

februar 2023

letnik 72

Gradbeni vestnik

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKA ZBORNICE SLOVENIJE



34

RAZVOJ ENAČBE ZA
OCENO ČASA ZAKASNITVE
ZA SLOVENSKA POREČJA

42

NOSILNOST LAMELIRANIH
LEPLJENIH NOSILCEV
IZ BUKOVEGA LESA

Izdajatelj:
**Zveza društev gradbenih inženirjev in
tehnikov Slovenije (ZDGITS),**
Karlovska cesta 3, 1000 Ljubljana,
telefon 01 52 40 200
v sodelovanju z **Matično sekcijo
gradbenih inženirjev Inženirske
zbornice Slovenije (IZS MSG),**
ob podpori **Javne agencije za
raziskovalno dejavnost RS, Fakultete
za gradbeništvo in geodezijo Univerze
v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo
Univerze v Mariboru in Zavoda za
gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:
ZDGITS: **prof. dr. Matjaž Mikoš, predsednik**
izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski
Dušan Jukič
IZS MSG: **mag. Gregor Ficko**
mag. Jernej Nučič
mag. Mojca Ravnikar Turk
UL FGG: **doc. dr. Matija Gams**
UM FGPA: **prof. dr. Miroslav Premrov**
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Uredniški odbor: **izr. prof. dr. Sebastjan
Bratina, glavni in odgovorni urednik**
doc. dr. Milan Kuhta

Lektor: **Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica: **Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova: **Agencija GIG**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočeovski tisk

Naklada: 450 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

Podatki o objavah v reviji so navedeni
v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA
(The Int. Construction Database) ter na
www.zveza-dgits.si

Letno izide 12 številčk. Letna naročnina
za individualne naročnike znaša 25,50 EUR;
za študente in upokojene 10,50 EUR;
za družbe, ustanove in samostojne podjetnike
188,50 EUR za en izvod revije; za
naročnike iz tujine 88,00 EUR.
V ceni je všteti DDV.
Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Slika na naslovnici:
**Brv Irča vas, zasnovana
po tehnologiji nateznih trakov,**
foto: Sebastjan Bratina

**Glasilo Zveze društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije in
Matične sekcije gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije.**
UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;
spletna izdaja ISSN 2536-4332.
Ljubljana, februar 2023, letnik 72, str. 33-56

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledkom med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: [priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave]. V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: sebastjan.bratina@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

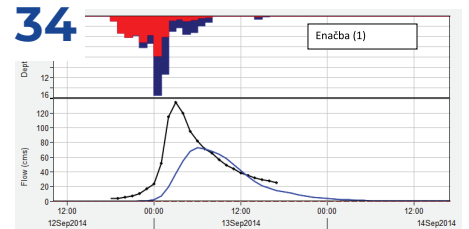
Uredništvo

VSEBINA CONTENTS

ČLANKI PAPERS

Deja Mavri, dipl. inž. ok. grad.
prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad.

**RAZVOJ ENAČBE ZA OCENO ČASA
ZAKASNITVE ZA SLOVENSKA POREČJA
LAG TIME EQUATION DEVELOPMENT
FOR SLOVENIAN CATCHMENTS**



dr. Barbara Fortuna, mag. inž. grad.
izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.

**NOSILNOST LAMELIRANIH LEPLJENIH
NOSILCEV IZ BUKOVEGA LESA
LOAD BEARING CAPACITY OF GLUED
LAMINATED BEECH BEAMS**



FOTOREPORTAŽA Z GRADBIŠČ

STRABAG, d.o.o.

**IZGRADNJA LOGISTIČNEGA
CENTRA TEDI SEŽANA**



NOVI DIPLOMANTI

Eva Okorn

KOLENDAR PRIREDITEV

Eva Okorn

Deja Mavri, dipl. inž. ok. grad.
deja.mavril@gmail.com



prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. inž. grad.
mojca.sraj@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad.
nejc.bezak@fgg.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek
UDK 551.57:556.16(497.4)

RAZVOJ ENAČBE ZA OCENO ČASA ZAKASNITVE ZA SLOVENSKA POREČJA

LAG TIME EQUATION DEVELOPMENT FOR SLOVENIAN CATCHMENTS

Povzetek

Za načrtovanje hidrotehničnih objektov in protipoplavnih gradbenih in negradbenih ukrepov za zmanjševanje poplavnih tveganj so ključnega pomena podatki o projektnih pretokih oziroma projektnih hidrogrameh. Le-te lahko določimo tudi z uporabo hidrološkega modela padavine-odtok. V primeru, ko nimamo na voljo dovolj podatkov za umerjanje hidrološkega modela, je treba parametre modela oceniti glede na lastnosti porečij. Eden izmed parametrov, ki jih upošteva tudi pri nas pogosto uporabljeni hidrološki model HEC-HMS, je čas zakasnitve porečja. Do sedaj so se v slovenski vodarski praksi za oceno tega parametra večinoma uporabljale empirične enačbe, ki so bile razvite na drugih geografskih območjih (npr. ZDA). Prispevek prikazuje postopek določitve empiričnih enačb za oceno časa zakasnitve na podlagi merjenih podatkov o padavinah in pretokih za 20 izbranih porečij v Sloveniji. Izpeljane enačbe so se pri prvih poskusih uporabe izkazale za ustrezne in se tako že lahko uporabijo za oceno časa zakasnitve v primeru nemerjenih porečij v Sloveniji. Bo pa seveda njihova nadaljnja uporaba v praksi pokazala njihove prednosti oz. slabosti.

Ključne besede: čas zakasnitve, empirična enačba, hidrološko modeliranje, padavine, odtok, porečje

Summary

Information on design discharge values and design hydrographs is crucial for the design of hydro-engineering structures and structural and non-structural flood control measures. These variables can also be determined using a rainfall-runoff hydrological model. If there are insufficient data to calibrate the hydrological model, the model parameters must be estimated according to the characteristics of the catchment. One of the parameters that is also considered by the commonly used hydrological model HEC-HMS is the catchment lag time. So far, empirical equations developed in other geographic areas (e.g., USA) have been used to estimate this parameter in Slovenian engineering practice. This article shows the methodology applied for developing the empirical equation for estimating the lag time parameter based on measured precipitation and discharge data using 20 selected river catchments in Slovenia. The derived equation can thus be used to estimate the lag time parameter in the case of ungauged catchments. Further studies need to be conducted in order to evaluate the performance of the proposed equations.

Key words: lag time, empirical equation, hydrological modelling, rainfall, runoff, catchment

1 UVOD

V vodarski in hidrotehnični praksi se pogosto uporabljajo hidrološki modeli padavine-odtok, ki simulirajo površinski odtok na podlagi podatkov o padavinah in se lahko uporabijo tudi za napovedovanje poplav in načrtovanje hidrotehničnih ukrepov ([Bezak, 2017], [Dirnbek, 2010]). Kadar imamo na voljo merjene podatke o padavinah in pretokih, lahko za izdelavo hidrološkega modela uporabimo eno izmed teorij, ki se uporablja za modeliranje, tj. teorijo hidrograma enote, in modelske parametre ustrezno umerimo. V praksi pa se pogosto zgodi, da nimamo na voljo vseh podatkov za izdelavo hidrološkega modela in njegovo umerjanje. V tem primeru lahko na podlagi lastnosti porečij oblikujemo sintetični hidrogram enote, ki ga nato uporabimo v postopku hidrološkega modeliranja. Teorija hidrograma enote temelji na predpostavki, da je oblika hidrograma neodvisna od predhodnih padavin in zajema parametre, ki imajo velik vpliv na odtok s porečja. Ti parametri so odvisni oziroma se jih določa glede na lastnosti porečja, kot so naklon, oblika, vegetacija, lastnosti tal, geologija itd. [Brilly, 2018]. V preteklosti je bilo v svetu razvitih veliko enačb (pregled enačb podaja [Brilly, 2018]), s katerimi se lahko ocenijo parametri za določitev sintetičnega hidrograma enote na podlagi lastnosti porečja. Enačbe so bile večinoma razvite za območja v ZDA, kar pomeni, da so bile lastnosti teh porečij, na katerih so bile osnovane enačbe, lahko precej različne (npr. ravninska in aridna porečja) od lastnosti porečij na območju Slovenije. Zaradi tega je smiselno obstoječo prakso nadgraditi in razviti enačbo, ki bo osnovana na podlagi podatkov s porečij na območju Slovenije. Glavni namen tega prispevka je predstaviti nove empirične enačbe za izračun časa zakasnitve, izpeljane na podlagi podatkov za porečja v Sloveniji, in prikazati posamezne korake izpeljave teh enačb.

2 PODATKI

Sintetični hidrogram enote, ki povezuje lastnosti hidrograma enote in značilnosti porečja, je prvi razvil F. F. Snyder leta 1938 [Brilly, 2018]. Določil je povezave in enačbe, s katerimi lahko, glede na lastnosti porečja, definiramo parametre za oblikovanje sintetičnega hidrograma enote. Sintetični hidrogram enote po Snyderju je definiran s konico hidrograma enote in

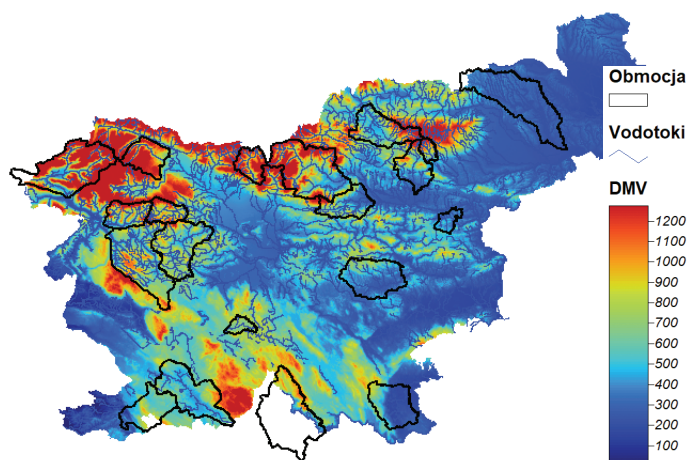
časom, pri katerem se ta pojavi. Čeprav se površinski odtok prične z začetkom učinkovitih padavin (razlika med padlimi padavinami in padavinskimi izgubami), se v nekaterih primerih del padavin zadrži na porečju. Padla voda potrebuje nekaj časa, da iz različnih delov porečja priteče do struge vodotoka ter tako do nastopa konice pretoka v vodotoku pride z določenim časovnim zamikom. Ta čas imenujemo čas zakasnitve (T_p) in je najpogosteje definiran kot razlika med težiščem učinkovitih padavin in konico pretoka, ki je posledica istega padavinskega dogodka [Gericke, 2014]. Čas zakasnitve je tudi eden izmed parametrov, ki je uporabljen v hidrološkem modelu HEC-HMS za določitev sintetičnega hidrograma enote po različnih metodah (npr. SCS, Snyder) [HEC-HMS, 2022].

Kot osnovo za izpeljavo enačbe smo izbrali 20 porečij na območju Slovenije (slika 1 in preglednica 1), ki jih je v svoji raziskavi obravnaval že [Alexopoulos, 2021]. Porečja so relativno enakomerno razporejena po celotni Sloveniji in imajo prispevek površine od približno 50 do približno 500 km² (preglednica 1). [Alexopoulos, 2021] je za vsako izmed teh porečij, glede na razpoložljivost podatkov o padavinah, pripravil zvezne urne podatke o padavinah in pretokih z upoštevanjem različnih padavinskih postaj, ki so predstavljene v preglednici 1. Izhodiščno obdobje je bilo 2000-2020. Na podlagi tako zbranih zveznih podatkov o pretokih smo v naši raziskavi za vsako izmed 20 izbranih porečij izbrali 5 največjih visokovodnih valov na podlagi podatka o konici pretoka. Za vsako visokovodno konico je bil izbran tudi pripadajoči padavinski dogodek. Za vse tako izbrane dogodke je bil določen čas zakasnitve T_p (v našem primeru definiran kot zamik med težiščem padavin in konico pretoka) in izrisan hidrogram s pripadajočim histogramom padavin. Primer za porečje vodotoka Poljanska Sora je prikazan na sliki 2, skupaj s časom zakasnitve T_p . Pri dogodku, ki se je zgodil 22. 10. 2014 na porečju vodotoka Poljanska Sora (slika 2), vidimo, da je razmik med težiščem padavin in konico pretoka relativno majhen, kar pomeni, da je čas zakasnitve relativno kratek (približno 2,7 h). V tem primeru to pomeni, da padavine niso potrebovale veliko časa, da so dosegle strugo vodotoka in povzročile konico pretoka. Za vsakega izmed tako izbranih visokovodnih dogodkov smo določili konico pretoka, skupno količino padavin med padavinskim dogodkom, največjo urno količino padavin in izračunali ter grafično ocenili čas zakasnitve T_p .

