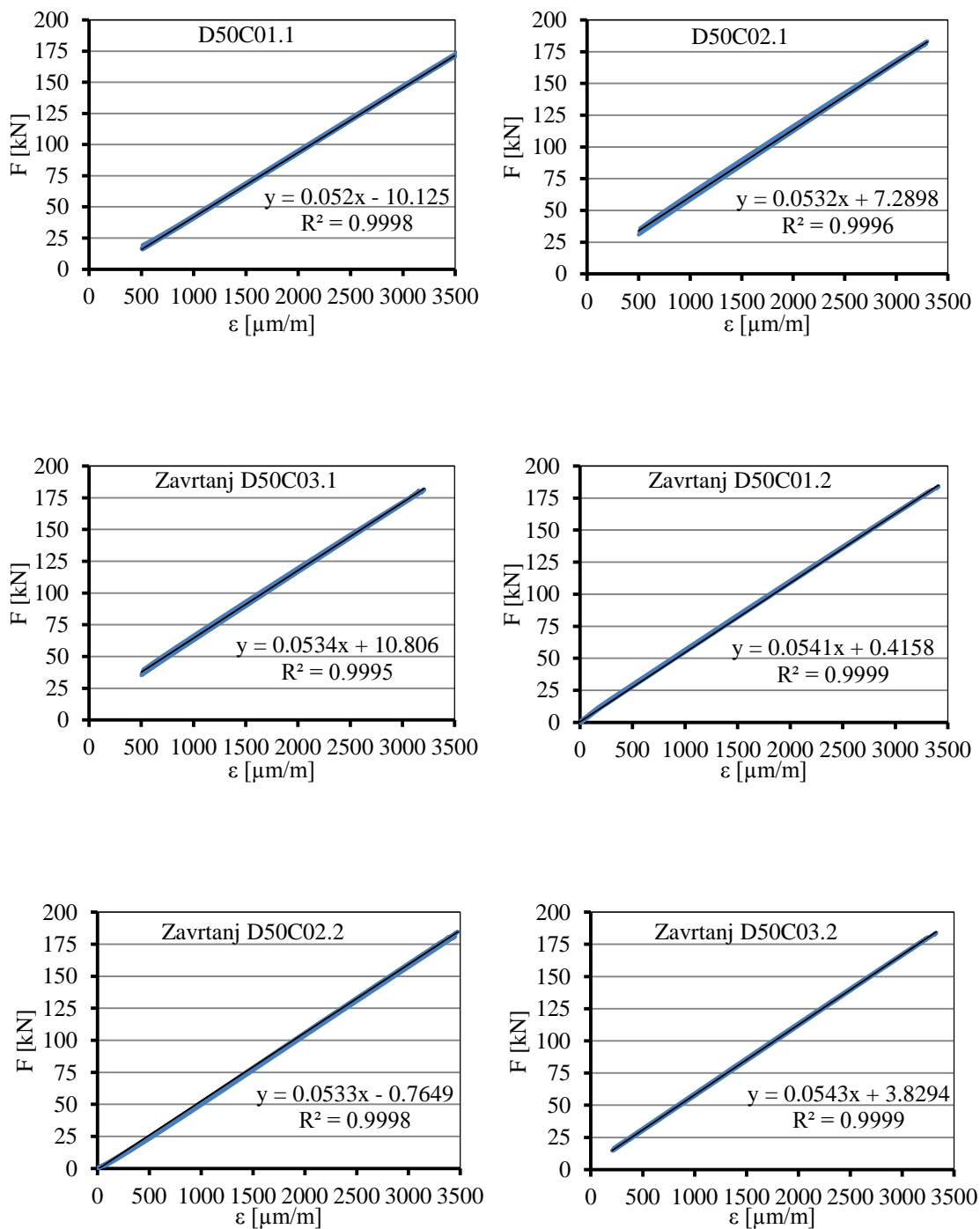


Slika C.10: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorak H9

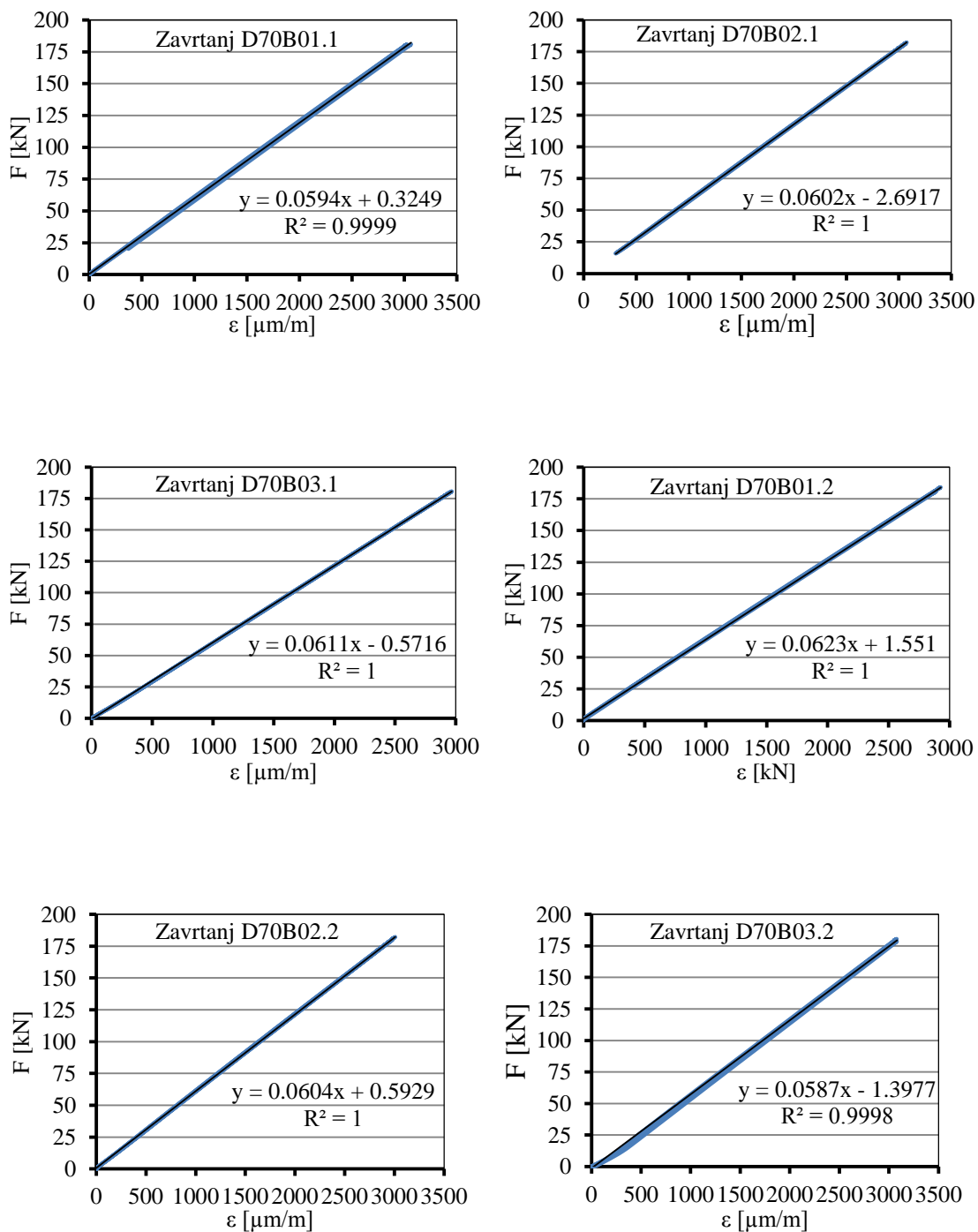
C.3 Kalibracione krive za HV zavrtnjeve – faza II



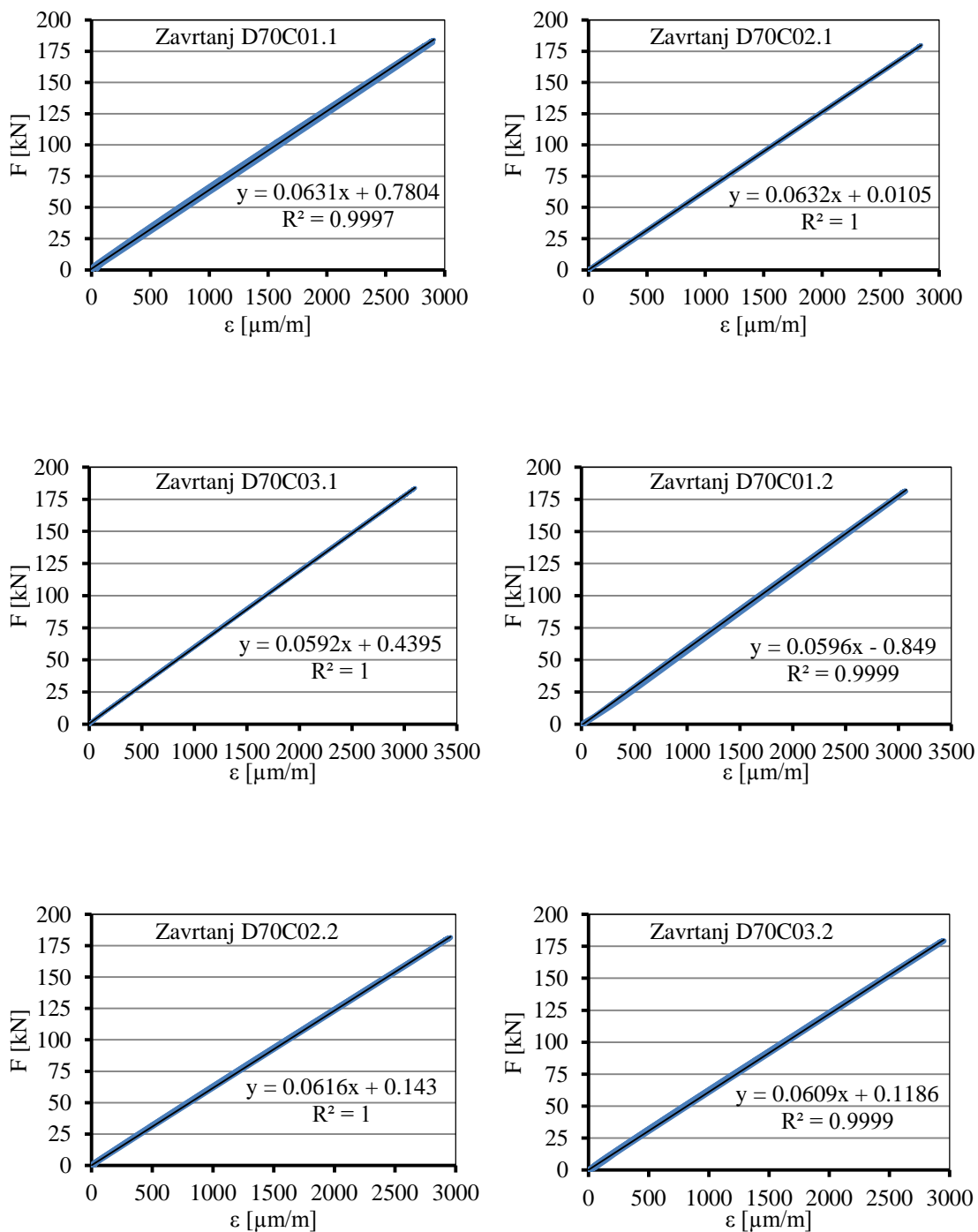
Slika C.11: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D10 i D11