Vodotok	Vodomerna postaja in njena identifikacijska številka (ARSO)	Površina porečja (km ²)	Uporabljene padavinske postaje
Mislinja	Otiški Vrh - 2390	230,9	Šmartno pri Slovenj Gradcu, Spodnji Dolič, Muta, Ravne na Koroškem
Dravinja	Zreče - 2600	41,4	Slovenske konjice, Spodnji Dolič, Dravinja, Rogla
Pesnica	Zamušani I - 2900	477,8	Letališče Edvarda Rusjana Maribor, Polički vrh, Gornja Radgona, Gačnik
Radovna	Podhom - 3180	166,8	Davča, Zgornja Sorica, Kredarica, Lesce
Kokra	Kokra - 4120	112,2	Kamniška Bistrica, Zgornje Jezersko, Krvavec, Letališče J.P.
Poljanska Sora	Zminec - 4230	305,5	Leskovica, Zgornja Sorica, Suha, Dvor
Selška Sora	Železniki - 4270	104,1	Leskovica, Davča, Cerknica, Rudno polje
Mirna	Jelovec - 4695	270	Sevno, Novo mesto, Hrastnik, Malkovec
Kolpa	Petrina - 4820	460	Šmarata, Kočevje, Iskrba, Babno polje
Lahinja	Gradac - 4970	221,3	Črnomelj - Dobliče, Kočevske Poljane

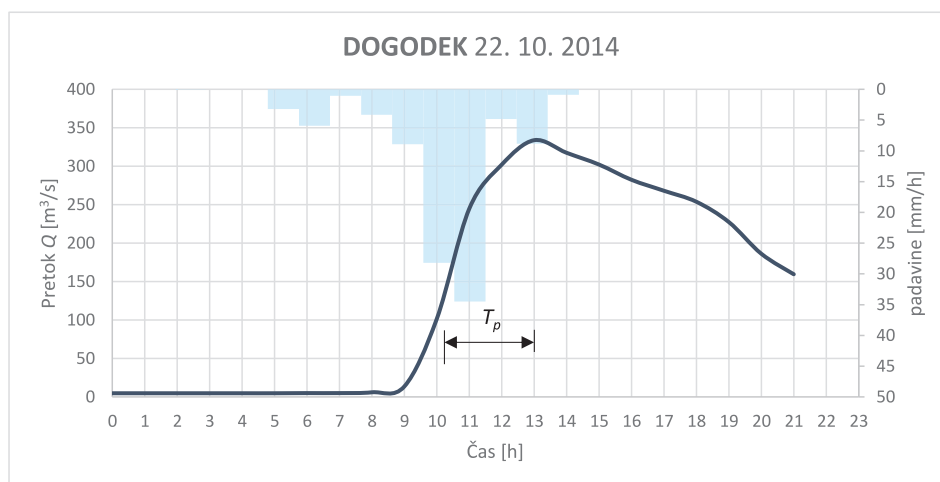
Cerkniščica	Cerknica I - 5770	47,3	Šmarata, Cerkniško jezero – Otok, Iška vas, Korošče
Savinja	Nazarje - 6060	457,3	Kamniška Bistrica, Zgornje jezersko, Nazarje, Krvavec
Bolska	Dolenja vas - 6550	175,1	Litija, Nazarje, Medlog
Vogljajna	Črnlolica I - 6690	53,7	Slovenske konjice, Lisca, Dravinja
Hudinja	Škofja vas - 6790	156,5	Šmartno pri Slovenj Gradcu, Slovenske Konjice, Medlog, Celje
Soča	Kobarid I - 8080	437	Stara Fužina, Rateče, Kredarica
Idrijca	Hotešk - 8450	442,8	Leskovica, Davča, Ajdovščina, Podroteja
Bača	Bača pri Modreju - 8500	142,3	Leskovica, Davča, Cerknica, Rudno Polje
Reka	Cerkvenikov mlin - 9050	377,9	Ilirska Bistrica, Postojna, Škocjan
Rižana	Kubed - 9210	204,5	Ilirska Bistrica, Koper - Luka, Škocjan

Preglednica 1. 20 izbranih porečij na območju Slovenije, ki so bila uporabljena za izpeljavo enačbe, skupaj z uporabljenimi padavinskimi postajami ter površinami porečij.



Slika 1. Prikaz izbranih 20 porečij na območju Slovenije (črno obrobljeni poligoni) skupaj z mrežo vodotokov (modre črte) in digitalnim modelom višin (DMV) kot podlago (enote metri).

Za izpeljavo enačbe za oceno časa zakasnitve posameznih porečij potrebujemo tudi podatke o osnovnih lastnostih porečij. Bistveni so podatki o površini porečja, padcu porečja, deležu urbanih površin, deležu gozdnih površin, deležu kmetijskih površin itd. Osnovne lastnosti pokrovnosti tal za izbranih 20 porečij so bile določene na podlagi karte rabe tal CLC Corine iz leta 2018 [CLC Corine, 2022]. Kot izhodišče za izpeljavo enačbe so pomembni tudi osnovni podatki o vodotoku, kot so dolžina vodotoka, padec vodotoka, dolžina od iztočnega profila do profila, ki je najbližji težišču vodotoka (L_c), itd. Podloge, uporabljene za analizo lastnosti vodotoka, so bile: digitalni model višin (DMV) za območje Slovenije (20 m) [RS MOP, 2022], mreža vodotokov (sloj Kategorizacija vodotokov, prenesen s portala Geoportal ARSO [ARSO, 2022]) v Sloveniji in razvodnice izbranih porečij. Na podlagi podatkov DMV smo določili tudi minimalno, povprečno in maksimalno nadmorsko višino vseh 20 izbranih porečij. Dodatno smo upoštevali tudi karto odtočnega potenciala posameznega porečja [UL BF, 2011]. Na podlagi podatkov o odtočnem potencialu in rabi tal smo ocenili tudi parameter CN (Curve Number) [Brilly, 2018]. Osnovne lastnosti izbranih porečij so prikazane v preglednici 2.



Slika 2. Primer hidrograma in histograma padavin za dogodek 22. 10. 2014 na porečju vodotoka Poljanska Sora. Podatki so bili pridobljeni iz vodomerne postaje Zminec in padavinske postaje Zgornja Sorica.

Vodotok in ime vodomerne postaje	L (km)	L_c (km)	I (m/m)	CN	Delež gozda (%)	Delež kmetijskih površin (%)
Mislinja, Otiški Vrh	34,8	21,4	0,02	71	66,8	30,7
Dravinja, Zreče	9,9	5,2	0,10	76	68,1	30,8
Radovna, Podhom	26,8	13,8	0,04	52	94,3	5,5
Kokra, Kokra	17,9	8,1	0,04	62	94,5	4,4
Poljanska Sora, Zminec	40,4	19,6	0,00	71	66,2	32,8
Selška Sora, Železniki	18,5	8,7	0,04	63	84,3	13,8
Mirna, Jelovec	33,6	19,6	0,02	65	57,3	42,0
Kolpa, Petrina	35,0	21,5	0,01	63	88,9	11,1
Lahinja, Gradac	27,6	15,3	0,00	64	73,6	24,3
Savinja, Nazarje	46,8	19,1	0,04	63	81,2	18,2
Bolska, Dolenja_vas	31,1	16,8	0,02	74	63,9	34,0
Voglajna, Črnomlca I	17,8	12,1	0,01	79	37,8	61,7
Hudinja, Škofja vas	27,5	13,6	0,04	79	57,3	41,3
Idrijca, Hotešk	55,9	24,7	0,01	63	79,0	20,2
Reka, Cerkvenikov mlin	46,2	17,8	0,00	70	70,8	27,6
Rižana, Kubed	1,4	1,4	0,01	67	81,0	18,6
Pesnica, Zamušani I	52,3	33,6	0,00	82	22,9	74,9
Cerkniščica, Cerknica I	18,1	9,1	0,01	64	72,6	25,9
Soča, Kobarid I	39,8	17,9	0,02	50	93,9	5,7
Bača, Bača_pri_Modreju	23,4	11,0	0,05	63	90,6	9,4

Preglednica 2. Prikaz osnovnih lastnosti 20 izbranih porečij. Podani so dolžina vodotoka L , dolžina od točke na vodotoku, ki je najbližje težišču, do iztoka L_c , padec vodotoka I , parameter CN (Curve Number), delež gozda in delež kmetijskih površin.

3 IZPELJAVA ENAČB

V postopku izpeljave enačb smo najprej naredili pregled obstoječih enačb za oceno časa zakasnitve ([Brilly, 2018], [Gericke, 2014]). Tako smo dobili pregled nad različnimi oblikami enačb ter parametri, ki v teh enačbah nastopajo. Dodatno smo z uporabo nekaterih drugih pogosto uporabljenih empiričnih enačb, ki jih podaja [Brilly, 2018], naredili oceno časa zakasnitve. To pomeni, da smo na podlagi lastnosti porečij (npr. naklon vodotoka, dolžina vodotoka) izračunali čase zakasnitve glede na različne enačbe za izbrana porečja. Tako smo lahko te izračunane vrednosti primerjali z vrednostmi, ki smo jih določili na podlagi meritev padavin in pretokov petih izbranih dogodkov za vsako porečje. Čas zakasnitve je namreč odvisen od lastnosti porečij, pri čemer imajo nekatere lastnosti večji vpliv kot druge, vpliv posameznega dejavnika pa se tudi razlikuje od porečja do porečja. Odvisnost časa zakasnitve (določenega glede na 5 izbranih dogodkov) in lastnosti porečij smo ugotavljali z uporabo Pearsonovega koeficienta korelacije. Analizirali smo odvisnost časa zakasnitve (določenega kot povprečna vrednost T_p petih izbranih dogodkov) z osnovnimi lastnostmi porečij (preglednica 3). Na podlagi največje absolutne vrednosti Pearsonovega koeficienta korelacije so najbolj izrazito odvisnost s časom zakasnitve podale naslednje last-

nosti: površina kmetijskih površin, površina urbanih površin, padec vodotoka in dolžina od iztočnega profila do profila, ki je najbližji težišču vodotoka (L_c) (preglednica 3). Slika 3 prikazuje primer odvisnosti med kmetijskimi površinami in časom zakasnitve ter časom zakasnitve od naklona vodotoka. Prva odvisnost ponazarja, da ima večje porečje daljši čas zakasnitve, druga odvisnost pa je posledica dejstva, da imajo bolj strmi vodotoki načeloma krajši čas zakasnitve. Na podlagi rezultatov, prikazanih v preglednici 3, smo pri izpeljavi enačb dali poudarek tistim parametrom (npr. površina kmetijskih območij, naklon vodotoka, dolžina L_c), ki imajo največji vpliv na čas zakasnitve in so hkrati tudi fizikalno razložljivi.

Prva spremenljivka	Druga spremenljivka	Pearsonov koeficient korelacije med spremenljivkama
T_p (h)	kmetijske površine (km ²)	0,78
T_p (h)	urbane površine (km ²)	0,78
T_p (h)	\sqrt{I} (kvadratni koren padca vodotoka)	-0,54
T_p (h)	L_c (m)	0,55

T_p (h)	dolžina vodotoka L (m)	0,40
T_p (h)	koeficient CN	0,37
T_p (h)	povprečna vrednost odtočnega potenciala (mm/h)	0,36
T_p (h)	gozdne površine (km ²)	0,00
T_p (h)	površine krasa (km ²)	0,44
T_p (h)	površine manjših vodonosnikov (m ²)	0,46
T_p (h)	naklon vodotoka l (m/m)	-0,42
T_p (h)	maksimalno zadrževanje S_r (mm)	-0,36

Preglednica 3. Izračunane vrednosti Pearsonovih koeficientov korelacije med pari spremenljivk. Čas zakasnitve (T_p) je bil za vsako porečje določen kot povprečje 5-ih dogodkov.

kjer je x_1 dolžina vodotoka od iztočnega profila do profila na vodotoku, ki je najbližji težišču vodotoka L_c (m); x_2 kvadratni koren padca vodotoka \sqrt{l} (m/m); x_3 kmetijske površine (km²).

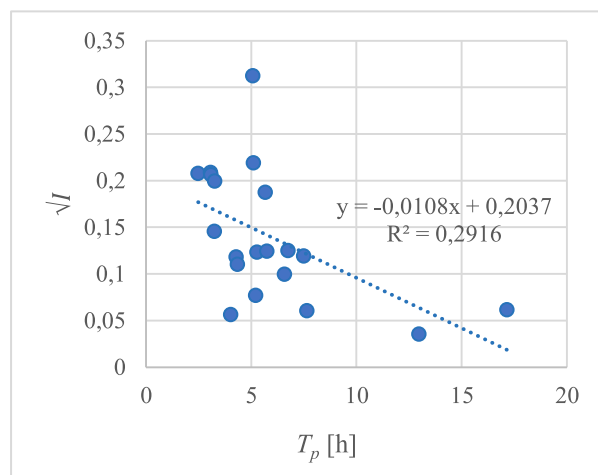
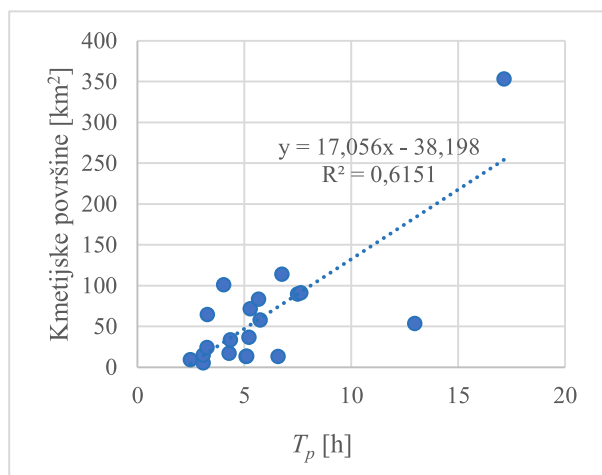
Kot dve alternativni obliki enačbe, ki sta prav tako dali relativno ustrezno ujemanje s časi zakasnitve, določenimi glede na merjene podatke o padavinah in pretokih, pa smo določili tudi naslednji dve enačbi:

$$T_p = 0,55 \cdot x_3 \cdot \frac{x_1^{-0,49}}{x_2} \quad (2)$$

$$T_p = 0,19 \cdot \left(\frac{x_3 \cdot x_4}{x_2^{1,61}}\right)^{0,29} \quad (3)$$

Opis parametrov x_1 , x_2 in x_3 v enačbah (2) in (3) je enak kot pri enačbi (1), x_4 pa predstavlja parameter CN .

Slika 4 prikazuje primerjavo med časi zakasnitve, izračunanimi z uporabo izpeljanih enačb (1), (2) in (3), in časi zakasnitve, določenimi glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje 5-ih visokovodnih dogodkov). Opazimo lahko, da so ocenjene vrednosti časa zakasnitve po enačbi (2) v večini



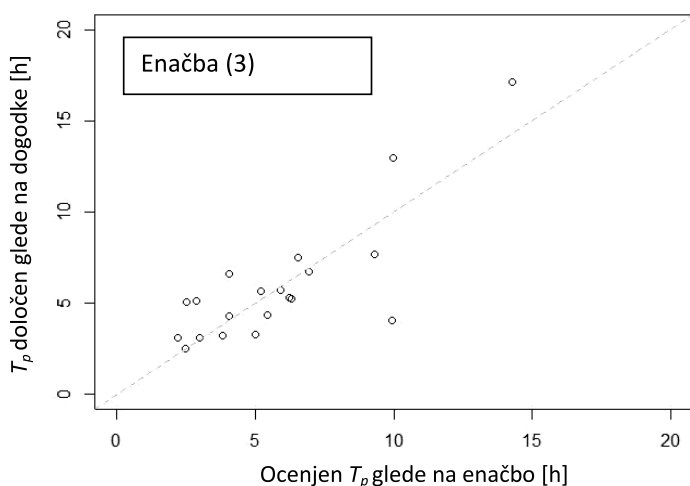
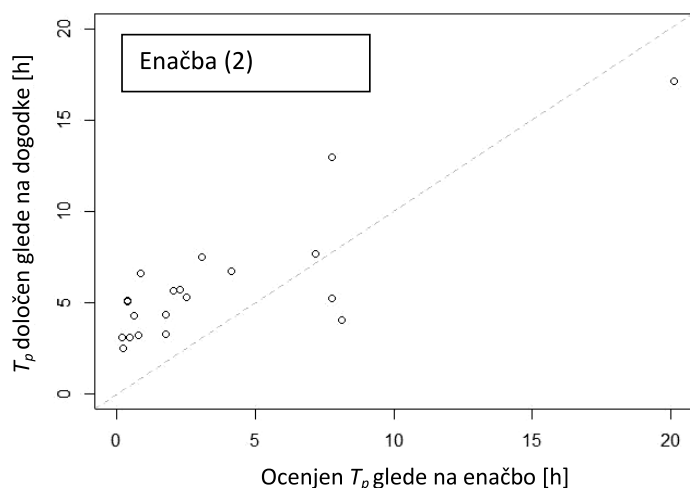
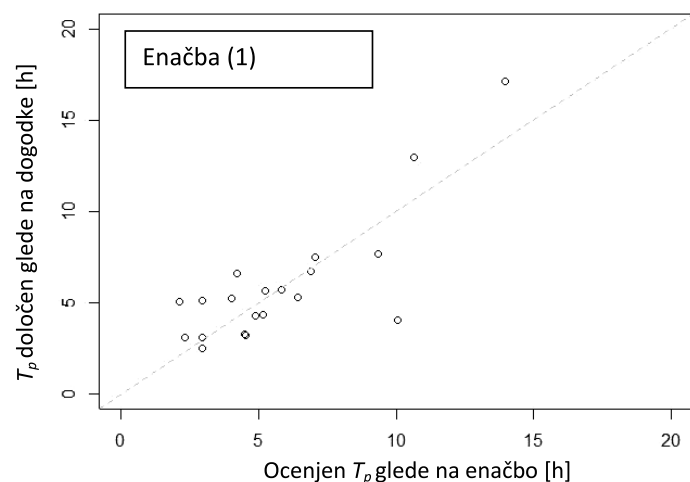
Slika 3. Primer odvisnosti med kmetijskimi površinami in časom zakasnitve (levo) ter med kvadratnim korenom padca vodotoka in časom zakasnitve (desno).

Postopek izpeljave enačbe je potekal v programskem jeziku R [R Core Team, 2022], za oceno koeficientov enačbe smo uporabili funkcijo »nls« (angl. nonlinear least squares; slo. nelinearna metoda najmanjših kvadratov). V postopku izbire enačbe smo testirali več kot 70 različnih oblik enačb (npr. kvadratni koren padca vodotoka nad ali pod ulomkovo črto, upoštevanje korena, upoštevanje različnih parametrov, različnega števila koeficientov itd.). Za vsako izmed enačb smo potem na podlagi lastnosti porečij izračunali čase zakasnitve ter jih primerjali s povprečnimi časi zakasnitve, ki smo jih določili glede na 5 izbranih dogodkov na podlagi izmerjenih podatkov o padavinah in pretokih. Za primerjavo sta bila uporabljena tako Pearsonov koeficient korelacije kot grafični prikaz.

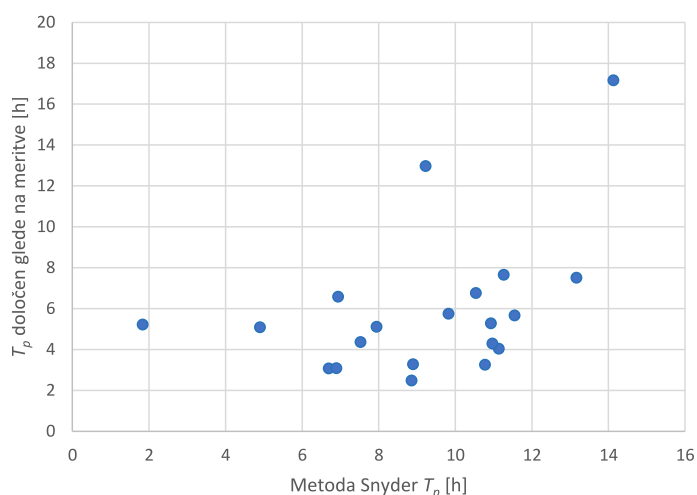
Kot najustreznejša enačba (glede na Pearsonov koeficient korelacije in ujemanje med izračunanimi in dejanskimi časi T_p) se je izkazala naslednja oblika enačbe:

$$T_p = 0,11 \cdot \left(\frac{x_1 x_3}{x_2^{2,46}}\right)^{0,21}, \quad (1)$$

primerov nekoliko manjše kot z uporabo enačbe (1). Vrednosti časov zakasnitve z uporabo enačbe (3) pa so nekoliko večje od ocenjenih vrednosti po enačbi (1). Več rezultatov in tudi nekatere druge oblike enačb so podane v [Mavri, 2022]. Izpeljane enačbe so pričakovano dale boljše ujemanje z dejanskimi časi zakasnitve kot nekatere druge enačbe, ki se pogosto uporabljajo za oceno časa zakasnitve v slovenski praksi (slika 5) (npr. Snyder, Denver, Tulsa District itd.) [Brilly, 2018]. Bolj podrobno primerjavo prikazuje [Mavri, 2022].



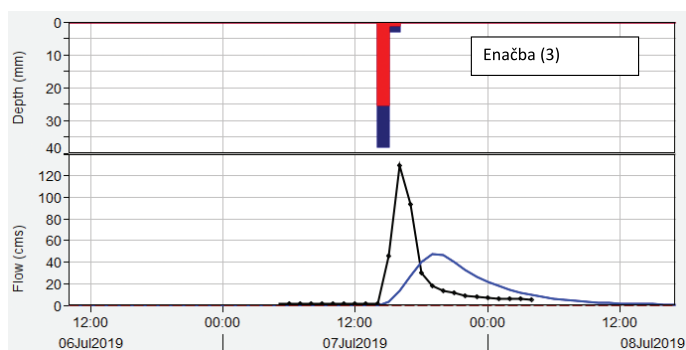
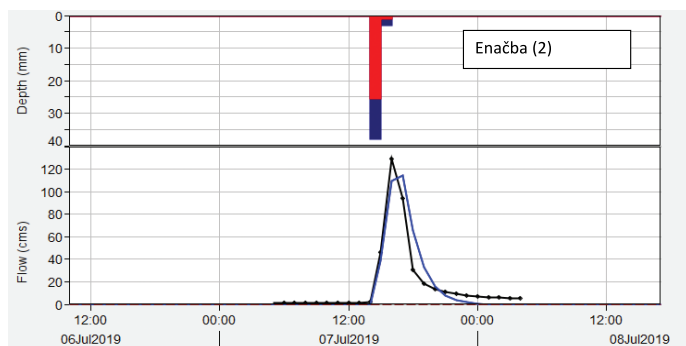
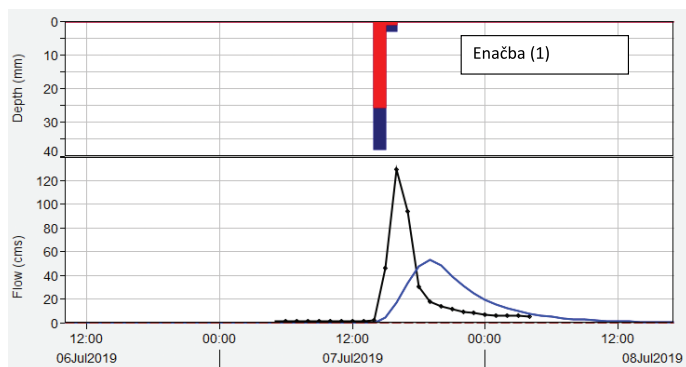
Slika 4. Primerjava med izračunanimi časi zakasnitve glede na izpeljane enačbe (enačbe (1), (2) in (3)) in časi zakasnitve, določenimi glede na merjene podatke o pretokih in padavinah (povprečje 5-ih visokovodnih dogodkov). Vrednosti Pearsonovih koeficientov korelacije znašajo 0,81 (enačba (1)), 0,83 (enačba (2)) in 0,81 (enačba (3)).



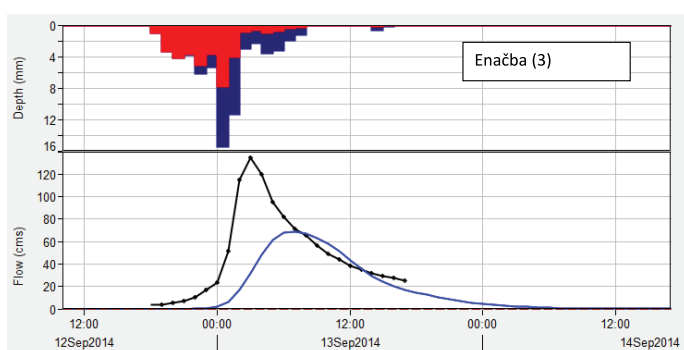
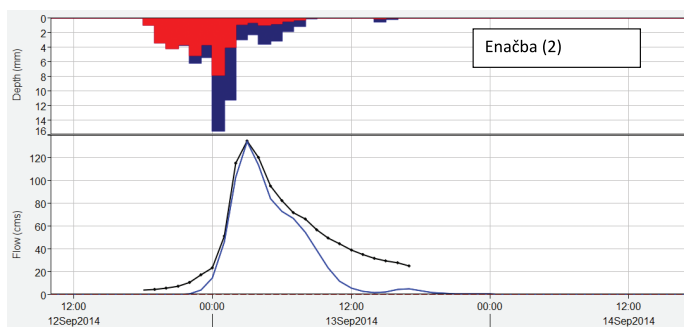
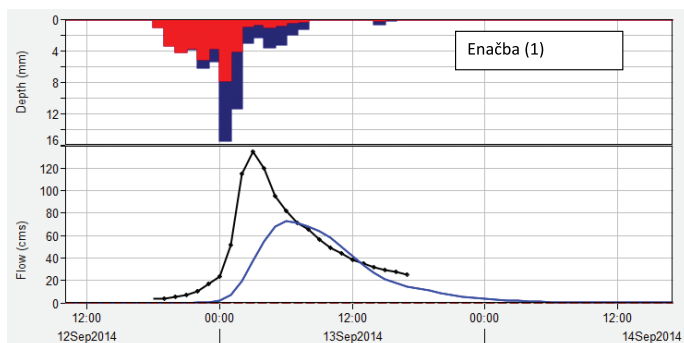
Slika 5. Primerjava med izračunanimi časi zakasnitve glede na splošno enačbo Snyder [Brilly, 2018] in časi zakasnitve, določenimi na podlagi merjenih podatkov o pretokih in padavinah (povprečje 5-ih visokovodnih dogodkov).