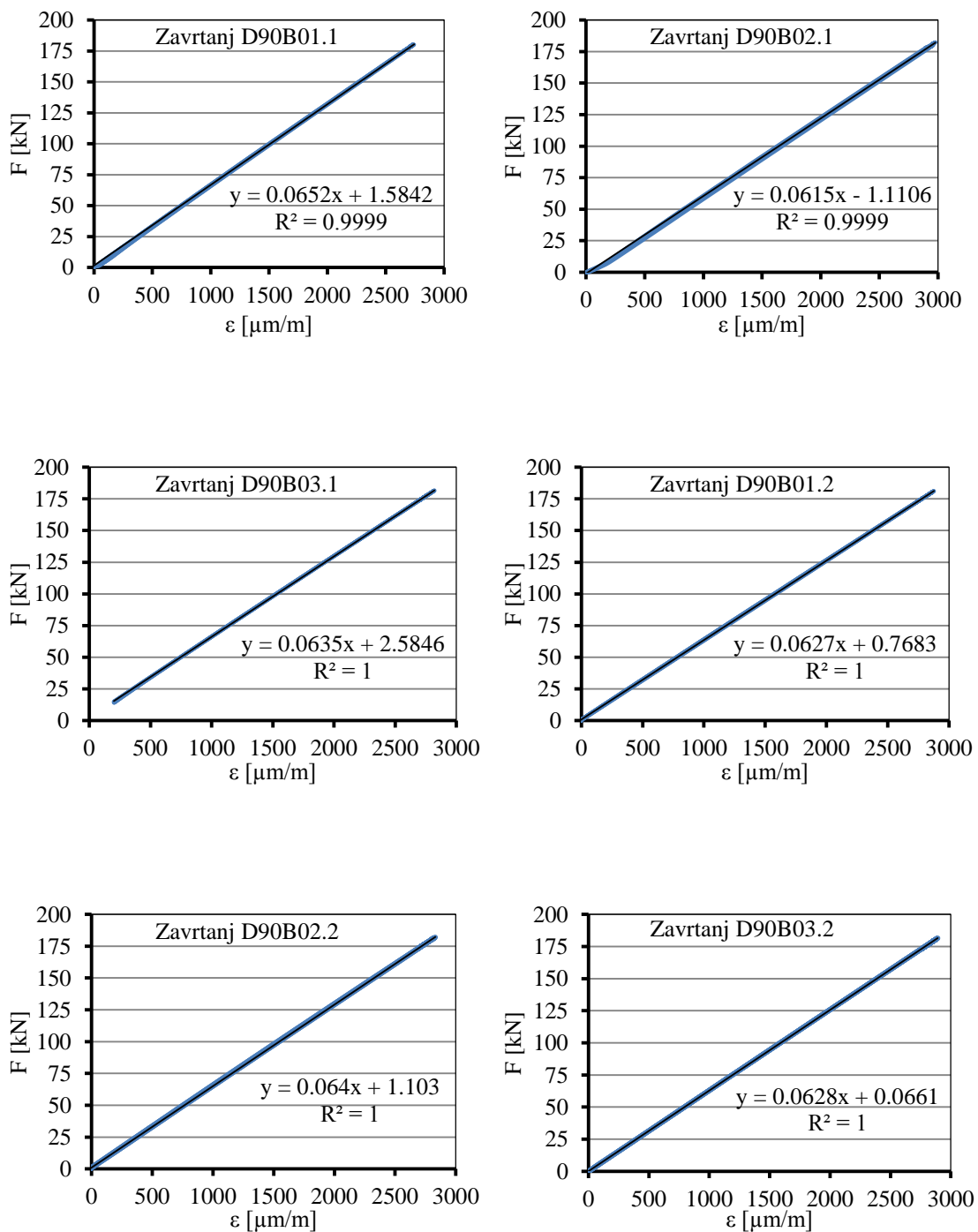
Slika C.12: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D12 i D13



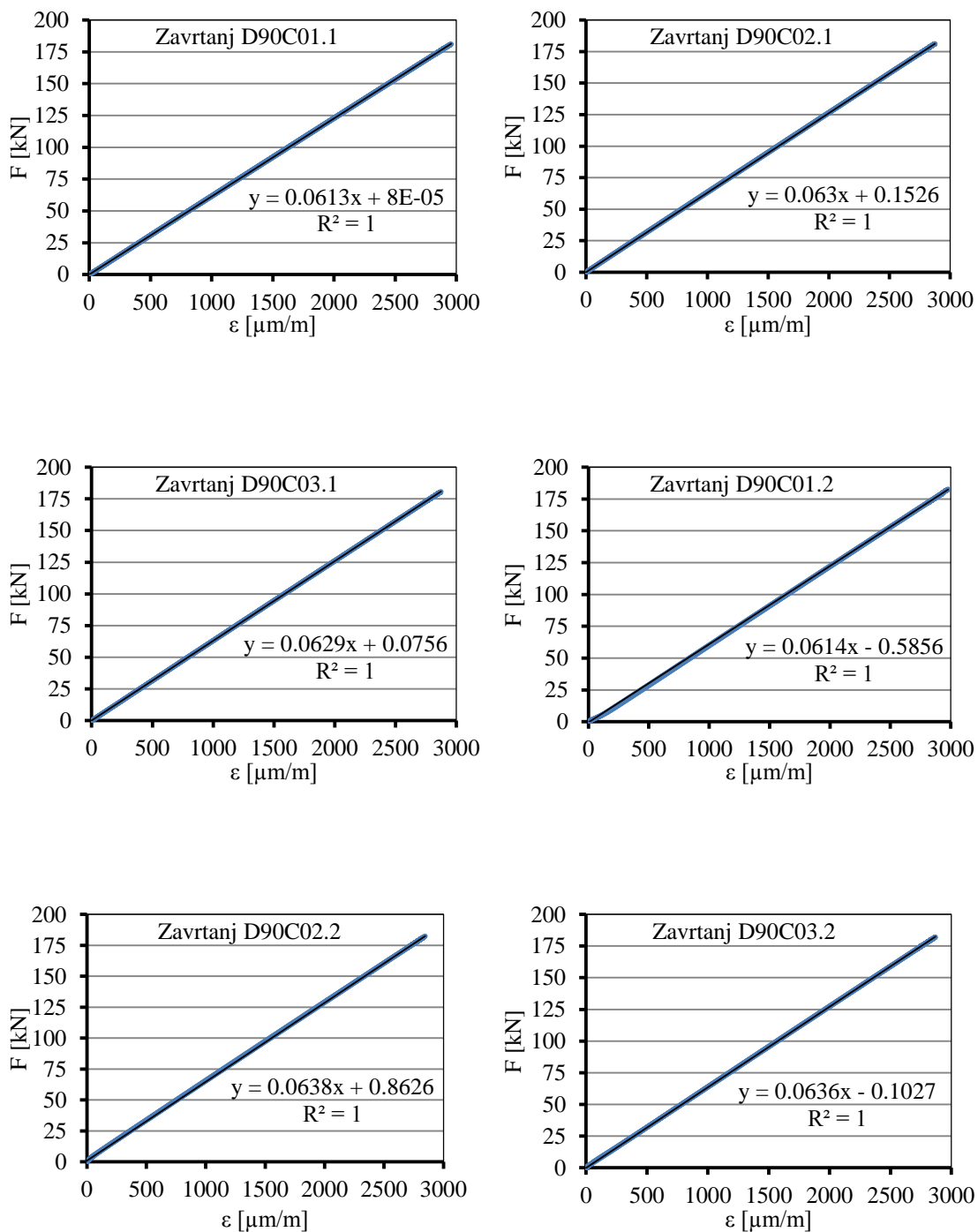
Slika C.13: Kalibracione krive za HV zavrtnejeve ugrađene u uzorke D14 i D15



Slika C.14: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D16 i D17

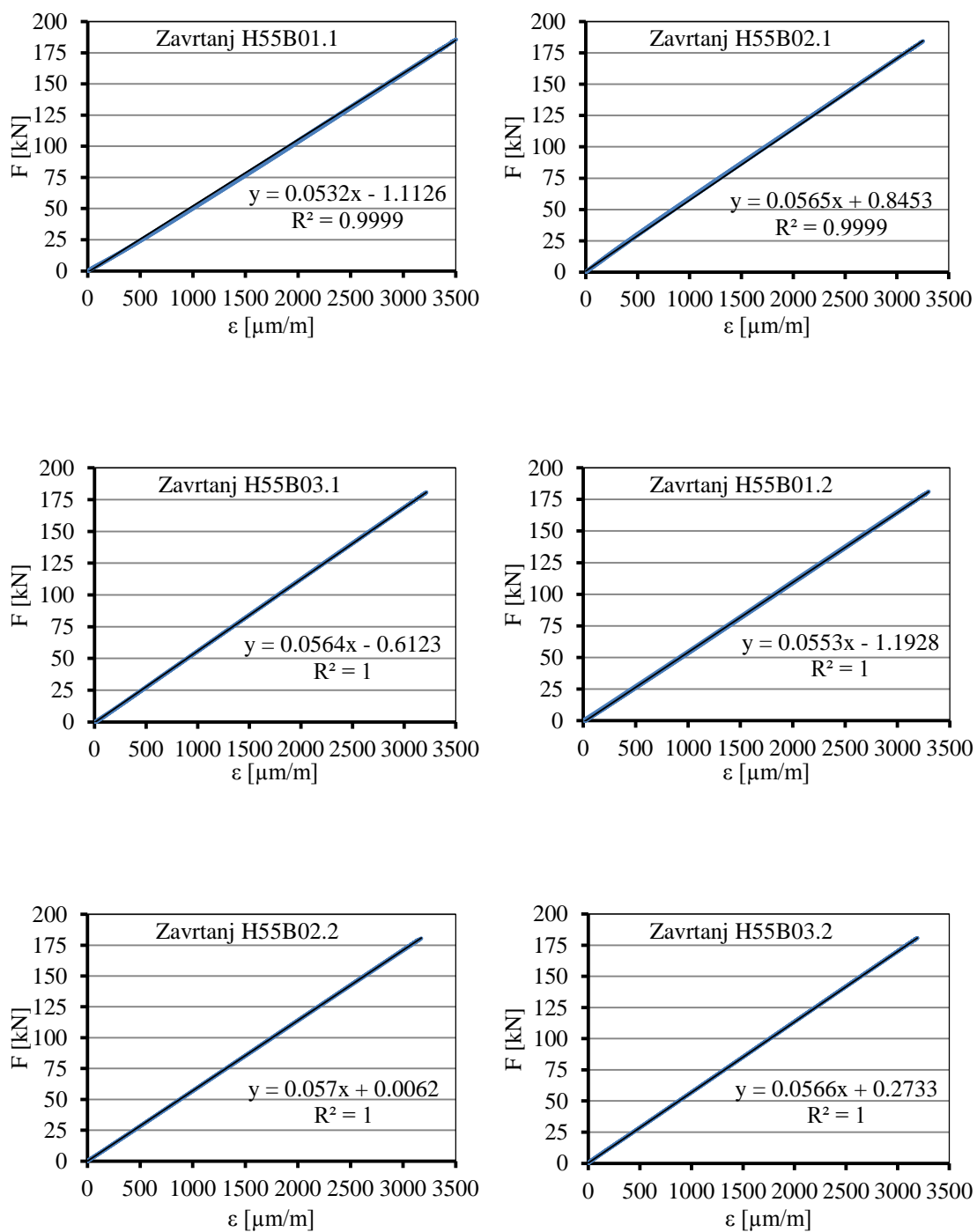


Slika C.15: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D18 i D19

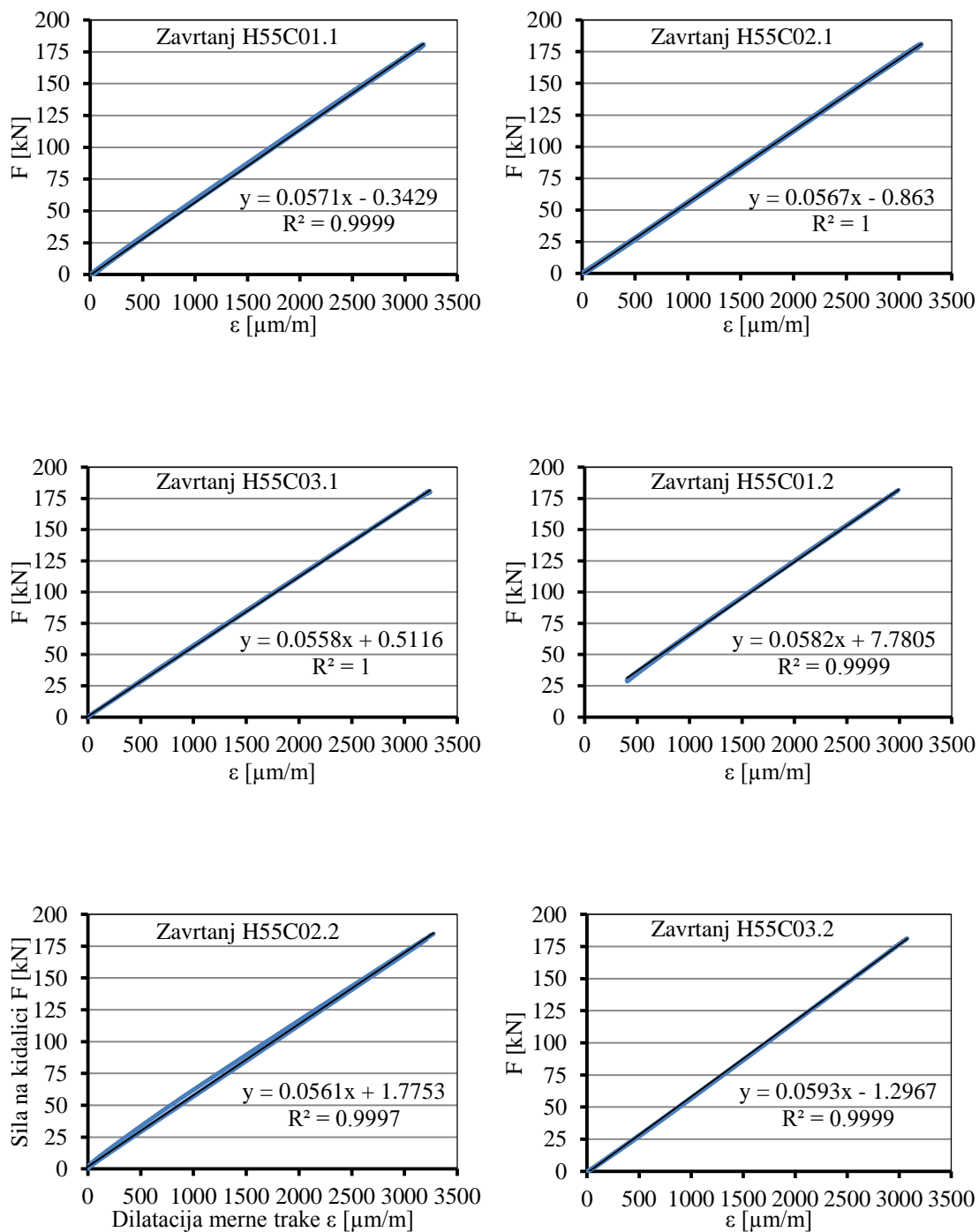


Slika C.16: Kalibracione krive za HV zavrtnjeve ugrađene u uzorke D20 i D21

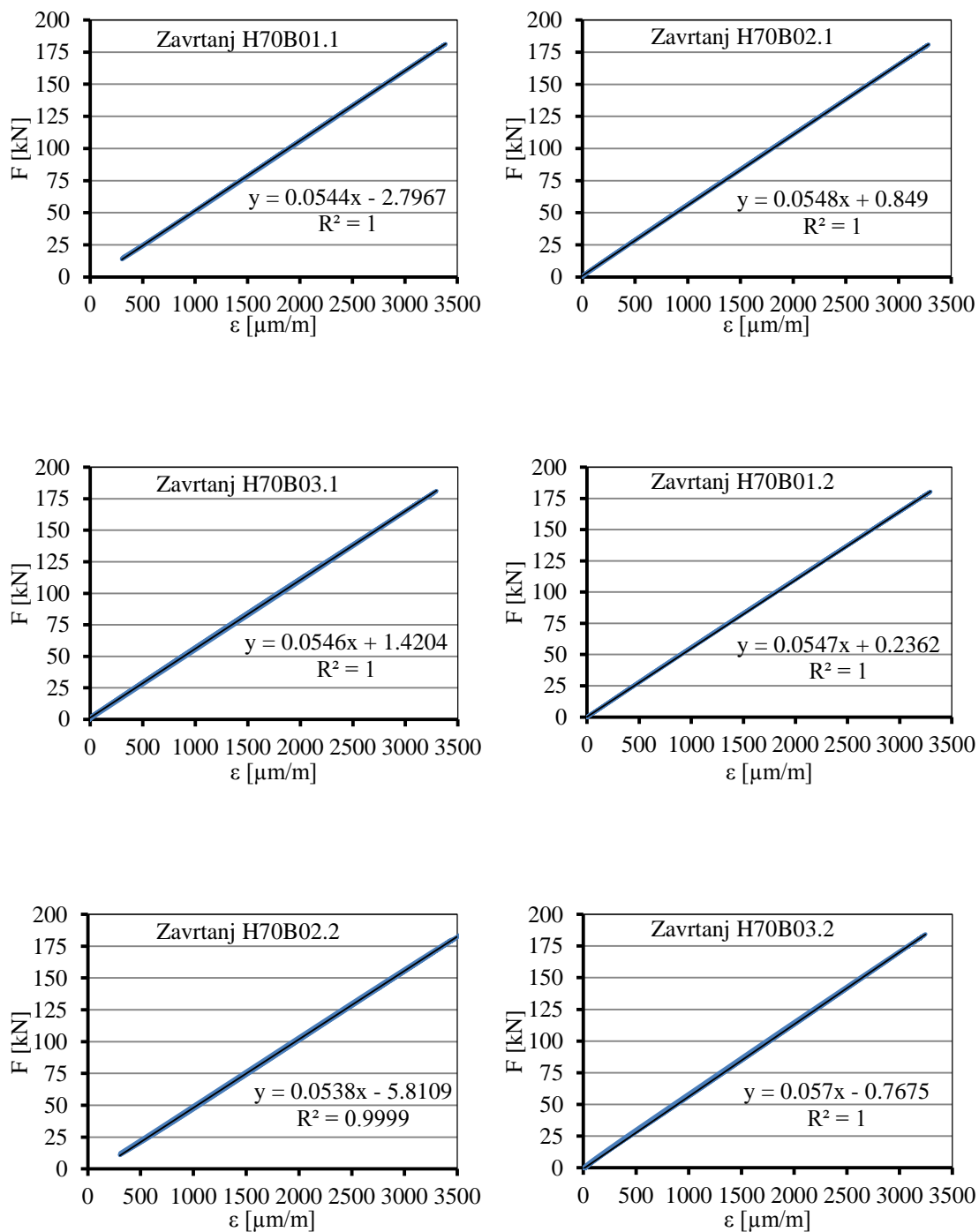
C.4 Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve – faza II



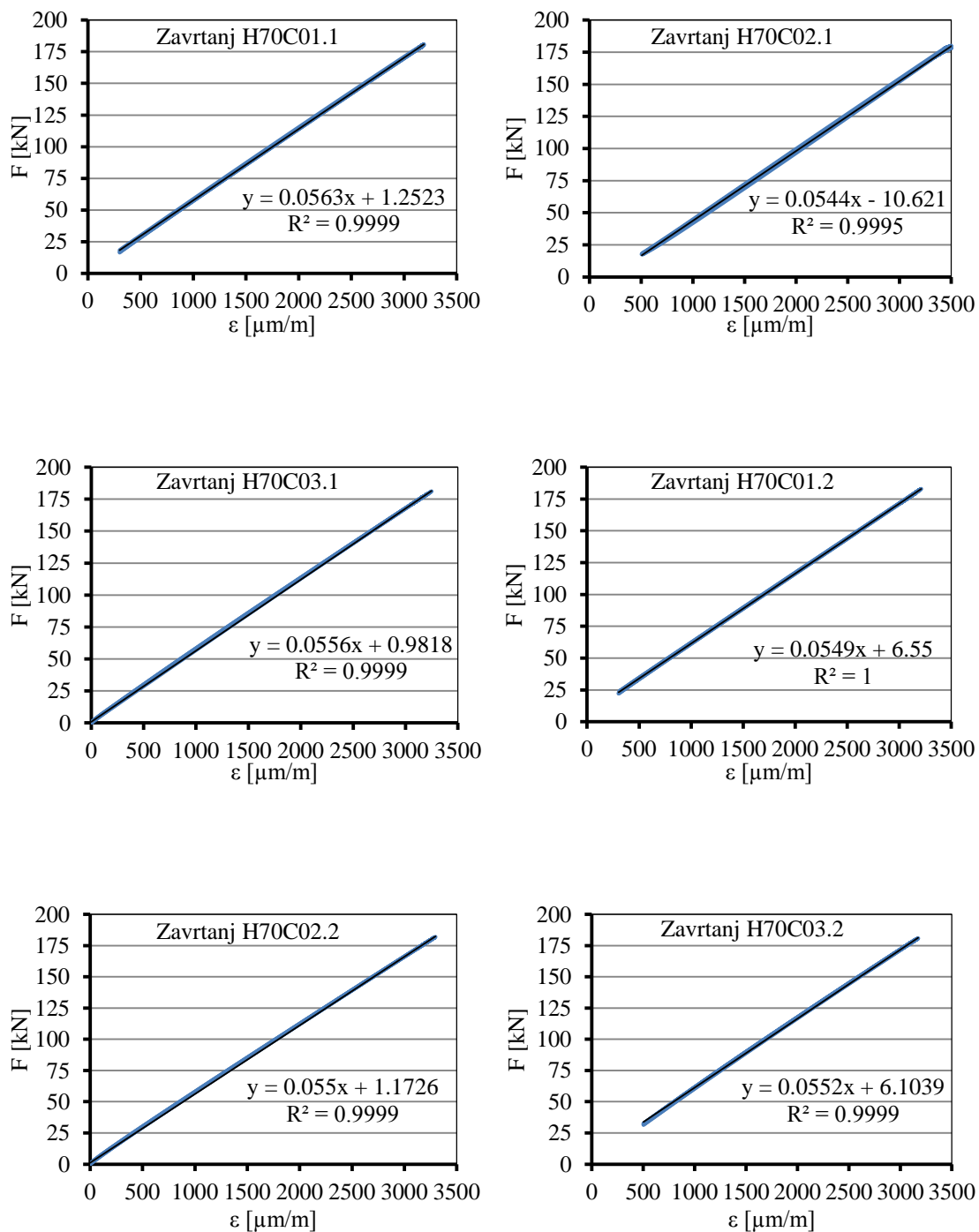
Slika C.17: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H10 i H11



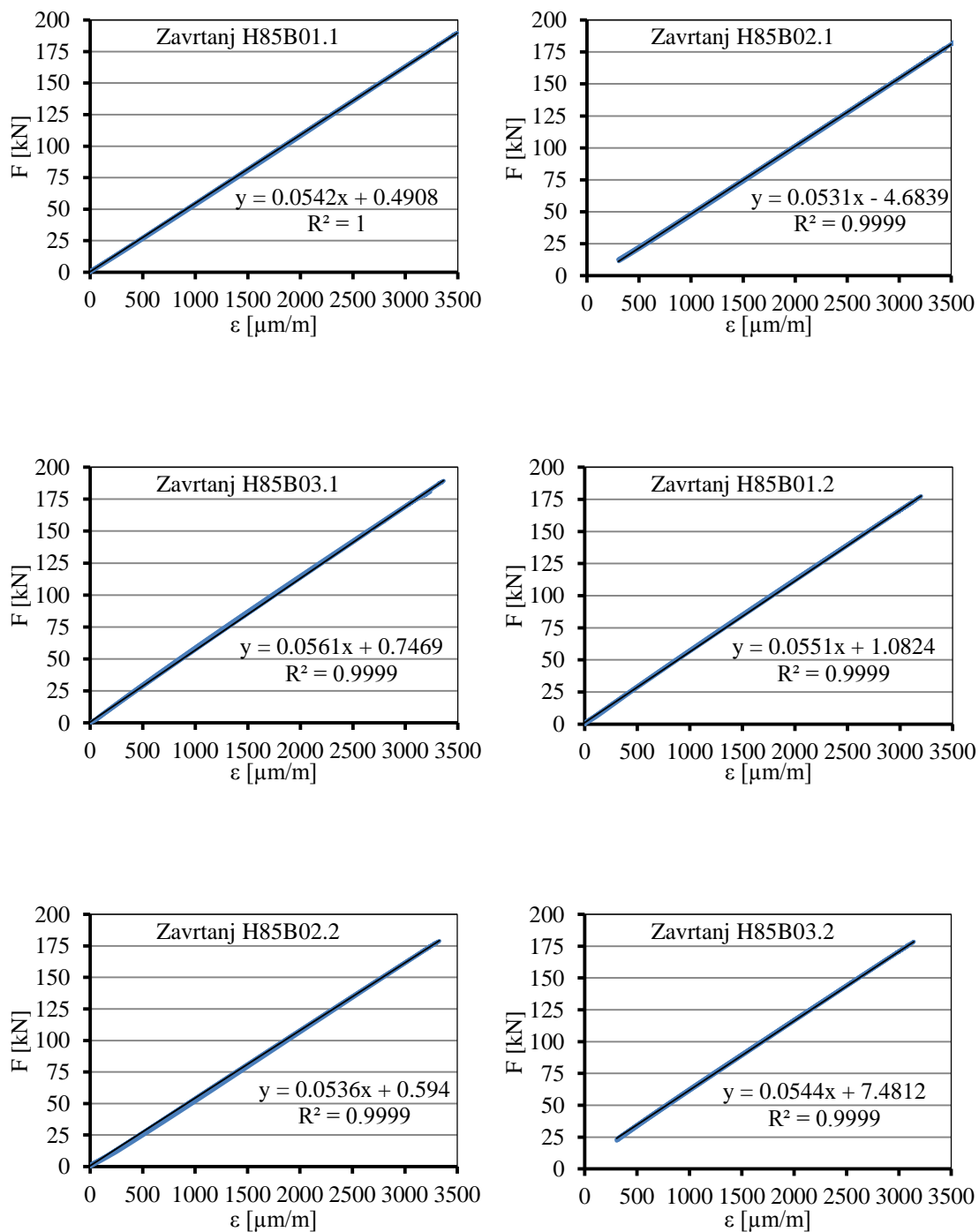
Slika C.18: Kalibracione krive za HBT zavrtnejeve ugrađene u uzorke H12 i H13