4 PRIMER UPORABE

Za validacijo novih enačb smo izbrali porečje Medije do vodomerne postaje Zagorje (površina približno 97 km²). Tudi za to območje smo na podlagi urnih podatkov o padavinah (postaja Hrastnik) in pretokih izbrali nekaj večjih dogodkov, s pomočjo katerih smo preverili ustreznost predlaganih enačb (1)-(3). V tem primeru se je kot najustreznejša izkazala enačba (2), po kateri je ocenjen čas zakasnitve za to porečje znašal približno 1,8 h (slika 6 in slika 7). Po enačbah (1) in (3) je bil ocenjen čas zakasnitve daljši in je znašal 4,3 h oziroma 4,8 h. Te vrednosti so za porečje Medije očitno prevelike (vsaj za izbrane visokovodne dogodke), saj je glede na meritve odziv porečja na padavine hitrejši, kot kažejo izračuni z uporabo enačb (1) in (3). Glede na rabo tal in vrednost odtočnega potenciala smo ocenili tudi parameter CN (ocenjena vrednost 82), ki je bil uporabljen za izračun padavinskih izgub po metodi Soil Conservation Service (SCS) [Brilly, 2018]. Primerjava merjenih in modeliranih pretokov z uporabe enačbe (2) se je pri večini izbranih dogodkov izkazala za relativno ustrezno (slika 6 in slika 7). Poudariti je treba, da je v primeru porečij z drugačnimi lastnostmi (npr. bolj ravninska območja) lahko ustreznost enačb (1)-(3) drugačna in se lahko enačbi (1) in (3) v določenih primerih morda izkažeta kot primernejši. Posledično je smiselno ustreznost enačb dodatno preveriti na dodatnih porečjih.



Slika 6. Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodometri postaji Zagorje (Medija) julija 2019. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve so bile uporabljene vse tri izpeljane enačbe (1)-(3).



Slika 7. Primer ujemanja simuliranih (modra črta) in merjenih pretokov (črna črta) za dogodek, ki se je zgodil na vodometri postaji Zagorje (Medija) septembra 2014. Modri stolpci so padle padavine, rdeči stolpci so padavinske izgube. Za oceno časa zakasnitve so bile uporabljene vse tri izpeljane enačbe (1)-(3).

5 SKLEP

Prispevek prikazuje nove empirične enačbe za izračun časa zakasnitve, izpeljane na podlagi podatkov za porečja v Sloveniji, in postopek izpeljave teh enačb, ki jih lahko uporabimo v primeru nemerjenih porečij v Sloveniji. Enačbe so primerne predvsem za območja, ki imajo lastnosti podobne kot 20 izbranih porečij (preglednica 1). Enačbe so izpeljane na podlagi lastnosti slovenskih porečij in so v primerjavi z enačbami, razvitimi na tujih porečjih, v večini primerov podale boljše ocene časa zakasnitve. Prikazali smo 3 različne enačbe, ki podajo nekoliko različne ocene časov zakasnitve, ujemanje s časi

zakasnitve, določenimi na podlagi merjenih podatkov o pretokih in padavinah, pa je bilo v vseh treh primerih podobno. Izpeljane enačbe smo preverili na porečju Medije do vodomerne postaje Zagorje, kjer se je kot najbolj ustrezna izkazala enačba (2). Ustreznost prikazanih enačb (1)-(3) pa je lahko v primeru porečij z drugačnimi lastnostmi tudi drugačna, in se lahko enačbi (1) in (3) v določenih primerih morda izkažeta kot primernejši. Izpeljane enačbe se lahko uporabijo za oceno časa zakasnitve v primeru nemerjenih porečij v Sloveniji. Kljub temu pa je pomembno poudariti, da je umerjanje hidroloških modelov seveda še vedno nujno potrebno, saj pri hidrološkem modeliranju nastopajo tudi drugi paramet-

tri, ki jih je smiselno umeriti glede na merjene podatke o pretokih in padavinah. Izpeljane enačbe bo v prihodnosti treba preveriti še na dodatnih porečjih na območju Slovenije.

6 ZAHVALA

Prispevek je nastal v okviru ciljnega raziskovalnega projekta V2-2137 »Razvoj metodologije za izračun visokovodnih valov na podlagi ekstremnih padavinskih dogodkov«, ki ga financirata Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS (ARRS) in Ministrstvo za okolje in prostor (MOP). Prispevek je tudi rezultat dela v okviru programske skupine P2-0180, ki jo financira ARRS.

7 LITERATURA

Alexopoulos, M. J., Use of the reanalysis products for the hydrological rainfall-runoff modelling = Uporaba produktov reanaliz za namen hidrološkega modeliranja: izbrani primeri v Sloveniji, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2021.

ARSO, Kategorizacija vodotokov, spletna stran: https://gis.arso.gov.si/wfs_web/faces/WFSLayersList.jspx, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M., Vpliv padavin na projektne pretoke, Gradbeni vestnik, 66, 241-248, 2017.

Brilly, M., Šraj, M., Modeliranje površinskega odtoka, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2018.

CLC Corine, Spletna stran: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

Dirnbeek, L., Šraj, M., Hidrološko modeliranje: Vpliv histograma padavin na hidrogram površinskega odtoka, Gradbeni vestnik, 59(3), 48-56, 2010.

HEC-HMS, HEC-HMS User's Manual, v. 4.7; US Army Corps of Engineers: Davis, CA, USA, 2021.

Gericke, O. J., Smithers, J. C., Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. Hydrological Sciences Journal, 59(11), 1935-1971, 2014.

Mavri, D., Predlog razvoja enačbe za določitev sintetičnega hidrograma enote na podlagi podatkov z območja Slovenije, Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, spletna stran: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=140895&lang=slv>, 2022.

R Core Team., A Language and Environment for Statistical Computing: R. Dunaj, Avstrija, R Foundation for Statistical Computing. Spletna stran: <http://www.R-project.org/>, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

RS MOP, Digitalni model višin Slovenije, spletna stran: <https://www.e-prostor.gov.si/podrocja/drzavni-topografski-sistem/digitalni-modeli-visin/>, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, datum vpogleda 14.12.2022, 2022.

UL BF, Trajnostna raba vode za krepitev rastlinskega pridelovalnega potenciala v Sloveniji, Projekt V4-1066, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, 2011.

dr. Barbara Fortuna, mag. inž. grad.

barbara.fortuna@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.

simon.schnabl@fkkt.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo,
Večna pot 113, 1000 Ljubljana



prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.

goran.turk@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 624.011.1:674.031.631.2

NOSILNOST LAMELIRANIH LEPLJENIH NOSILCEV IZ BUKOVEGA LESA

LOAD BEARING CAPACITY OF GLUED LAMINATED BEECH BEAMS

Povzetek

V sklopu raziskave smo z laboratorijskimi testi izmerili mehanske lastnosti lameliranih lepljenih nosilcev iz lesa slovenske bukve. Izdelali smo dve seriji nosilcev, pri katerih so bili sloji dolžinsko spojeni z dvema različnima geometrijama zobatih spojev. V ta namen smo predhodno izvedli tudi analizo vpliva geometrije zobatega spoja in tipa lepila na trdnost zobatih spojev. Z nateznimi laboratorijskimi testi smo izmerili trdnosti treh različnih geometrij zobatih spojev z uporabo treh tipov konstrukcijskih lepil. Rezultati laboratorijskih meritev so potrdili rezultate numerične analize in ugotovili smo, da z daljšimi in ostrejšimi zobatimi spoji pri bukovem lesu dosežemo višje natezne trdnosti. Pri tem tip uporabljenega lepila nima bistvene vloge. Višje natezne trdnosti zobatih spojev neposredno vplivajo tudi na višje upogibne trdnosti nosilcev. Laboratorijski upogibni testi so pokazali, da daljši zobati spoji z višjimi trdnostmi bistveno vplivajo na upogibno trdnost lameliranih lepljenih nosilcev.

Ključne besede: bukov les, zobati spoji, lamelirani lepljeni nosilci, natezni in upogibni testi

Summary

The article presents the results of an experimental investigation of the mechanical properties of glued laminated beech beams. Two groups of beams were made from longitudinally glued beech boards with two different finger joint geometries. Before the production of the two series of glued laminated beams, different finger joint profiles were analysed. Three different types of structural adhesives were used. The results of the experimental testing confirmed the results of the numerical analysis and it was found that longer and sharper finger joints allow higher tensile strengths of finger joints on beech wood. The type of adhesive has no significant influence on the strengths. Higher tensile strengths of finger joints have a direct influence on higher bending strengths of glued laminated beams. The experimental bending tests confirmed that longer finger joints with higher mechanical properties have a significant influence on the bending strength of the glued laminated beams.

Key words: beech wood, finger joints, glued laminated beams, tensile and bending tests

1 UVOD

Lamelirani lepljeni nosilci se v konstrukcijske namene uporabljajo predvsem zaradi izboljšanih trdnostnih in togostnih lastnosti v primerjavi s klasičnim žaganim lesom. Tovrstni konstrukcijski elementi so inženirski izdelki, ki omogočajo tudi izbiro bolj kompleksnih oblik, njihova proizvodnja pa je lahko načrtovana v skladu s predvideno porazdelitvijo napetosti vzdolž dolžine in prečnega prereza elementa. Z lepljenjem lesenih desk pa se poveča tudi dimenzijska stabilnost konstrukcijskega elementa, ko je ta izpostavljen spremembam relativne vlažnosti okolja [Serrano, 2003]. Poleg tega nam lepljenje omogoča uporabo manjših kosov lesa, ki bi sicer predstavljali odpadek, na ta način pa je večja tudi ekonomičnost tovrstnih konstrukcijskih elementov.

Lepljenje je teoretično izvedljivo ne glede na vrsto lesa. V praksi pa se je pokazalo, da je les listavcev zahtevnejši za lepljenje v primerjavi z lesom iglavcev, kar je povezano predvsem s povečanimi stroški zaradi zahtevnejše in časovno zamudnejše obdelave lesa. Zato se v sodobnih, široko uporabljenih lameliranih lepljenih nosilcih uporablja pretežno les iglavcev oziroma les smreke (*Picea abies*) in jelke (*Abies Alba*), uporaba lesa listavcev pa je trenutno še relativno neraziskana in nerazvita. Na nivoju evropske standardizacije se izvajajo aktivnosti, ki so potrebne za pripravo standardov za proizvodnjo lameliranih lepljenih nosilcev iz lesa listavcev, kar je podprto s številnimi raziskavami ([Ehrhart, 2016], [Ehrhart, 2018a], [Ehrhart, 2018b], [Frese, 2007], [Kovryga, 2020], [Sebera, 2021], [Tran, 2015], [Westermayr, 2018]).

V zadnjem desetletju so bili slovenski gozdovi zaradi ekstremnih vremenskih pojavov zelo prizadeti. Žledolom, vetrolom in večkratni snegolomi so močno poškodovali predvsem iglasti gozd. Zaradi sanitarne poseke, ki je bila nujna zaradi povečane namnožitve podlubnikov, pa so posledice za iglasti gozd še toliko bolj izrazite [Repe, 2021]. Zaloga lesa iglavcev se v naših gozdovih vztrajno zmanjšuje, hkrati pa se povečuje zaloga lesa listavcev. V slovenskih gozdovih je bukev najbolj zastopana lesna vrsta listavcev, saj je v letu 2020 predstavljala kar 32,9 % celotne lesne zaloge. Bukov je avtohtona lesna vrsta in zato bolj prilagojena klimatskim razmeram ter tudi manj izpostavljena napadom različnih škodljivcev in med sanitarnim posekom ni bila pretirano prizadeta.

Bukov odlikujejo tudi izredno visoke mehanske lastnosti, saj v povprečju dosega tudi do trikrat višjo natezno trdnost kot smreka, ta v povprečju znaša kar 72 N/mm², posamezni preizkušanci pa lahko dosežejo tudi dvakratnik te vrednosti ([Ehrhart, 2016], [Ehrhart, 2018a], [Fortuna, 2018], [Plos, 2018]).