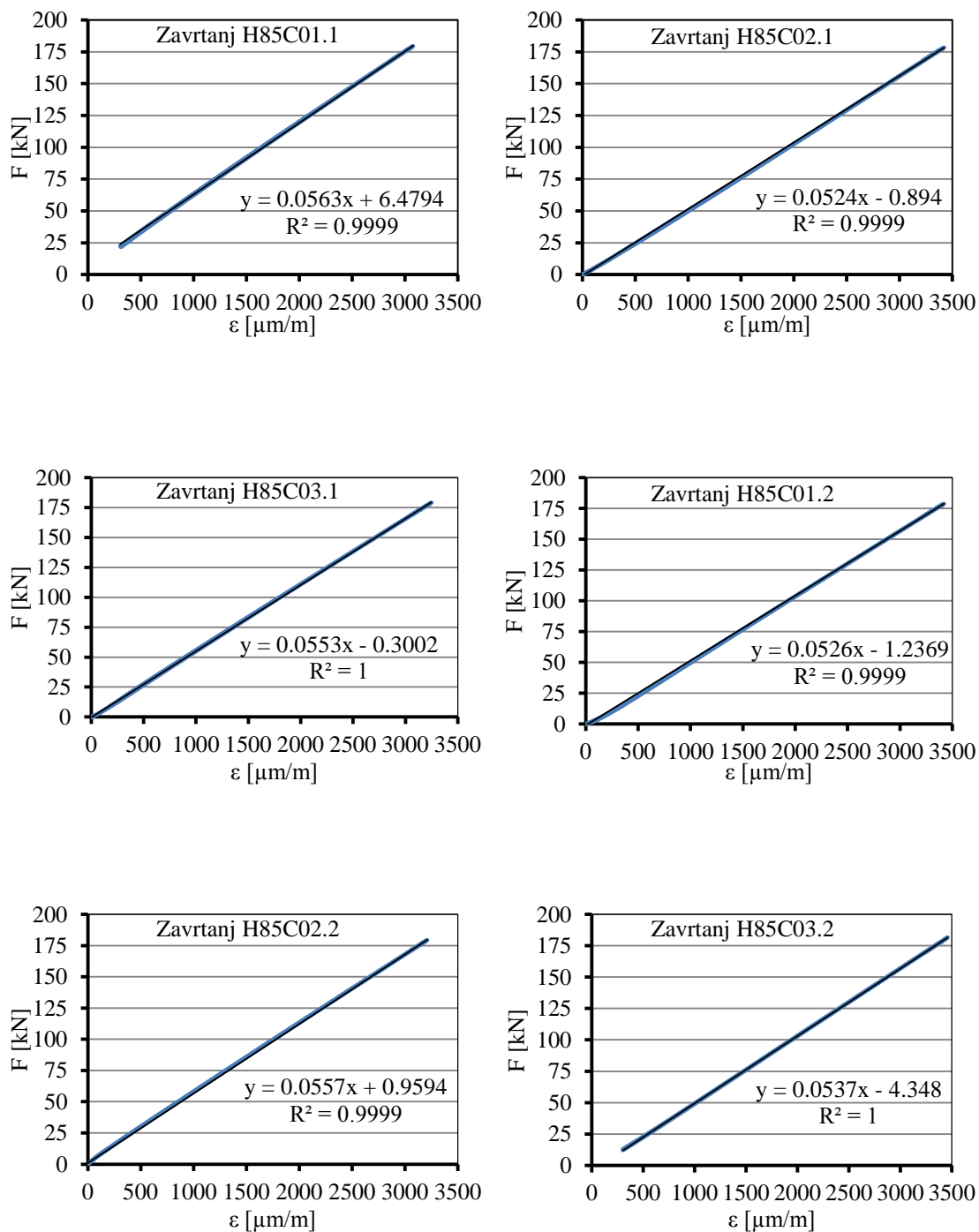
Slika C.19: Kalibracione krive za HBT zavrtanje ugradene u uzorke H14 i H15



Slika C.20: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H16 i H17



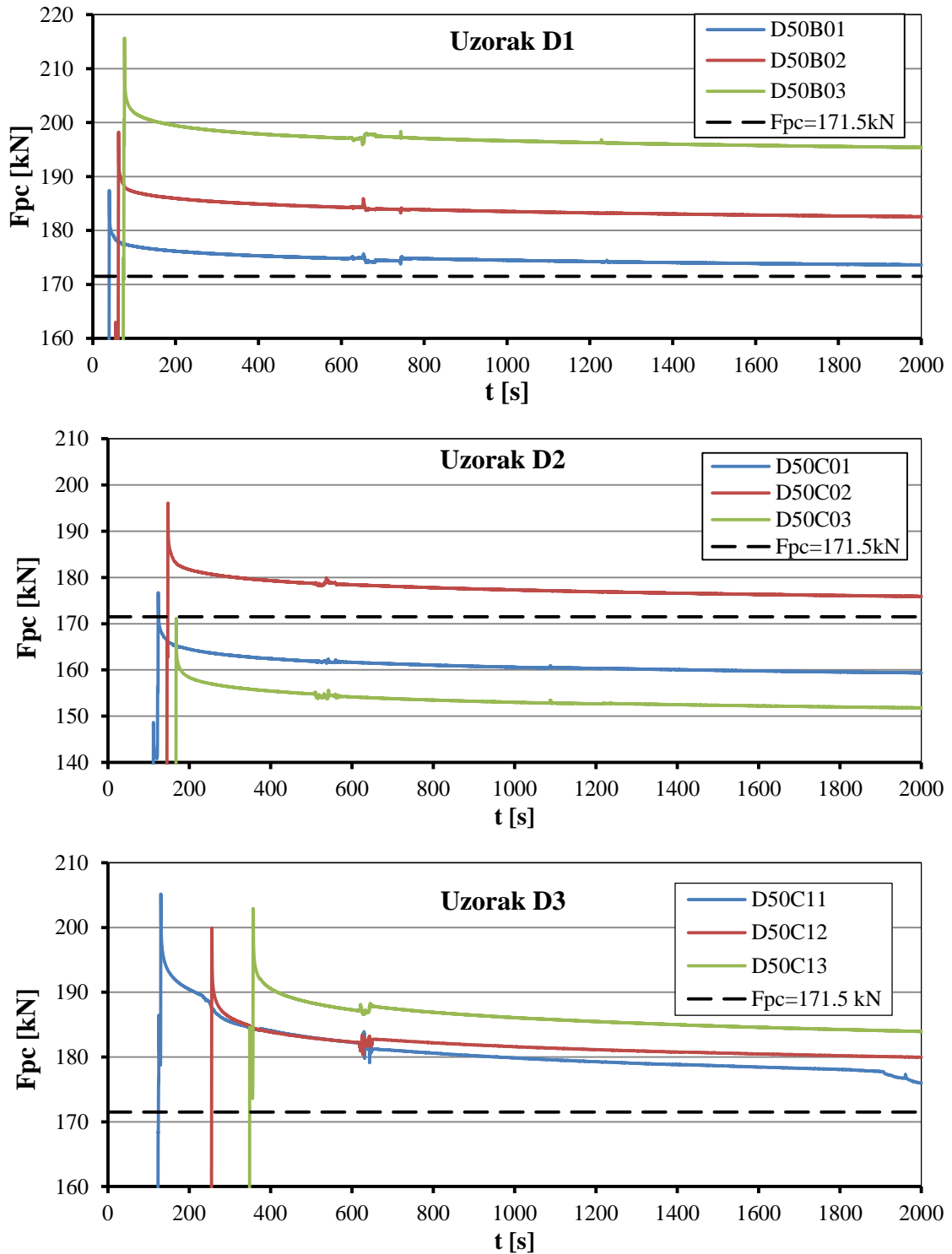
Slika C.21: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H18 i H19



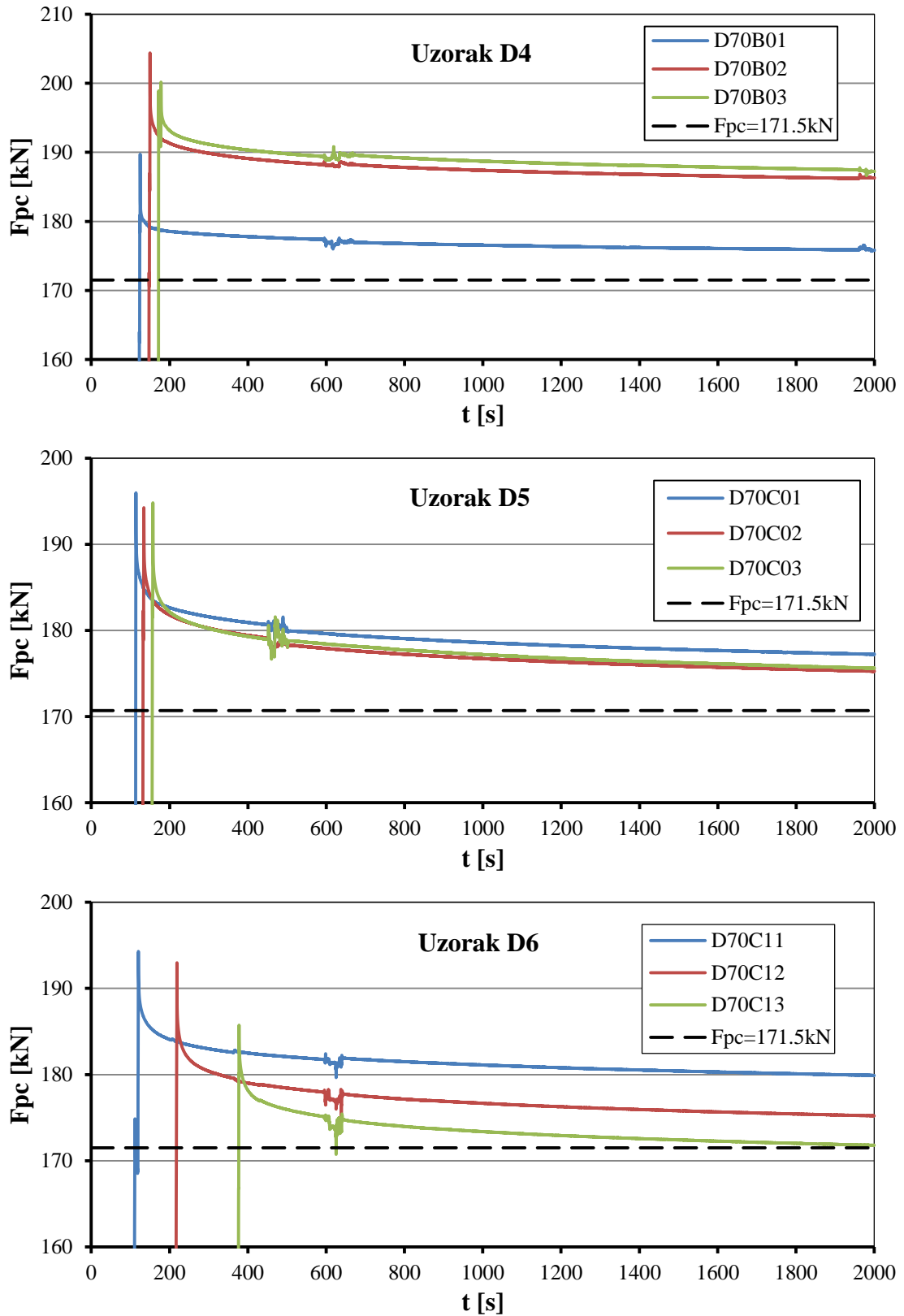
Slika C.22: Kalibracione krive za HBT zavrtnjeve ugrađene u uzorke H20 i H21

PRILOG D – Inicijalni gubici sile prednaprezanja

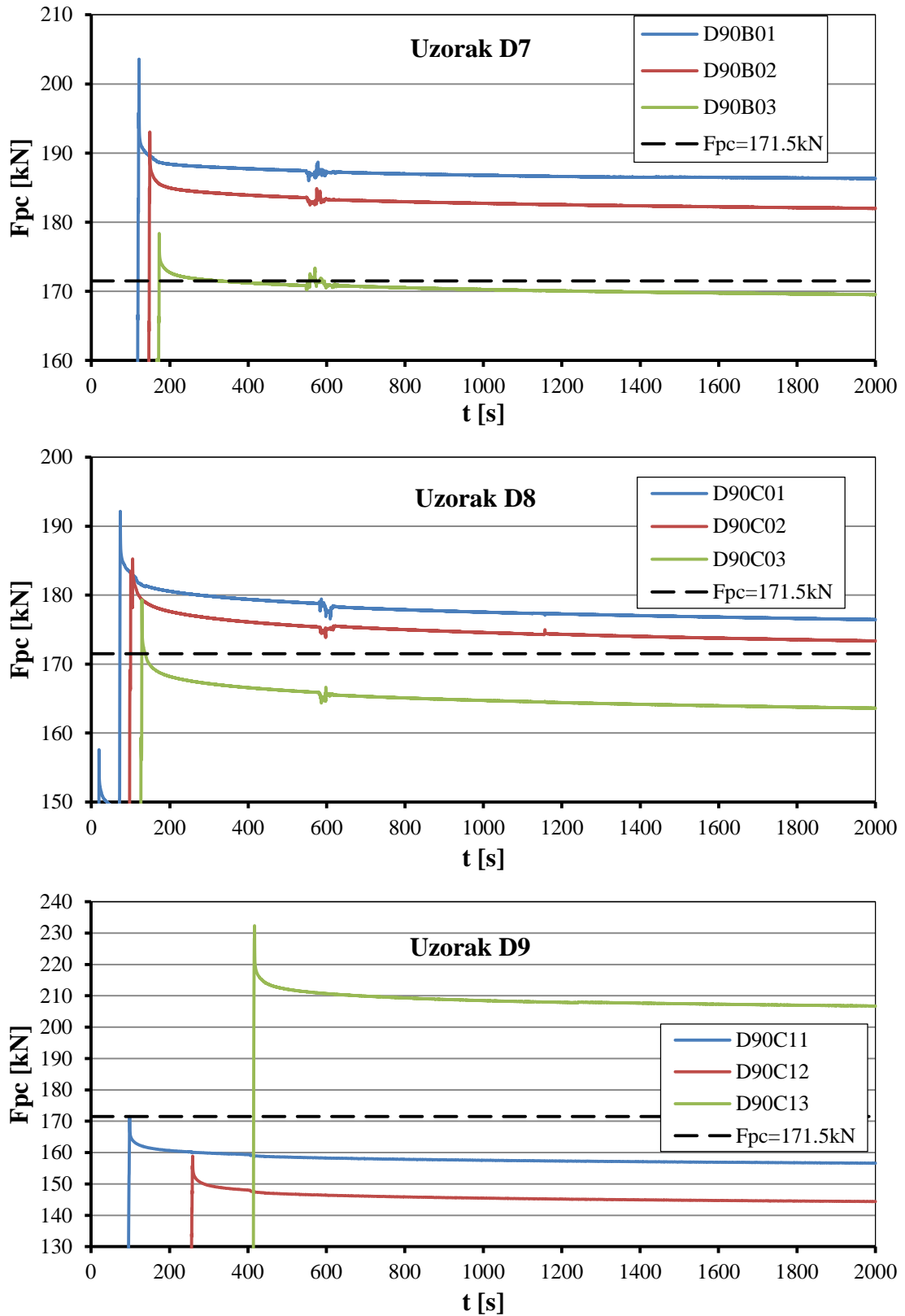
D.1 HV zavrtnjevi - faza I ispitivanja



Slika D.1: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D1, D2 i D3

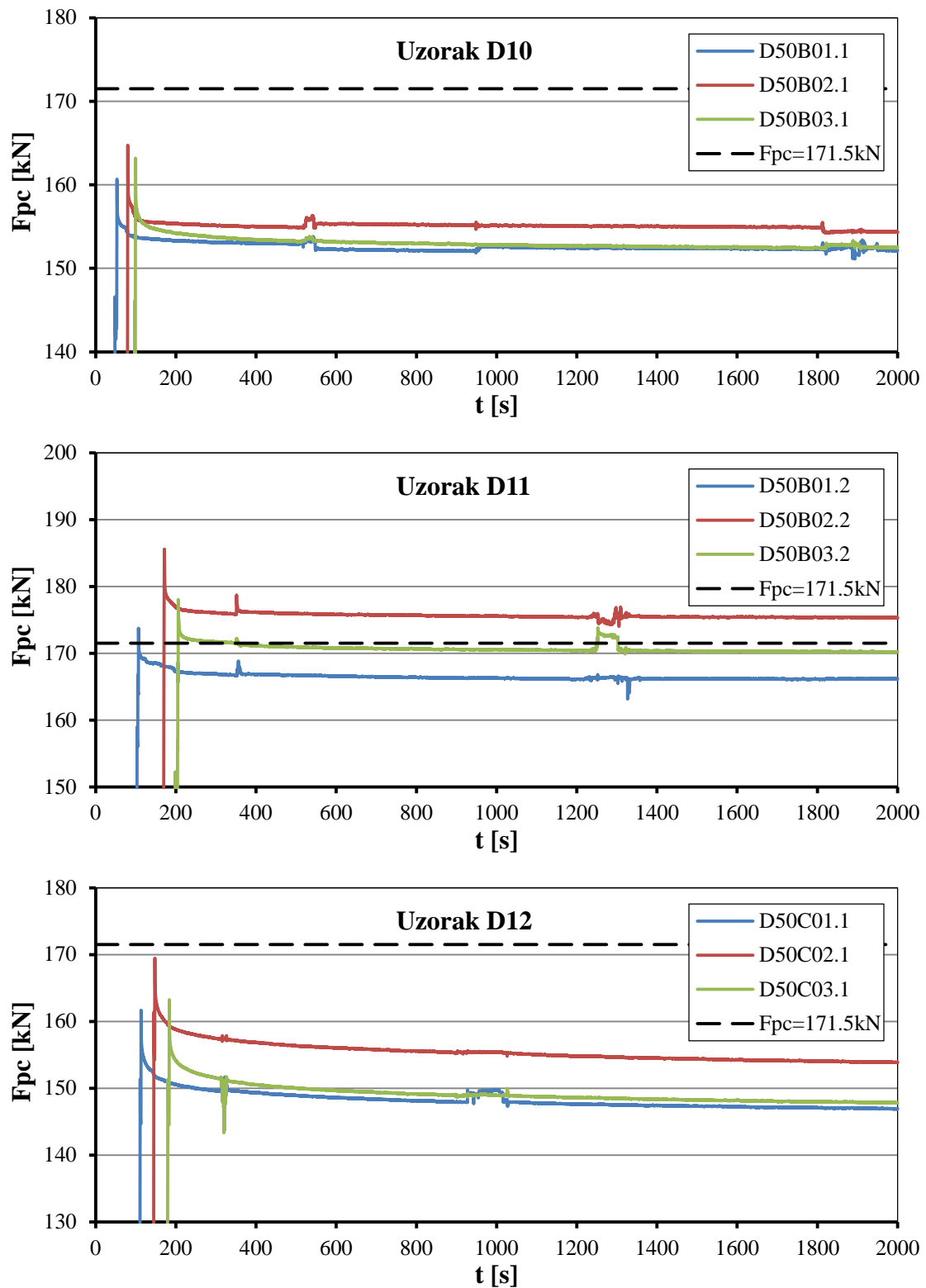


Slika D.2: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D4, D5 i D6

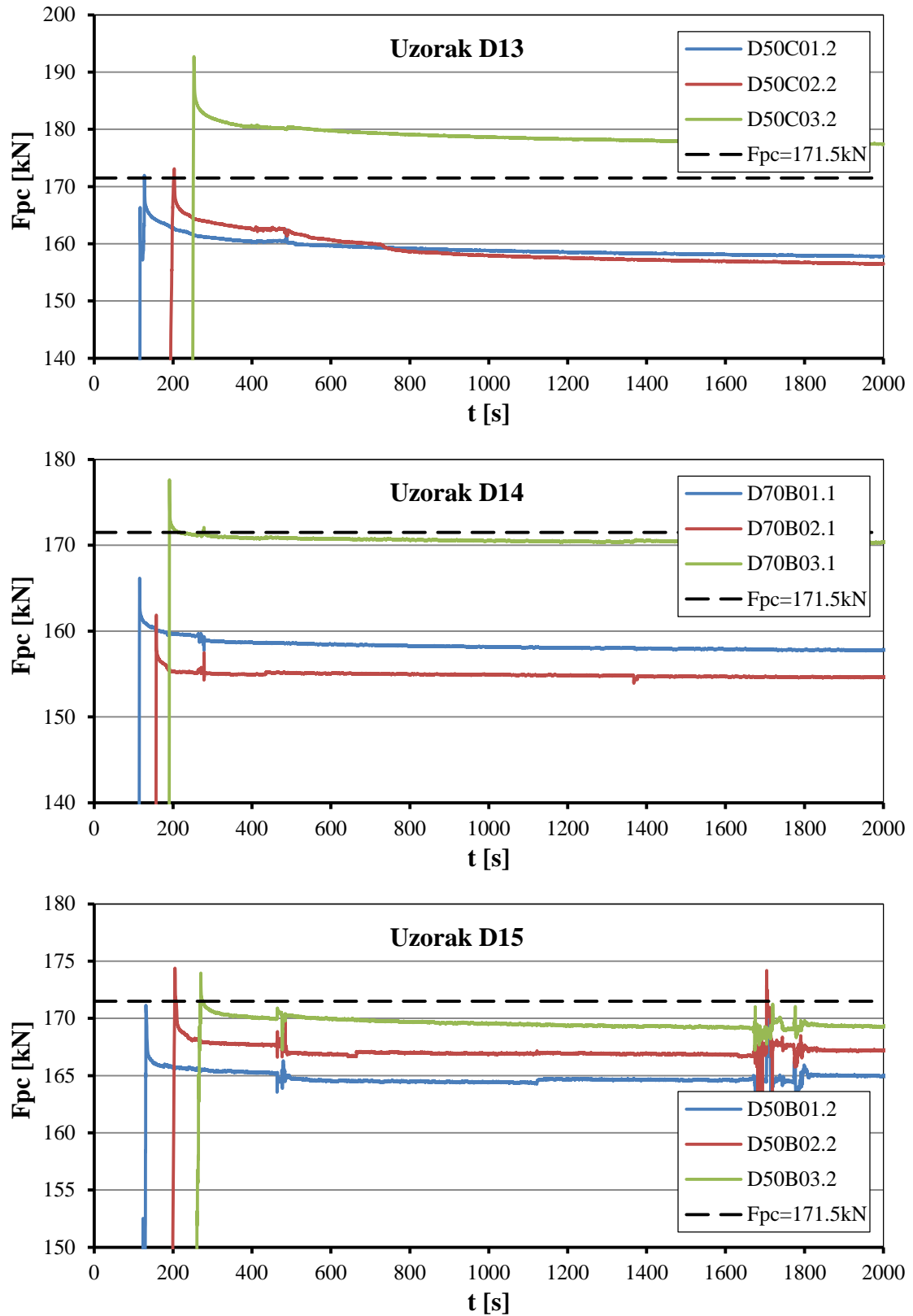


Slika D.3: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D7, D8 i D9

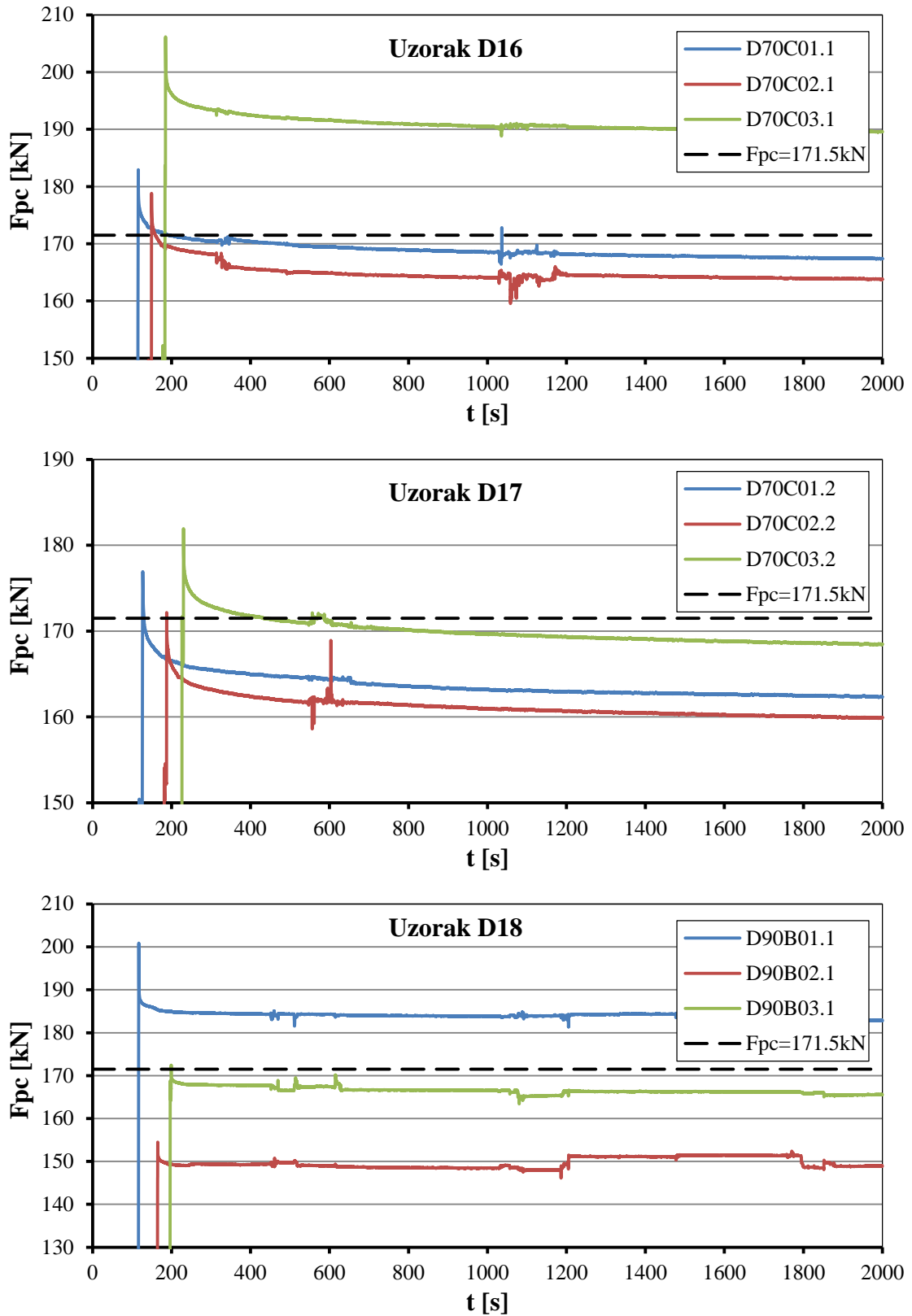