Zobati spoji se v proizvodnji lameliranih lepljenih nosilcev uporabljajo pri dolžinskem spajanju posameznih desk. Zobati spoji so torej pomemben del lameliranih lepljenih nosilcev. Že pri iglavcih z nižjimi mehanskimi lastnostmi se izkaže, da zobati spoji lahko predstavljajo oslabeitev, tako da je porušitev nosilca običajno posledica ravno porušitve zobatega spoja. Visoke mehanske lastnosti bukovega lesa narekujejo potrebo po prilagojenih zobatih spojih, ki bi zagotavljali zadostno nosilnost in povečali izkoristek trdnosti lesa.

Standard SIST EN 14080 [SIST, 2013] obravnava področje izdelave lepljenih lameliranih nosilcev iz lesa iglavcev in topola.

V skladu s tem standardom je mogoče izdelati lamelirane lepljene nosilce do trdnostnega razreda GL 32, kjer se v laminaacijah uporabljajo lamele z deklarirano natezno trdnostjo T26 (26 N/mm²). Za uporabo bukovega lesa ali lesa listavcev na splošno trenutno ni v veljavi nobenega standarda, ki bi narekoval postopke izdelave tovrstnih konstrukcijskih elementov. To je v veliki meri posledica pomanjkljive baze podatkov o mehanskih lastnostih bukovega lesa in ostalih listavcev (konstrukcijskih dimenzij). Zato so raziskave na tem področju pomembne in potrebne.

V sklopu raziskave smo se odločili za izvedbo laboratorijskih testov tako zobatih spojev kot tudi lameliranih lepljenih nosilcev, izdelanih iz bukovega lesa. Pri tem smo analizirali vpliv geometrije zobatih spojev in tudi različnih lepil na končno natezno trdnost zobatih spojev. Z uporabo dveh različnih geometrij zobatih spojev smo izdelali dve skupini lepljenih lameliranih nosilcev, ki smo jih nato porušili s standardnimi upogibnimi testi.

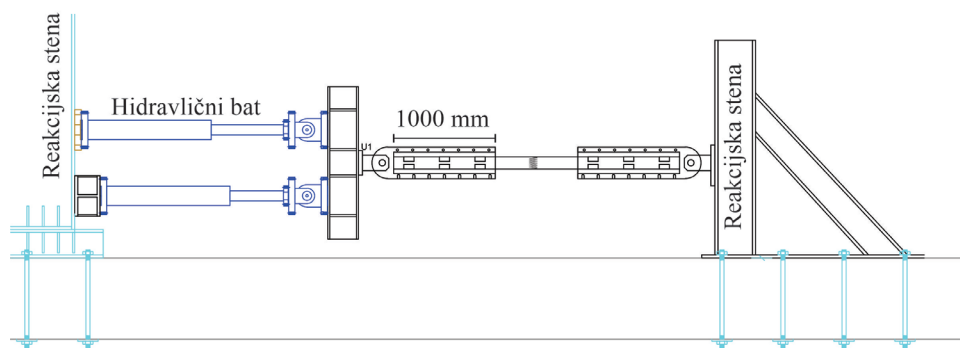
2 LABORATORIJSKI TESTI

2.1 Material

Bukov les, ki smo ga uporabili za izdelavo preizkušancev, je bil pridobljen iz jugovzhodnega dela Slovenije (Gozdno gospodarstvo Novo mesto, d. d.). Deske so bile iz hlodov najprej žagane po debelini, po sušenju v sušilnici pa so bile odrezane na končno širino. S tem postopkom smo se izognili pretiranemu zvijanju desk zaradi sušenja, ki je pri bukovini lahko zelo problematično. Po skobljanju smo dobili deske dimenzij: 120 x 24 mm, 120 x 32 mm, 140 x 20 mm in 200 x 16 mm. Pri lepljenju zobatih spojev in lepljenih nosilcev smo uporabili tri različna lepila. Prvi dve sta iz skupine melamin-urea-formaldehidnih lepil: lepilo 1247 z utrjevalcem 2526 (v nadaljevanju MUF) ter lepilo A002 z utrjevalcem H002 (v nadaljevanju GP) proizvajalca CASCO AkzoNobel. Lepilo MUF je lepilo, ki ga v redni proizvodnji uporablja proizvajalec lameliranih lepljenih nosilcev Hoja, d. d., kjer smo izdelali večino preizkušancev. Drugo lepilo, označeno kot GP, pa je bilo izbrano na osnovi priporočila proizvajalca lepila in naj bi bilo, predvsem z vidika trajnosti in odpornosti na delaminacijo, primernejše za lepljenje bukovega lesa. Tretje izbrano lepilo je bilo lepilo fenol-rezorcinol-formaldehid ali PRF. Slednje je ravno tako dvokomponentno (lepilo 1711 in utrjevalec 2520) istega proizvajalca CASCO AkzoNobel.

2.2 Natezni testi zobatih spojev

Natezni testi so bili izvedeni v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Uporabljena je bila postavitve za izvedbo nateznih testov lesenih desk dimenzij, ki se običajno uporabljajo v konstrukcijah (dolžine približno 3,5 m). Testi so bili izvedeni v skladu s navodili standarda SIST EN 408 [SIST, 2012]. Nanos obtežbe je bil kontroliran preko pomikov. V skladu s navodili standarda so bili testi izvedeni tako, da je do porušitve preizkušanca prišlo v času 5±2 min od začetka obremenjevanja. Glede na ocenjeno nosilnost posameznih preizkušancev je hitrost obremenjevanja v poprečju znašala 0,3 mm/min. Za nanos obtežbe sta bila uporabljena dva hidravlična bata, kot je prikazano na sliki 1. Za zagotavljanje ustreznega prijemališča desk so bile uporabljene namensko izdelane klešče z narezljano površino, s katerimi je bil omogo-



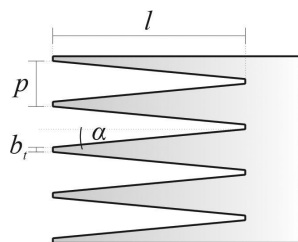
Slika 1. Shema testne konstrukcije za izvedbo nateznih testov na lesenih deskah.

čen oprijem deske do dolžine 1000 mm, ki zadošča nanosu velikih nateznih sil (do 500 kN). Prosta testna dolžina preizkušancev med kleščami je bila med 500 in 1000 mm.

Pri izdelavi preizkušancev zobatih spojev je bila vsaka deska razrezana na eno ali dve krajši deski. Pri tem smo zagotovili, da je bil les čist, brez grč in opaznega naklona vlaken, do najmanj 300 mm od konca deske, kjer je bil predviden zobati spoj. Pari desk pri spajanju so bili pri lepljenju zobatih spojev izbrani naključno.

Geometrija zobatih spojev vpliva na nosilnost zobatih spojev in v splošnem velja, da se nosilnost povečuje z lepljeno površino torej z dolžino zobatih spojev [Aicher, 2003].

Pripravili smo tri serije preizkušancev zobatih spojev, ki se med seboj razlikujejo po dolžini spojev l , naklonu α ter širini konice b_c . Parametri so prikazani na sliki 2. Poleg različnih geometrij smo pri lepljenju uporabili tudi različna lepila. Program testiranja zobatih spojev je predstavljen v preglednici 1, kjer je podano število preizkušancev za posamezno kombinacijo uporabljene geometrije (dolžine) zobatega spoja ter uporabljeno lepilo.



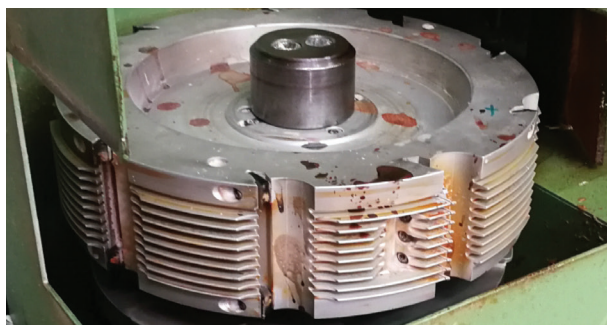
Slika 2. Shema konstrukcijskega zobatega spoja z označnimi geometrijskimi parametri.

Dolžina spojev	Vrsta lepila		
	MUF	PRF	GP
10	28	25	-
18	27 (5 N/mm ²)+26 (10 N/mm ²)	26	-
40	22	-	25

Preglednica 1. Število preizkušancev za posamezno dolžino zobatih spojev in uporabljeno lepilo.

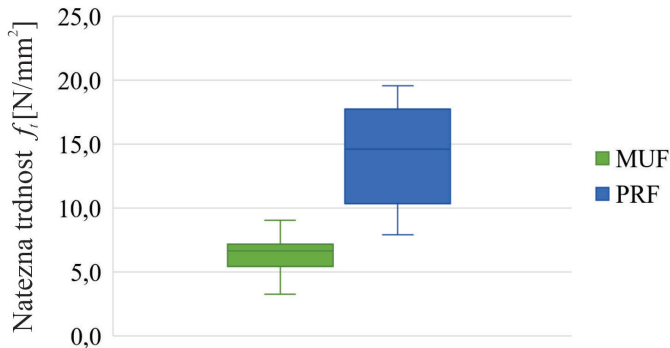
2.2.1 Zobati spoji dolžine 10 mm

Prva serija zobatih spojev je bila izdelana v podjetju MSora, d. d., na deskah s prečnim prerezom 120 x 24 mm. Deske so bile zaradi omejitev strojne opreme naknadno poskobljane na končno širino 70 mm. Dolžina posameznih desk pred lepljenjem je znašala 1,2 m. Povprečna gostota desk, uporabljenih za to serijo, je bila 712 kg/m³. Podjetje zobate spoje uporablja pri spajanju desk za proizvodnjo okenskih in vratnih okvirjev, zato geometrija uporabljenih zobatih spojev ni ustrezala zahtevam standarda SIST EN 14080 [SIST, 2013] za konstrukcijske spoje, kjer je potrebno samozaklinjanje zob in se nosilnost spojev v določeni meri zagotavlja tudi preko trenja. V raziskavi so bili spoji z dolžino spojev $l=10$ mm, širino konice $b_c=2$ mm ter razmikom med zobmi $p=6$ mm uporabljeni predvsem z namenom analize vpliva vrste lepila. Na sliki 3 sta prikazana rezkalni nož (levo) ter izrezan zobati spoj z dolžino 10 mm (desno). Nanos lepila ter stiskanje sta bila izvedena ročno. Preizkušanci so bili nameščeni v stiskalnico, kjer se je lepilo utrjevalo 24 ur. Uporabljeni sta bili lepili MUF in PRF.



Slika 3. Rezkalni nož za 10 mm dolg zobati spoj (levo) in deska z 10 mm dolgim zobatim spojem (desno).

Z nateznimi testi smo izmerili natezno trdnost spojev f_t in po pričakovanih ugotovili nizke vrednosti. Rezultati so prikazani na sliki 4, kjer je razlika med MUF- in PRF-lepilom očitna. S statističnim testom ANOVA smo potrdili, da je vpliv vrste lepila na natezno trdnost statistično značilen (dejansko tveganje manjše od 0,0004). V povprečju razlika med lepiloma znaša 1:2,3 v prid lepilu PRF. Maksimalna izmerjena natezna trdnost za lepilo MUF je bila 9 N/mm² za PRF pa 19,6 N/mm².



Slika 4. Škatlasti diagram nateznej trdnosti 10 mm dolgih zobatih spojev in različnih vrst lepila.

Večina preizkušancev se je porušila po lepilu, le dva preizkušanca z lepilom PRF sta se porušila po stiku, kar pa je bila posledica slabe kakovosti lesa. Natezne trdnosti so bile zelo nizke in nezadostne glede na trdnosti bukovega lesa, ki v povprečju znašajo 72 N/mm². Geometrija z 10 mm dolgimi zobatimi spoji je torej neustrezna za uporabo pri lepljenju bukovega lesa.

2.2.2 Zobati spoji dolžine 18 mm

Druga geometrija zobatega spoja je enaka tisti, ki se uporablja pri proizvodnji zobatih spojev v podjetju Hoja, d. d., kjer proizvajajo lamelirane lepljene nosilce iz lesa iglavcev. Preizkušanci so bili izdelani na deskah s prečnim prerezo 120 x 24 mm. Povprečna gostota uporabljenih desk je bila 684 kg/m³, vlažnost lesa, izmerjena po metodi sušenja v peči, kot je predpisano v standardu EN 13183-1 [SIST, 2003], pa je bila 9,6 %. Geometrija zobatih spojev je bila $l=18$ mm, $b_t=1$ mm ter enakim razmikom med zobmi, $p=6$ mm, kot v primeru 10 mm dolgih spojev. 18 mm dolgi spoji so v primerjavi z 10 mm dolgimi spoji ostrejši z manjšim naklonom α . Rezanje in stiskanje zobatih spojev je bilo v celoti avtomatizirano. Na sliki 5 sta prikazana rezkalni nož (levo) ter izrezan zobati spoj (desno). Pri 26 preizkušancih smo ročno nanесли lepilo PRF, pri 53 pa je bil nanos lepila MUF avtomatiziran in izveden znotraj neprekinjene proizvodnje linije, saj se to lepilo uporablja v redni proizvodnji nosilcev iz lesa iglavcev v podjetju Hoja, d. d. Da bi lahko ocenili vpliv tlaka na končno trdnost, smo preizkušance z lepilom MUF stiskali pri dveh različnih tlakih, 5 in 10 N/mm².