D.2 HV zavrtnjevi - faza II ispitivanja



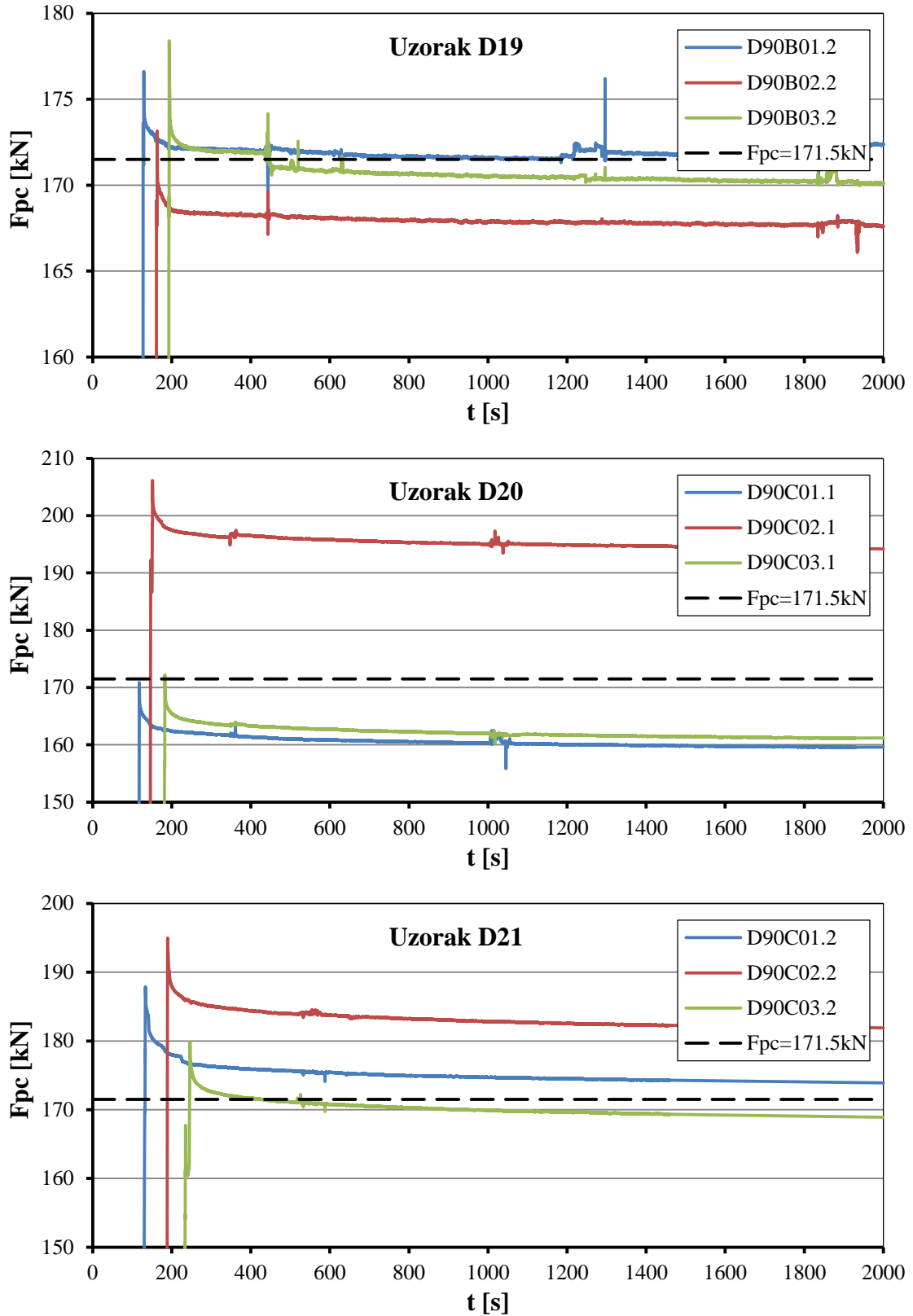
Slika D.4: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D10, D11 i D12



Slika D.5: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D13, D14 i D15

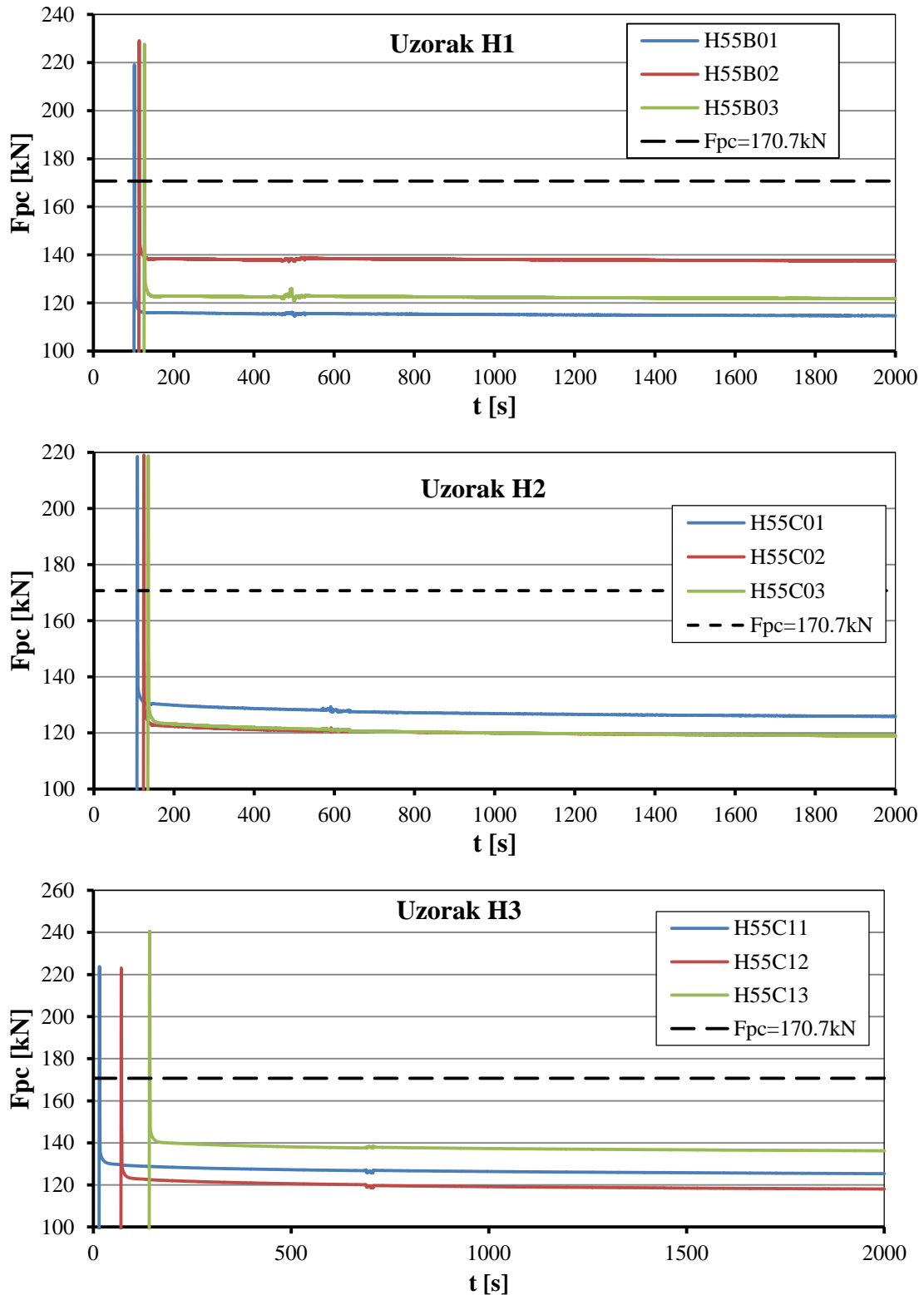


Slika D.6: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D16, D17 i D18

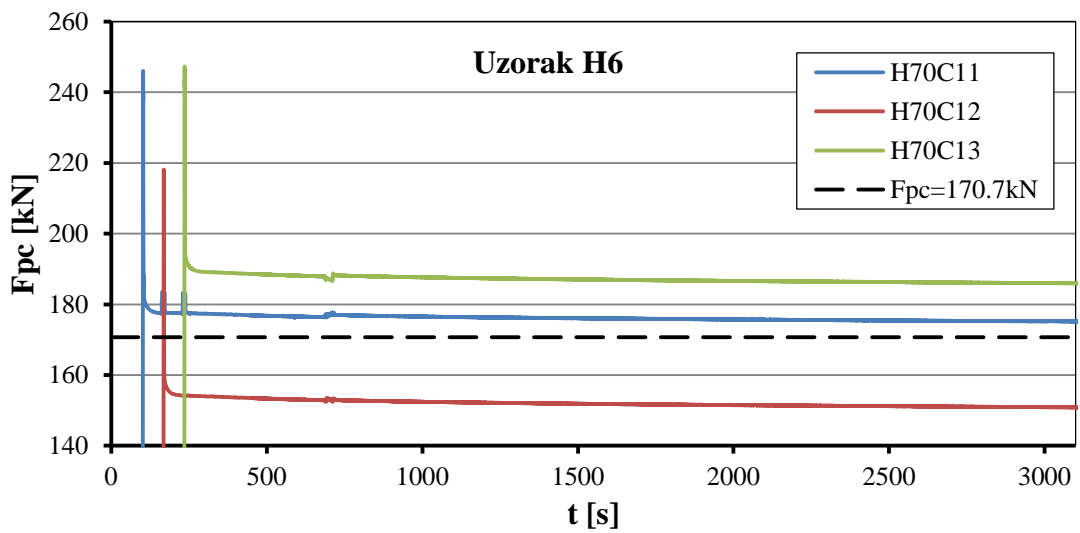
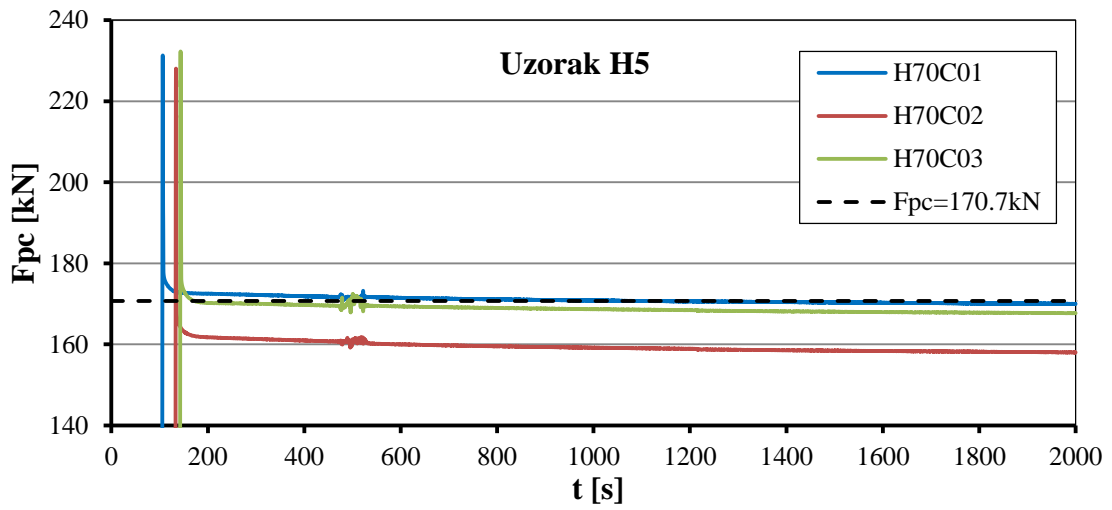
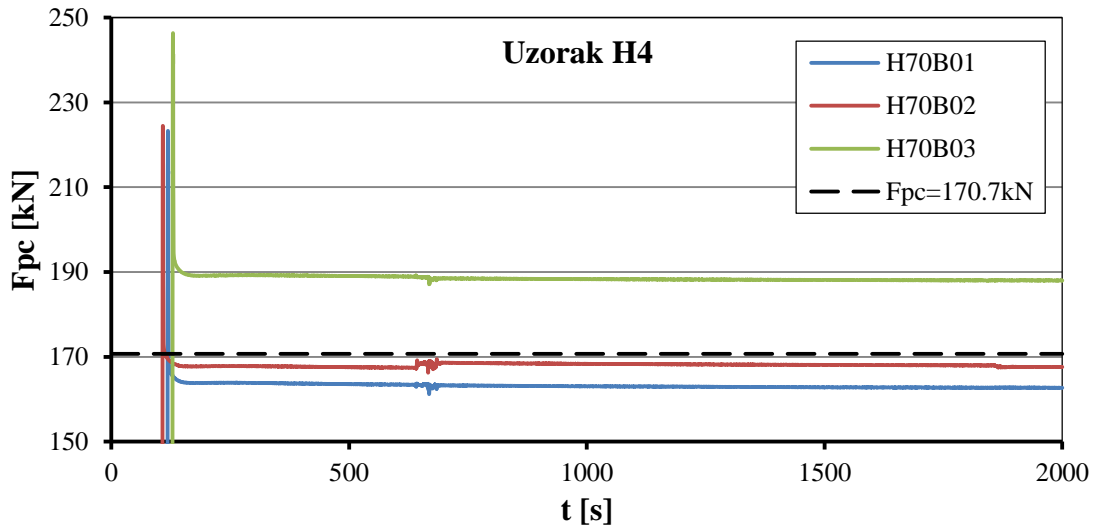


Slika D.7: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima D19, D20 i D21

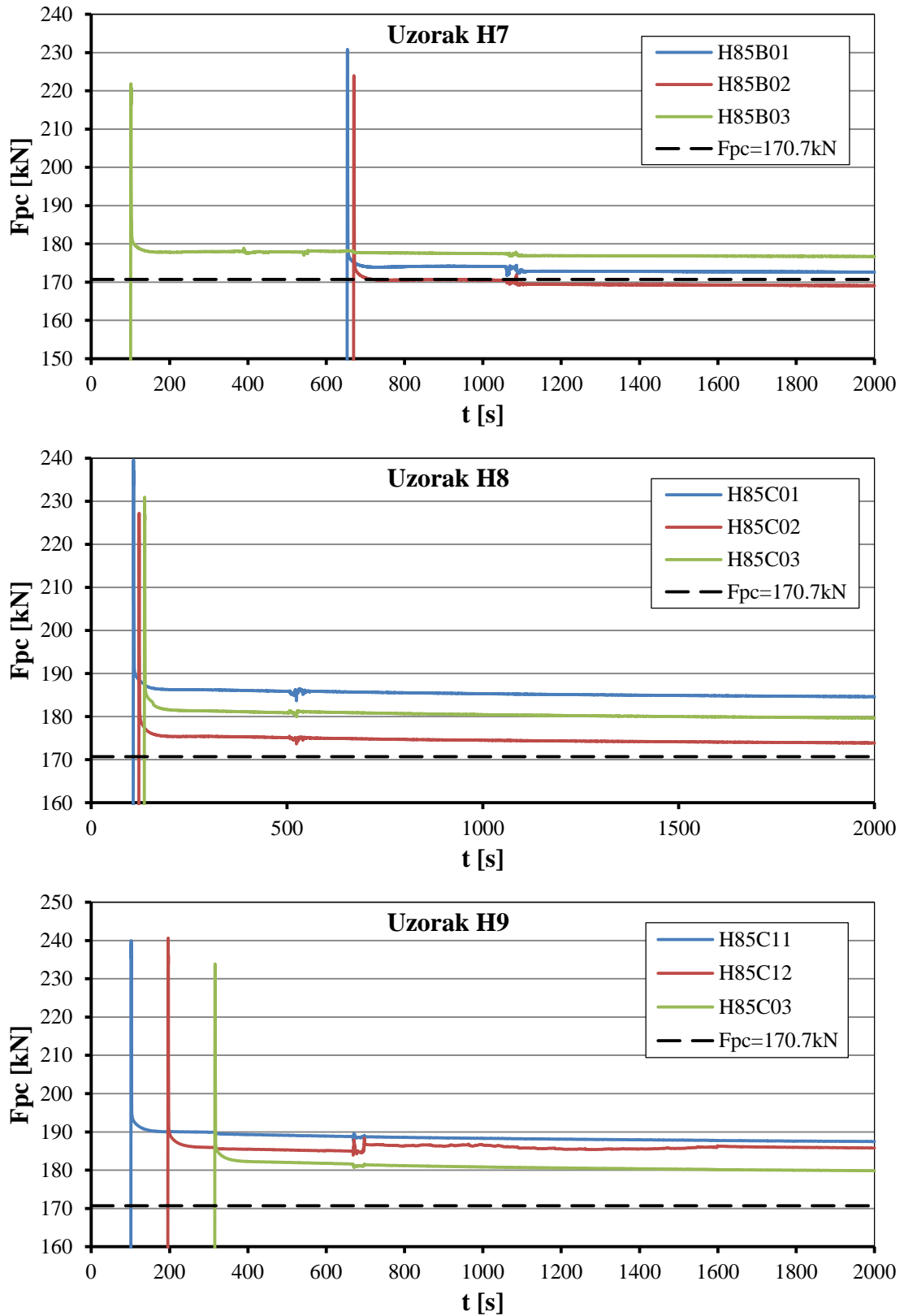
D.3 HBT zavrtnjevi - faza I ispitivanja



Slika D.8: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H1, H2 i H3

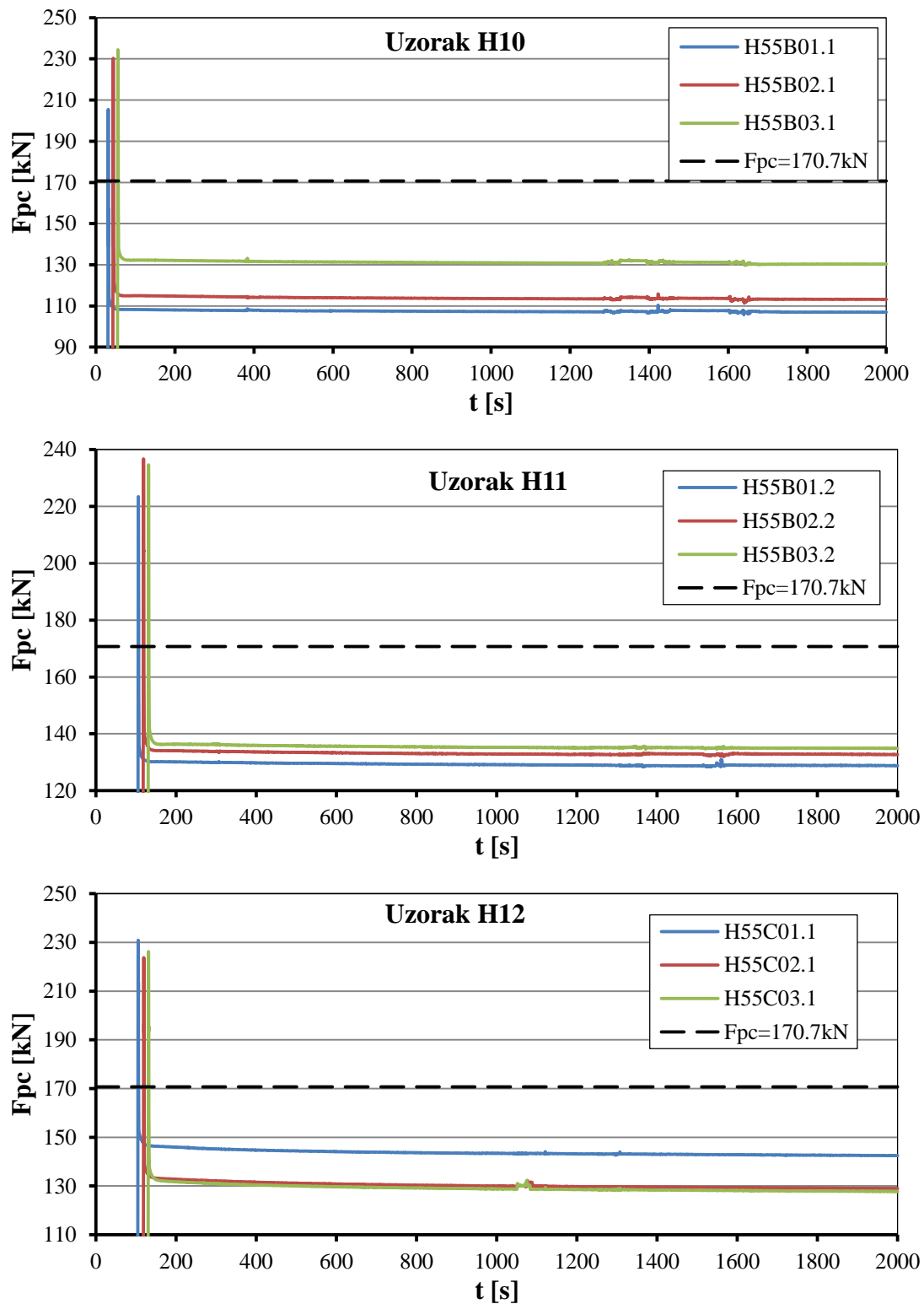


Slika D.9: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H4, H5 i H6

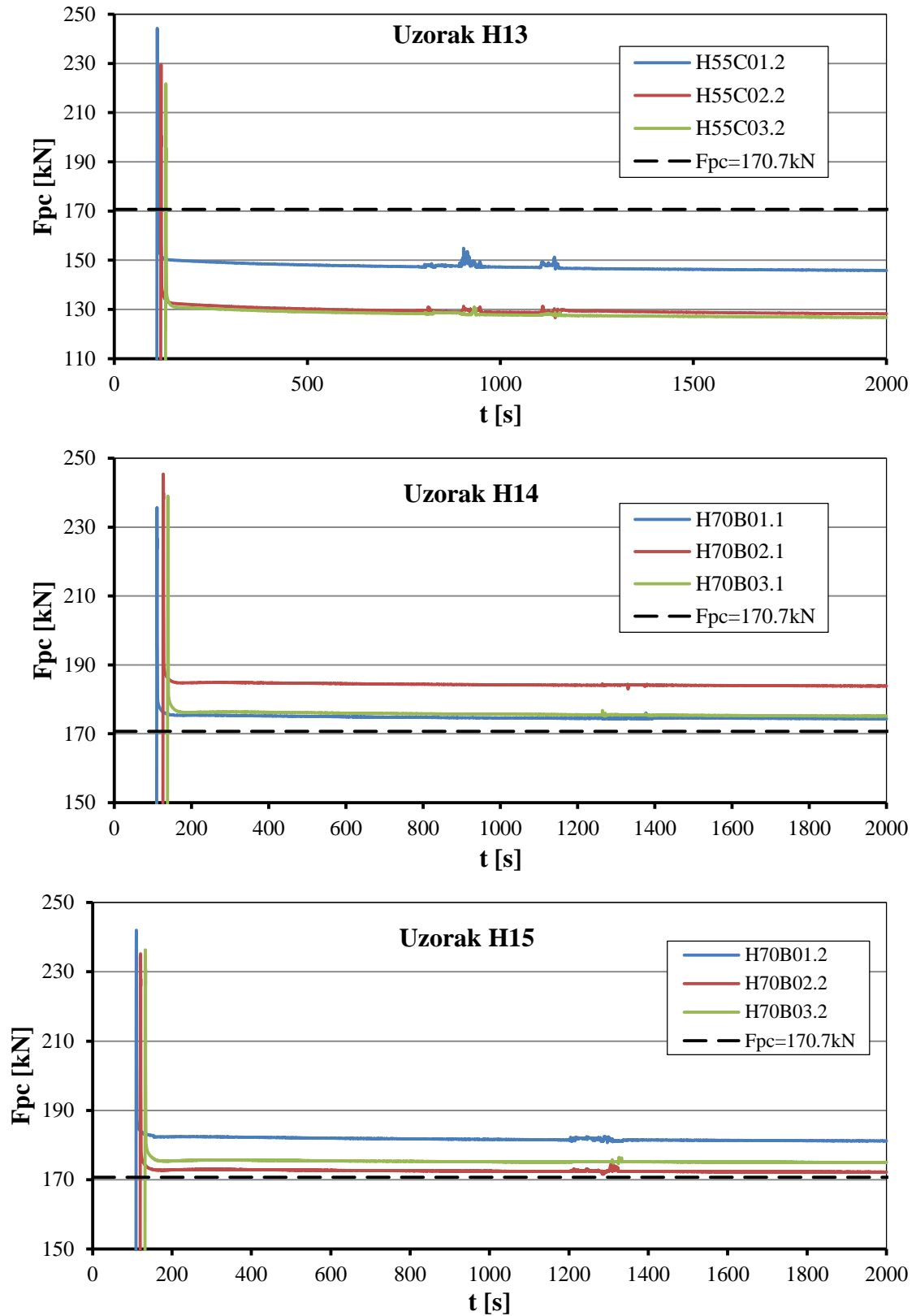


Slika D.10: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H7, H8 i H9

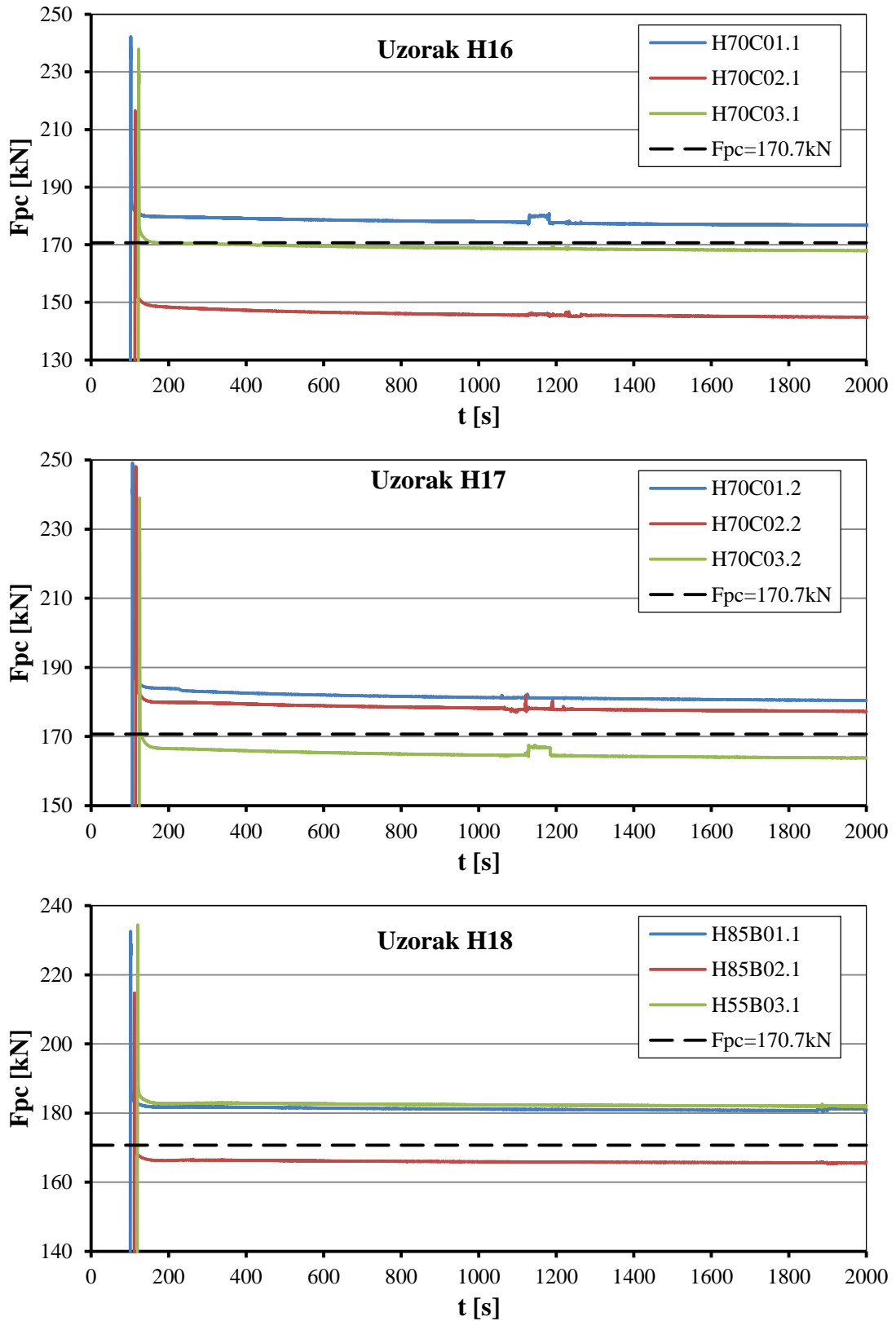
D.4 HBT zavrtnjevi - faza II ispitivanja



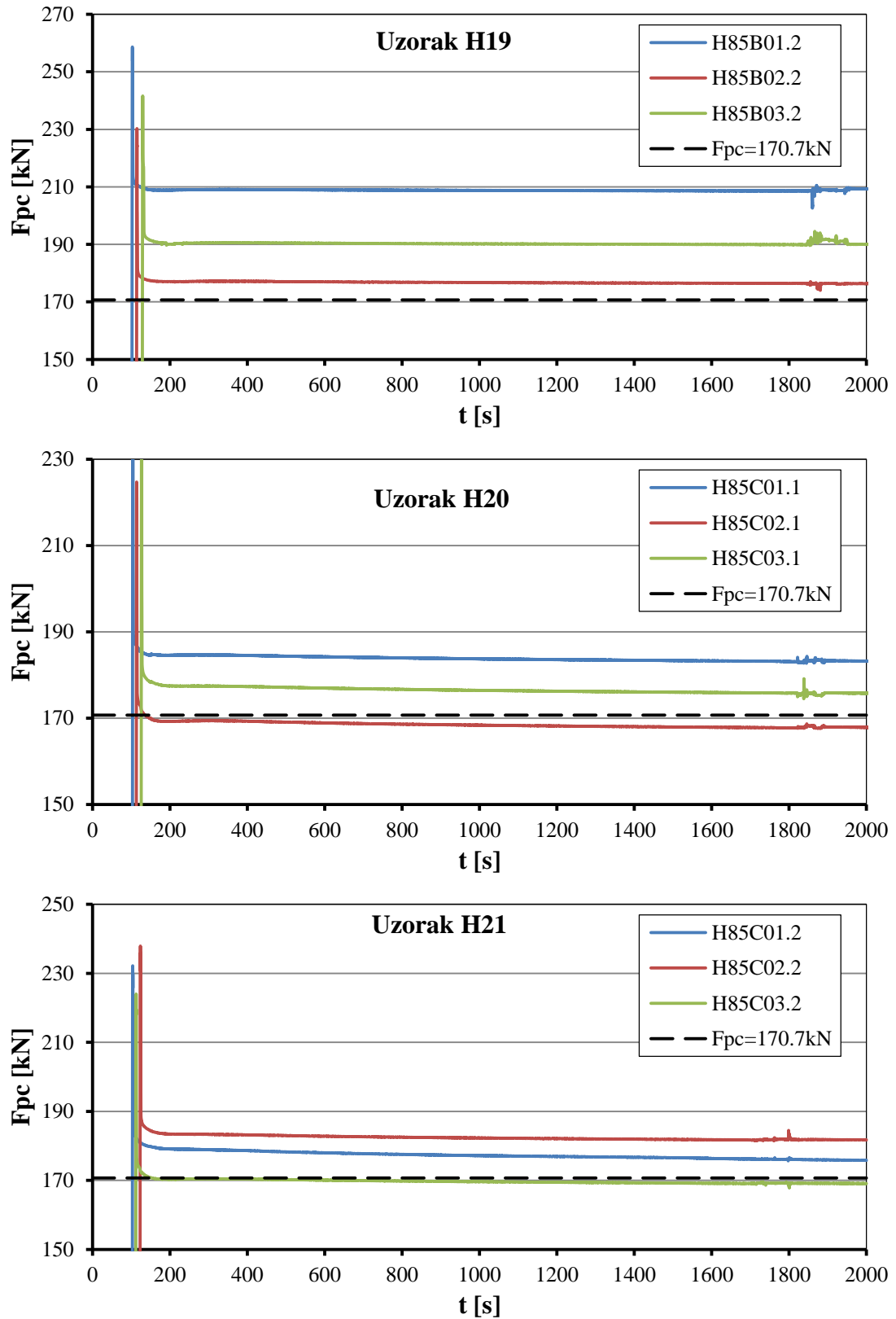
Slika D.11: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H10, H11 i H12



Slika D.12: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H13, H14 i H15



Slika D.13: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H16, H17 i H18



Slika D.14: Inicijalni gubici sile prednaprezanja u uzorcima H19, H20 i H21

BIOGRAFIJA AUTORA

Nenad Fric rođen je 28.07.1979. godine u Zrenjaninu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je 1998. godine i na njemu diplomirao 2004. godine, odbranivši diplomski rad iz oblasti metalnih konstrukcija sa ocenom 10. Studije je završio sa ukupnom prosečnom ocenom 8,79.

Nakon diplomiranja zapošljava se u preduzeću „*Montena d.o.o.*“ iz Beograda u kojem radi kao inženjer projektant metalnih konstrukcija do oktobra 2006. godine. Oktobra 2006. godine počinje njegov angažman na Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Beogradu kao inženjera saradnika. U novembru 2007. godine Nenad Fric upisuje se na doktorske studije nakon čega je u decembru iste godine na Građevinskom fakultetu izabran za asistenta za užu naučnu oblast Metalne konstrukcije. Rad u nastavi na Građevinskom fakultetu podrazumeva vođenje vežbi i organizovanje praktične nastave iz predmeta Tehnologija proizvodnje metalnih konstrukcija, Metalne konstrukcije i Metalne i drvene konstrukcije. Takođe, učestvuje u nastavi iz još pet predmeta iz oblasti Metalnih konstrukcija kao i u mentorskom radu na izradi diplomskih, sinteznih i master radova.