Z nateznimi testi smo izmerili natezne trdnosti zobatih spojev f_t in statični modul elastičnosti E_t v skladu z navodili standarda SIST EN 408 [SIST, 2012]. Dolžina testiranega območja med kleščami je bila 1200 mm, zobati spoji pa so bili na sredini razpona. Deformacije lepljenega zobatega spoja so zelo majhne in jih je težko izmeriti in izločiti vpliv lesa na vzdolžno deformacijo. Zato smo se odločili, da upoštevamo navodila standarda [SIST 2012] za merjenje modula elastičnosti lesenih desk in sicer z indukcijskimi merilniki pomikov ali LVDT-ji. Merilniki so bili nameščeni tako, da je bil zobati spoj na sredini razpona merilnikov. Treba je poudariti, da je zaradi relativno velikega razpona merjenja pomikov (dolžina LVDT-jev), ki je znašal 600 mm,



Slika 5. Rezkalni nož za 18 mm dolg zobati spoj (levo) in deska z 18 mm dolgim zobatim spojem (desno).



Slika 6. Laboratorijske meritve statičnega modula elastičnosti 18 mm dolgega zobatega spoja z LVDT-merilniki.

izmerjeni modul elastičnosti v večji meri predstavljal modul elastičnosti deske in ne neposredno modula elastičnosti zobatega spoja. Merjenje modula elastičnosti v nategu E_t je prikazano na sliki 6.

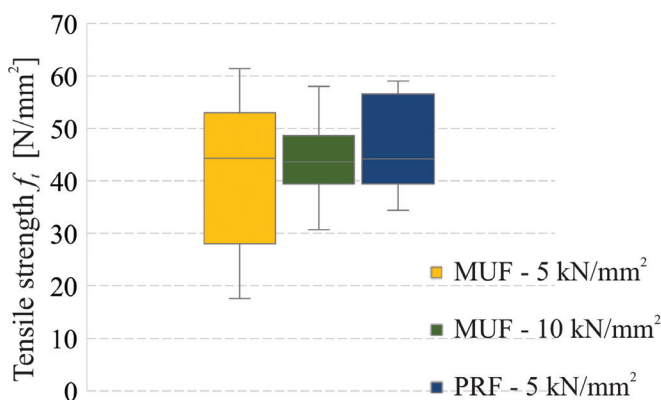
Rezultati nateznej testov so prikazani v preglednici 2 ločeno za preizkušance, ki so se porušili po lesu, in tiste, ki so se porušili po spoju oziroma po lepljenem stiku. Način porušitve je namreč zanesljiv pokazatelj, ali je bila v posameznem preizkušancu dosežena optimalna nosilnost in je prišlo do porušitve lesa in ne spoja. Obenem pa si želimo čim višje vrednosti nosilnosti preizkušancev s porušitvijo v spoju. Srednja vrednost natezne trdnosti vseh preizkušancev je bila 43,4 N/mm². Preizkušanci, ki so se porušili po spoju, imajo višje natezne trdnosti v primerjavi s tistimi, ki so se porušili po lesu.

	Porušitev po lesu			Porušitev po spoju		
	MUF	MUF	PRF	MUF	MUF	PRF
f_t [N/mm ²]	(5 N/mm ²)	(10 N/mm ²)	(10 N/mm ²)	(5 N/mm ²)	(10 N/mm ²)	(10 N/mm ²)
5. centil	23,0	15,3	11,2	23,0	36,7	42,4
Povprečje	42,0	35,5	32,7	47,6	50,5	54,1
St. deviacija	12,3	14,9	16,8	16,5	8,3	10,2
Velikost vzorca	13	9	17	14	17	9
Povprečje E_t [N/mm ²]	17500	16600	16500	17900	18300	17800

Preglednica 2. Statistične vrednosti nateznih trdnosti in nateznega modula elastičnosti, razdeljenih v šest skupin glede na tip lepila, tlak pri stiskanju in način porušitve za 18 mm dolge zobate spoje.

Z analizo variance (ANOVA-test) smo preverili rezultate glede na uporabljeno lepilo in tlak ob stiskanju zobatih spojev. Izkazalo se je, da vrsta lepila nima statistično značilnega vpliva na dosežene trdnosti za stopnjo značilnosti 5 %. Podobno velja tudi za tlak stiskanja spojev. Rezultati so prikazani grafično na sliki 7, kjer je podobnost srednjih vrednosti podvzorcev očitna.

Izmerjene vrednosti statičnega modula elastičnosti zobatih spojev v nategu so bile nekoliko višje od modula elastičnosti bukovih desk. Povprečna vrednost vseh preizkušancev, ne glede na tip porušitve, lepila ali tlaka, je bila 17.600 N/mm², medtem ko je bila povprečna vrednost modula elastičnosti bukovih desk 16.300 N/mm² ([Plos, 2018], [Plos, 2022]). Očitnega razloga za te razlike ni. Ocenjujemo, da bi lahko do določene mere lepilo ojačalo les v območju zobatega spoja vendar tega vpliva nismo mogli ovrednotiti. Zavedati pa se je treba, da 79 preizkušancev v kontekstu merjenja mehanskih lastnosti lesa ne predstavlja velikega vzorca in obstaja možnost, da so višje izmerjene vrednosti modula elastičnosti slučajne oziroma uporabljen les ni bil povsem reprezentativen.



Slika 7. Škatlasti diagram nateznih trdnosti preizkušancev, ki so se porušili v stiku za tri skupine zobatih spojev lepljenih z lepiloma PRF in MUF z dvema tlakoma ob stiskanju.

Kljub relativno visokemu deležu porušitev po lepljenem stiku smo izmerili nekoliko nižje trdnosti kot v podobni raziskavi [Aicher, 2001], kjer je bila povprečna natezna trdnost zobatih spojev 62 N/mm². Iz preglednice 2 opazimo, da je povprečna vrednost nateznih trdnosti preizkušancev, ki so se porušili po

lesu, enaka 36,5 N/mm², kar je bistveno manjša vrednost od poročane za populacijo slovenske bukke [Plos, 2022], kar nakazuje na les slabše kvalitete. Poleg tega smo pri izvedbi nateznih testov upoštevali navodila standarda, ki zahteva testni razpon pri nateznih testih 9h, kjer h predstavlja širino deske. Velik razpon pa poveča verjetnost prisotnosti oslabiljenega lesa znotraj testnega območja.

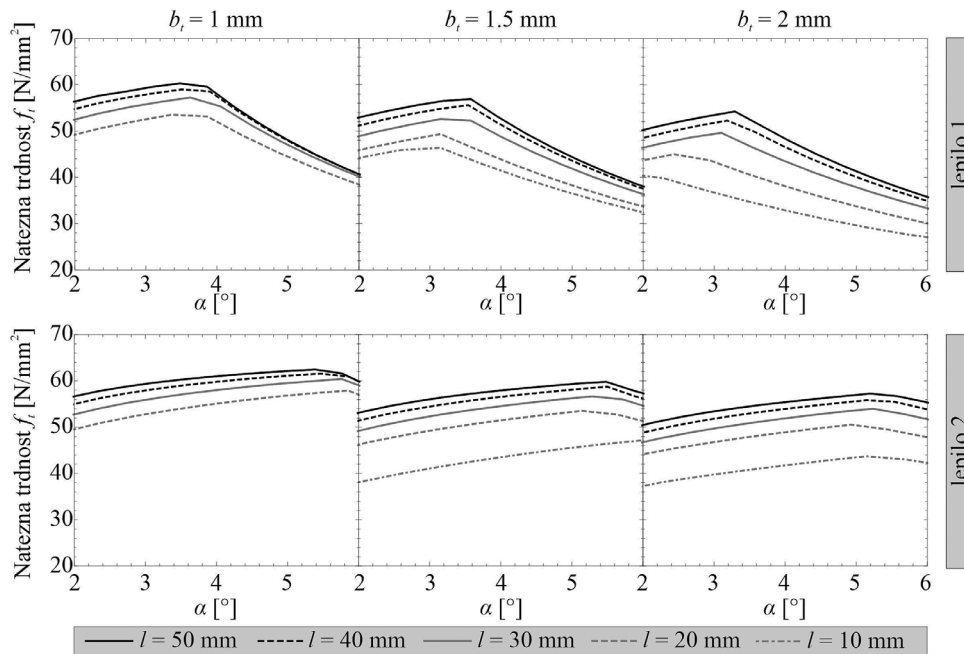
2.2.3 Zobati spoji dolžine 40 mm

Kot je bilo omenjeno v uvodu, je za dolžinsko spajanje lesa z višjimi mehanskimi lastnostmi, predvsem z višjimi nateznimi trdnostmi, potrebna optimizacija geometrije zobatih spojev. Na osnovi numeričnega modela, ki smo ga pripravili v sodelovanju s partnerji projekta TIGR4smart, smo pripravili parametrično študijo vpliva geometrijskih parametrov zobatega spoja in materialnih parametrov dveh različnih lepil na natezno trdnost zobatih spojev. Numerična analiza je podrobneje predstavljena v literaturi [Fortuna, 2020], na tem mestu pa prikazujemo samo rezultate parametrične študije, s katero smo lahko določili optimalnejši profil zobatih spojev glede na pričakovano natezno trdnost. Na osnovi rezultatov parametrične študije, ki so prikazani na sliki 8, smo lahko ocenili optimalne vrednosti glavnih parametrov, ki definirajo geometrijo zobatega spoja. Iz diagramov je lepo razvidna tudi maksimalna natezna trdnost, iz katerih lahko odčitamo vrednosti parametrov za dva tipa lepila z izbranimi mehanskimi lastnostmi. Pri Lepilu 1 smo upoštevali nižje vrednosti (trdnost v smeri normale na stik $\sigma_u=1,6$ N/mm² in strižna trdnost $\tau_1=9,6$ N/mm²) kot pri Lepilu 2 ($\sigma_u=3,0$ N/mm² in $\tau_1=15$ N/mm²), zato so tudi natezne vrednosti spoja nekoliko višje. V splošnem pa velja, da se z dolžino zobatega spoja l natezna trdnost povečuje. Ravno tako se natezna trdnost povečuje z manjšanjem širine konice b_t in tudi naklona zoba α , vendar samo do določene vrednosti. S spreminjanjem geometrije se namreč spremeni tudi način porušitve. V začetnem delu diagrama, levo od maksimalnih nateznih trdnosti, je porušitev spoja pogojena s porušitvijo lesa. V desnem delu pa pride do porušitve v lepljenem stiku. Na osnovi teh rezultatov smo določili nekaj optimalnih vrednosti geometrijskih parametrov: $l=30-50$ mm, $p=5,8-8,4$ mm in $b_t=1-2$ mm, kar ustreza naklonu $\alpha \approx 3,8^\circ$.

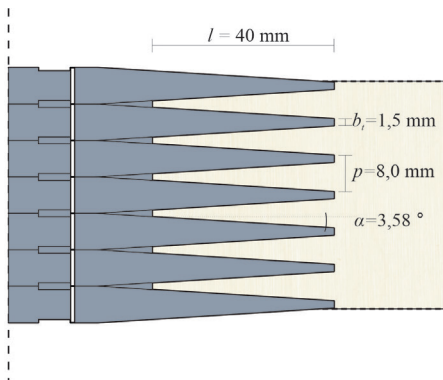
Pri izdelavi rezkalnih nožev za novo geometrijo zobatih spojev smo bili nekoliko omejeni zaradi tehnologije izdelave rezkalnih nožev in tudi zaradi dejstva, da je bukev relativno krhek les,

zato pri vitkih zobeh obstaja nevarnost kršenja. Posledično smo se odločili za geometrijo, ki je definirana z naslednjimi vrednostmi: $l=40$ mm, $p=8,0$ mm in $b_s=1,5$ mm, kar ustreza naklonu $\alpha \approx 3,58^\circ$. Geometrija je prikazana na sliki 9. Glede na rezultate numerične analize zobatih spojev (slika 9) smo ocenili, da lahko s takšno geometrijo pričakujemo natezne trdnosti zobatih spojev med 55 in 60 N/mm².

Štebe, d. o. o. Tudi nanos lepila je bil izveden ročno. Za obe vrsti lepila je bil postopek lepljenja opravljen v skladu z navodili proizvajalca lepil, torej 5 N/mm² za lepilo MUF ter 1,4 N/mm² za lepilo GP. Pritisk je bil nanosen ročno, s stiskalnico, pripravljeno ravno za ta namen (slika 10, levo). Na stiskalnico je bil nameščen silomer za kontrolo nanosa tlaka (slika 10, desno).