U svom dosadašnjem naučno-istraživačkom radu Nenad Fric se bavio problemima stabilnosti i nosivosti metalnih konstrukcija, a pre svega nosivosti veza. Učestvuje u naučno-istraživačkom projektu „*Istraživanje stanja i metoda unapređenja građevinskih konstrukcija sa aspekta upotrebljivosti, nosivosti ekonomičnosti i održavanja*“. Koautor je više naučnih i stručnih radova iz oblasti metalnih konstrukcija koji su objavljeni u časopisima, stručnim publikacijama, na kongresima i simpozijumima u zemlji i inostranstvu.

Pored nastavno-naučnog, Nenad Fric se aktivno bavi i stručnim radom. Kao projektant učestvovao je u izradi nekoliko desetina idejnih rešenja, idejnih projekata, glavnih projekata i stručnih mišljenja za objekte kao što su: antenski stubovi, sportski objekti, objekti javne namene, industrijske hale, tržni centri i drumski mostovi od kojih je većina izvedena u zemlji i inostranstvu.

Oženjen je i otac jednog deteta.

Прилог 1:

Изјава о ауторству

Потписани: Ненад Фриц дипл. грађ. инж.

Број индекса: 904/07

Изјављујем

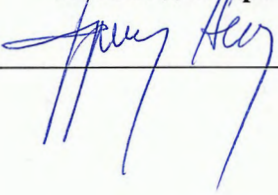
да је докторска дисертација под насловом:

**„ТЕОРИЈСКО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ГУБИТАКА СИЛЕ
ПРЕДНАПРЕЗАЊА У ВИСОКОВРЕДНИМ ЗАВРТЊЕВИМА,,**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, јануар 2015.

Потпис докторанда



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Ненад Фриц дипл. грађ. инж.

Број индекса: 904/07

Студијски програм: Грађевинарство

Наслов рада: „ТЕОРИЈСКО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО
ИСТРАЖИВАЊЕ ГУБИТАКА СИЛЕ
ПРЕДНАПРЕЗАЊА У ВИСОКОВРЕДНИМ
ЗАВРТЊЕВИМА“

Ментори: Др Драган Буђевац, редовни професор
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Др Зоран Мишковић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Потписани: **Ненад Фриц дипл. грађ. инж.**

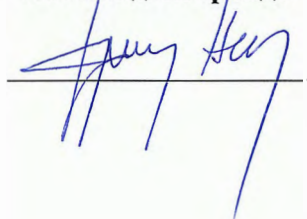
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, јануар 2015.

Потпис докторанда



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„ТЕОРИЈСКО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ГУБИТАКА СИЛЕ ПРЕДНАПРЕЗАЊА У ВИСОКОВРЕДНИМ ЗАВРТЊЕВИМА“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

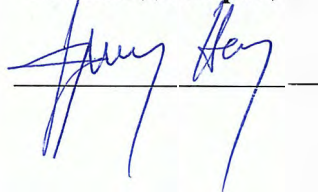
5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, јануар 2015.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.