Slika 8. Vpliv geometrijskih parametrov konstrukcijskega zobatega spoja in dveh tipov lepil na natezno trdnost zobatega spoja – rezultati parametrične študije z numeričnim modelom [Fortuna, 2020].



Slika 9. Geometrija zobatega spoja, prilagojena za doseganje višjih nateznih trdnosti, ki so pričakovane pri bukovem lesu.

Zobati spoji z dolžino 40 mm so bili izdelani na deskah s prečnim prerezom 100 x 18 mm. Srednja vrednost gostote desk je bila 692 kg/m³. Povprečna vlažnost lesa je bila 11,2 %. Zaradi nestandardnega profila avtomatizirana izdelava preizkušancev ni bila mogoča, zato je ta potekala ročno. Zobati spoji so bili izrezani z rezkalnim nožem, nameščenim na strojno napravo CNC v podjetju Tesarstvo in krovstvo

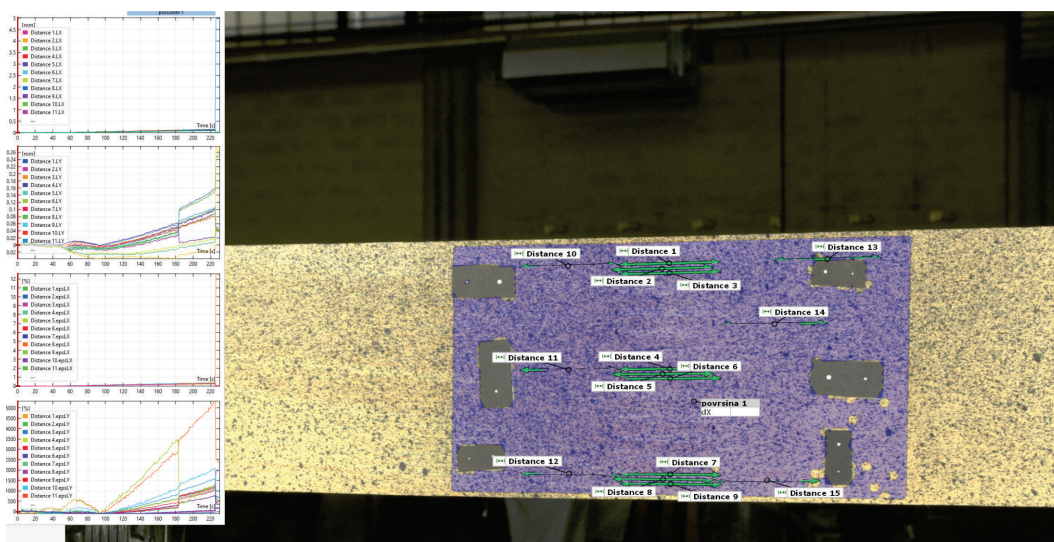
Glede na ugotovitve nateznih testov prvih dveh serij zobatih spojev smo testno postavitev pri 40 mm dolgih zobatih spojih nekoliko prilagodili, in sicer tako, da smo skrajšali testni razpon med kleščami. Na ta način smo natezno obtežbo omejili na manjše območje okrog zobatega spoja. Testni razpon je znašal 500 mm.

Tudi deformacije so bile merjene na manjšem območju, tj. na dolžini zobatega spoja. Moduli elastičnosti, izmerjeni na ta način, so bolj merodajen podatek o togosti zobatega spoja, saj je vpliv togosti lesa bistveno manjši kot v primeru meritev na preizkušancih z 18 mm dolgimi zobatimi spoji. Za merjenje pomikov smo uporabili sistem za optično merjenje pomikov GOM. Fotografije smo zajemali z dvema fotoaparatom Nikon D850 (format slike DX). Fotoaparata sta bila od preizkušancev oddaljena 600 mm. Statični modul elastičnosti 40 mm dolgih zobatih spojev v nategu je bil izmerjen na osnovi relativne deformacije razdalje med izbranimi točkama, ki sta označevali začetek in konec zobatega spoja (slika 11).

Rezultati nateznih testov 40 mm dolgih zobatih spojev so prikazani v preglednici 3, ločeno po skupinah glede na uporabljen tip lepila ter način porušitve, na sliki 12 pa so rezultati prikazani grafično ne glede na tip porušitve. Povprečna natezna trdnost vseh 47 preizkušancev je bila 55,8 N/mm², kar je v skladu z rezultati numeričnega modela zobatega spoja. V



Slika 10. Naprava za izdelavo zobatih spojev (levo) in izdelava preizkušancev – stiskanje pod kontroliranim nanosom tlaka (desno).



Slika 11. Primer vzorca v programu GOM 2018 Professional z označenimi razdaljami za določitev statičnega modula elastičnosti 40 mm dolgih zobatih spojev v nategu.

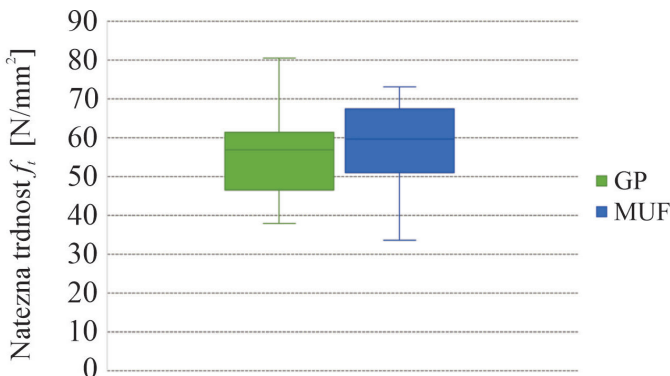
primerjavi z 18 mm dolgimi zobatimi spoji smo dosegli skoraj 50 % višje natezne trdnosti, kar predstavlja znatno izboljšanje. Iz preglednice 3 lahko ugotovimo, da je bil delež porušitve po lesu bistveno višji, hkrati pa so ti preizkušanci dosegali višje natezne trdnosti kot v primeru krajših zobatih spojev. Ocenjujemo, da je spremenjena testna postavitev bistveno pripomogla k izboljšanju nateznih trdnosti preizkušancev, ki so se porušili po lesu.

Podobno kot pri 18 mm dolgih zobatih spojih vrsta lepila tudi pri daljših zobatih spojih ni imela statistično značilnega vpliva na njihove natezne trdnosti (slika 12), kar smo preverili s testom ANOVA z dejanskim tveganjem 0,45. Povprečna vrednost trdnosti za preizkušance z lepilom MUF je bila 56,8 N/mm² za preizkušance z lepilom GP pa 55,0 N/mm², medtem ko so posamezni preizkušanci z lepilom GP dosegli višje trdnosti. Iz primerjave rezultatov nateznih trdnosti 18 mm dolgih zobatih spojev iz preglednice 2 ter 40 mm dolgih zobatih spojev iz preglednice 3 lahko opazimo, da smo

f_t [N/mm ²]	Porušitev po lesu		Porušitev po spoju	
	GP	MUF	GP	MUF
5. centil	38,1	31,0	59,6	52,3
Povprečje	52,9	53,3	64,1	63,0
St. deviacija	13,0	14,6	7,0	7,9
Velikost vzorca	22	14	2	8
Povprečje E_t [N/mm²]	12400	11500	12900	12300

Preglednica 3. Statistične vrednosti nateznih trdnosti in nateznega modula elastičnosti zobatih spojev, razdeljenih v štiri skupine glede na tip lepila in način porušitve za 40 mm dolge zobate spoje.

z daljšimi zobatimi spoji dosegli višje natezne trdnosti. Direktno primerjavo lahko naredimo za lepilo MUF. Pri krajših zobatih spojih je bila karakteristična natezna trdnost zobatih spojev, ki so se porušili po spoju $36,7 \text{ N/mm}^2$, pri daljših pa $52,3 \text{ N/mm}^2$. Tudi povprečna vrednost natezних trdnosti zobatih spojev se je povečala za več kot 24 %. Sklepamo lahko, da se s povečevanjem dolžine in manjšanjem naklona spojev vpliv lepila zmanjšuje, kar je bilo nakazano tudi z rezultati numeričnega modela.



Slika 12. Škatlasti diagram natezних trdnosti 40 mm dolgih zobatih spojev, lepljenih z dvema različnima lepiloma, GP in MUF.

2.3 Upogibni testi lameliranih lepljenih nosilcev

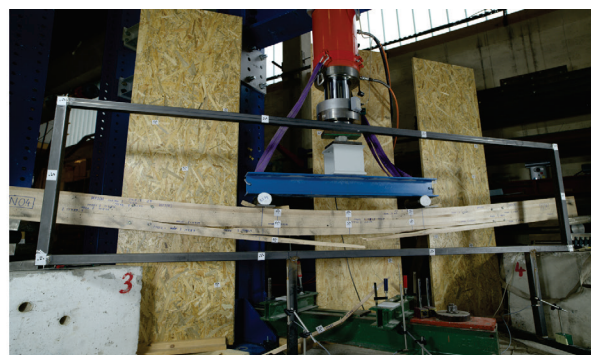
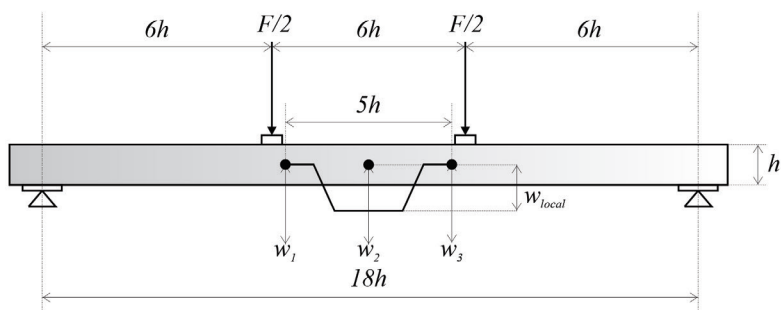
Lamelirane lepljene nosilce smo testirali s štiritočkovnim upogibnim testom v skladu z navodili standarda SIST EN 408 [SIST, 2012] (slika 13, levo) za določanje osnovnih mehanskih lastnosti konstrukcijskega lesa in lameliranih lepljenih elementov. Upogibni testi so bili izvedeni na dveh skupinah lepljenih nosilcev, ki so se med seboj razlikovali v dolžini zobatih spojev, uporabljenih pri izdelavi lamel za nosilce. V podjetju Hoja, d. d., smo izdelali 10 nosilcev z zobatimi spoji dolžine 18 mm ter 4 nosilce z zobatimi spoji dolžine 40 mm. Lamelle za slednjo skupino nosilcev smo dolžinsko spojili v

podjetju Krovstvo in tesarstvo Štebe, d. o. o. Lamelle so bile nato skobljane na končno debelino in zlepljene v podjetju Hoja, d. d. Vsi nosilci so bili sestavljeni iz 10 lamel debeline 18 mm. Prečni preizkušani nosilcev je bil $180 \times 100 \text{ mm}$, dolžina nosilcev pa 3,6 m. Pri vseh nosilcih je bilo uporabljeno lepilo MUF.

2.3.1 Lamelirani lepljeni nosilci z 18 mm dolgimi zobatimi spoji

V skupini lepljenih nosilcev s standardno geometrijo zobatih spojev so bili le ti razporejeni naključno. Rezultati upogibnih testov so prikazani v preglednici 4. Prikazane so statistične vrednosti za izmerjeno upogibno trdnost ter korigirano upogibno trdnost, kjer je upoštevan tudi faktor k_h zaradi višine nosilca, ki je različna od 600 mm. To je postopek, ki ga zahteva standard EN 14080 [SIST, 2013] za določitev nosilnosti lameliranih lepljenih nosilcev. Ta je potreben, če želimo objektivno ovrednotiti trdnost nosilcev in jih razvrstiti v trdnostne razrede. Tako je možna primerjava s trdnostmi certificiranih konstrukcijskih elementov, ki se uporabljajo v grajenem okolju. Karakteristična vrednost (5. centil) je eden izmed ključnih podatkov pri razvrščanju v trdnostne razrede. Ker gre za relativno majhen vzorec, smo jo določili ob predpostavki, da je trdnost porazdeljena po logaritemsko normalni porazdelitvi. Upogibni modul elastičnosti nosilcev smo merili z LVDT-merilniki (slika 13, desno). Povprečna vrednosti lokalnega modula elastičnosti 10 nosilcev je bila 13.200 N/mm^2 , globalnega pa 14.900 N/mm^2 .

Visoke izmerjene mehanske lastnosti lameliranih lepljenih nosilcev dokazujejo dober potencial bukovega lesa v nosilnih konstrukcijah že brez posebnih modifikacij proizvodnje ali spremembe geometrije zobatih spojev. Karakteristična vrednost izmerjenih upogibnih trdnosti nosilcev je bila $37,5 \text{ N/mm}^2$, na osnovi česar bi nosilce lahko razvrstili v trdnostni razred GL35. Poudariti je treba, da to ni končna razvrstitev v trdnostne razrede, ki bi v celoti izpolnjevala kriterije standardov na tem področju, saj bi bilo treba upoštevati še modul elastičnosti ter gostoto nosilcev, poleg tega gre za relativno majhen vzorec preizkušancev.



Slika 13. Testna postavitve za določitev lokalnega in globalnega modula elastičnosti ter upogibne trdnosti lameliranih lepljenih nosilcev. Levo: Shema upogibnih testov (povzeto po EN 408). Desno: Izvedba upogibnih testov v laboratoriju.

	f_b [N/mm ²]	$f_b * k_h$ [N/mm ²]
Min	43,3	39,0
Max	84,2	75,8
Povprečna vrednost	62,1	55,9
5. centil (Lognormalna porazdelitev)	37,4	35,7
St. deviacija	12,8	11,5
Velikost vzorca	10	

Preglednica 4. Statistične vrednosti eksperimentalno izmerjenih upogibnih trdnosti ter trdnosti z upoštevanjem k_h faktorja [SIST, 2013] lameliranih lepljenih nosilcev s zobatih spojev z dolžino 18 mm (standardno geometrija).

2.3.2 Lamelirani lepljeni nosilci s 40 mm dolgimi zobatimi spoji

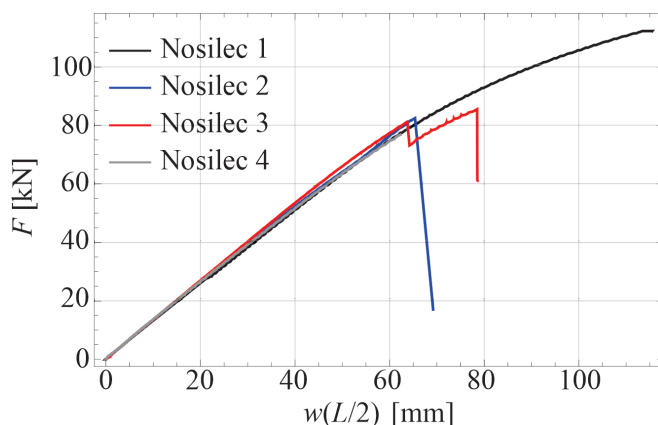
V drugi seriji smo izdelali 4 lamelirane lepljene nosilce. Posamezne lamele smo zlepili ročno s pomočjo pripravljene stiskalnice, kot je bila prikazana na sliki 10. Posamezne lamele so nato zlepili v nosilce v podjetju Hoja, d. d. V seriji nosilcev s 40 mm dolgimi zobatimi spoji njihov položaj v spodnji lameli ni bil naključen. Pri treh nosilcih so bili zobati spoji načrtovani v območju največjih momentov, torej v srednji tretjini nosilca. Pri enem izmed nosilcev pa spoja v spodnji lameli ni bilo oziroma je bil v bližini podpore, kjer so upogibni momenti majhni, torej zobati spoj nima pomembnega vpliva na obnašanje nosilca. Pomiki so bili merjeni z optičnim sistemom GOM.

Kljub dejstvu, da so bile lamele izdelane ročno, smo z upogibnimi testi nosilcev dokazali visoke upogibne trdnosti. Najnižja izmerjena upogibna trdnost nosilcev je bila 77,5 N/mm², najvišja pa kar 112,5 N/mm². Povprečje je znašalo 89,6 N/mm² z relativno majhno standardno deviacijo. Ker gre za majhno število preizkušancev, so v preglednici 5 po-

	f_b [N/mm ²]	$f_b * k_h$ [N/mm ²]
Nosilec 1	112,5	101,3
Nosilec 2	82,9	74,6
Nosilec 3	81,2	77,0
Nosilec 4	77,5	69,7
Povprečna vrednost	89,6	79,7
5. centil (Lognormalna porazdelitev)	57,1	51,4
St. deviacija	16,2	14,5

Preglednica 5. Statistične vrednosti o eksperimentalno izmerjenih upogibnih trdnostih lameliranih lepljenih nosilcev z optimizirano geometrijo zobatih spojev z dolžino 40 mm ter upogibnih trdnostih nosilcev z upoštevanjem k_h faktorja [SIST, 2013].

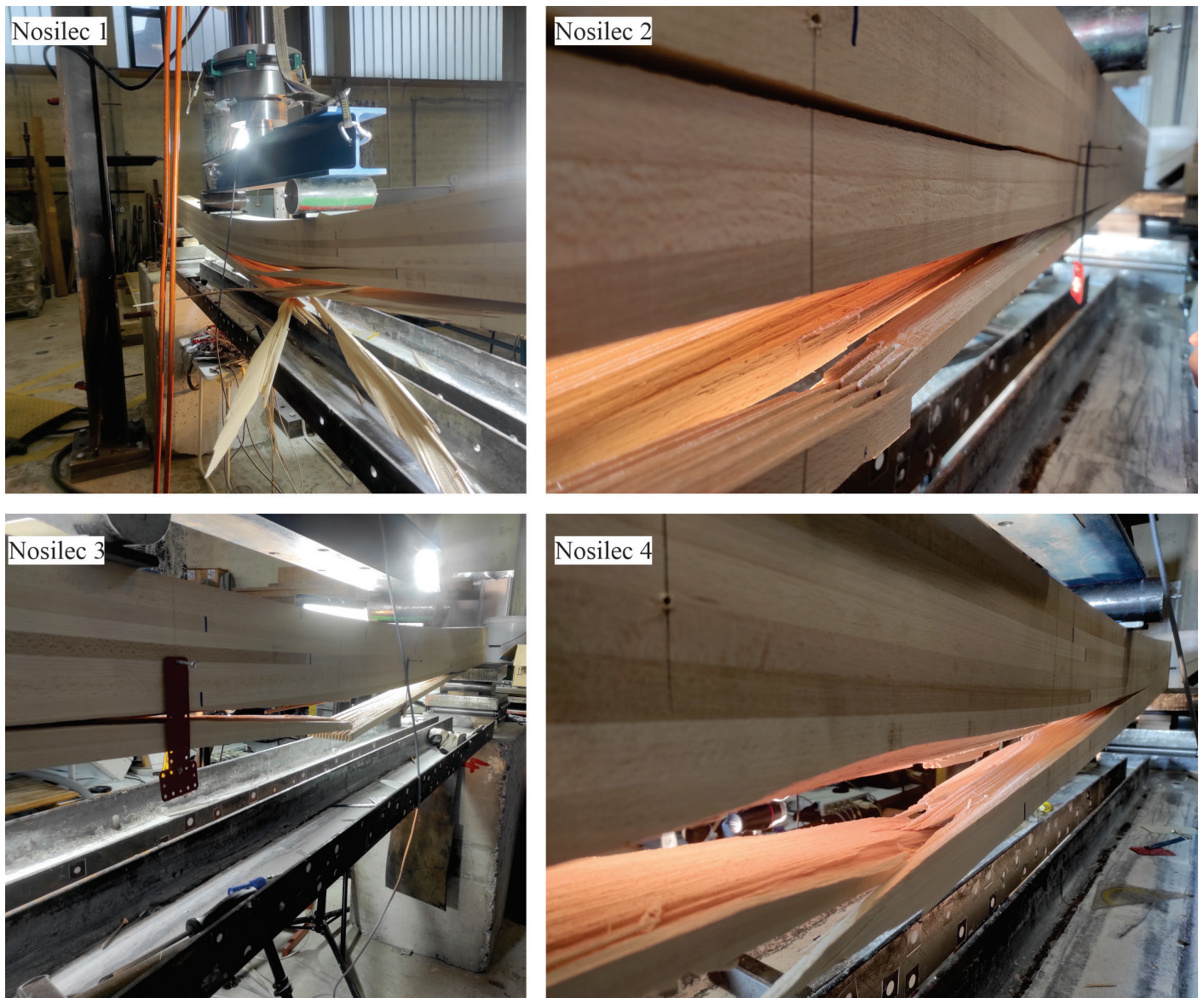
dane posamezne izmerjene vrednosti. Vidimo lahko, da je odstopal en preizkušanec, in sicer tisti, ki ni imel zobatega spoja v spodnji lameli. S slike 14 pa je viden podoben odziv vseh nosilcev, saj je togost vseh štirih zelo podobna. Najmanjši izmerjeni modul elastičnosti je bil 22.500 N/mm², največji pa 23.500 N/mm², s povprečjem 23.000 N/mm². Podoben odziv je ena izmed prednosti lepljenih nosilcev, saj se z lepljenjem zmanjša vpliv posameznih lokalnih nepravilnosti (grče, povečan odklon vlaken ipd.), ki lahko bistveno vplivajo na mehanski odziv. To se kaže preko manjšega raztrosa mehanskih lastnosti.



Slika 14. Izmerjene krivulje obtežba/navpični pomik na sredini razpona upogibno obremenjenih nosilcev.

Iz oblike krivulje obtežba/pomik je opazen izrazito nelinearen odziv nosilca 1, ki ni imel zobatih spojev v spodnji lameli. Ker smo vertikalne pomike med obremenjevanjem merili na sprednji in zadnji strani nosilcev smo lahko opazili, da izmerjena pomika nista bila enaka, saj je prišlo do izbočenja nosilca. Drugi razlog, ki bi lahko vplival na nelinearen potek krivulje pa je možen začetek plastifikacije zgornjega sloja nosilca v tlaku, vendar tega z meritvami nismo zaznali. Porušitve posameznih nosilcev so prikazane na sliki 15.

Če predpostavimo, da je upogibna trdnost porazdeljena po logaritemsko normalni porazdelitvi, določimo 5. centil kot karakteristično upogibno trdnosti, s katero bi lahko nosilce uvrstili v trdnostni razred GL 55. S tem smo dosegli skoraj 40-% izboljšanje upogibnih trdnosti samo s prilagoditvijo geometrije zobatih spojev.



Slika 15. Porušitve vseh štirih nosilcev s 40 mm dolgimi zobatimi spoji. Pri vseh nosilcih je prišlo do začetka porušitve v zobatem spoju, razen pri nosilcu 1.

3 SKLEP

V sklopu raziskave, kjer smo opravili laboratorijske teste različnih geometrij zobatih spojev, ki se uporabljajo pri spajanju desk za izdelavo lameliranih lepljenih nosilcev, smo dokazali, da je uporaba v konstrukcijske namene mogoča in smiselna predvsem, ko potrebujemo visoke nosilnosti pri relativno majhnih prečnih prerezi. V primerjavi z obstoječim stanjem, kjer je mogoča izdelava lepljenih elementov iz lesa iglavcev in topola do trdnostnega razreda GL 32, je z uporabo slovenskega bukovega lesa možno doseči tudi do 70 % višje trdnosti lameliranih lepljenih nosilcev, kar pomeni bistveno izboljšavo. Za doseg višjih trdnosti nosilcev je treba uporabiti prilagojeno geometrijo zobatih spojev, katerih natezna trdnost običajno neposredno omejuje upogibno trdnost lameliranih lepljenih

nosilcev. Pokazali smo, da so lepila, ki se trenutno uporabljajo pri proizvodnji lepljenih konstrukcijskih elementov iz lesa, predvsem iglavcev, ustrezna in nimajo bistvenega vpliva na končne trdnosti tovrstnih elementov.

Bukov les pa vseeno predstavlja izziv za tehnologijo proizvodnje, saj njegova trdota povzroča hitro obrabo strojne opreme (rezkalnih nožev). Množična proizvodnja zato v tej fazi še ni smiselna in glede na manjkajočo evropsko standardizacijo na področju lepljenja konstrukcijskih elementov iz lesa listavcev sploh še ni možna. Tovrstne raziskave pa pripomorejo ravno k povečanju baze podatkov, ki je nujno potrebna pri pripravi standardov in nakazujejo, da je uporaba bukovega lesa smiselna za izdelavo visoko nosilnih konstrukcijskih elementov. Na ta način bukovi les, ki je v slovenskih gozdovih zelo dobro zastopan, pridobiva dodano vrednost.

4 DODATEK – RAZLAGA KRATIC

V prispevku so uporabljene naslednje kratice:

- ANOVA – analiza variance,
- MUF – melamin-urea-formaldehid,
- PRF – fenol-resorcinol-formaldehid,
- GP – Grip Pro (lepilo tipa melamin formaldehid).

5 ZAHVALA

Zahvaljujemo se Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za zagotovitev finančne podpore v sklopu programa P2-0260 in programu Mladi raziskovalci. Zahvala tudi Ministrstvu za izobraževanje, znanost in šport za financiranje projekta TIGR4smart. Posebna zahvala tudi vsem sodelavcem v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter Mitji Plosu, Tamari Šuligoj, Žigi Kroflu in Borisu Azinoviču iz Zavoda za gradbeništvo Slovenije.

6 LITERATURA

Aicher, S., Höfflin, L., Behrens, W., A study on tension strength of finger joints in beech wood laminations, *Otto-Graf-Journal*, 12, 169-186, <https://www.researchgate.net/publication/237529522>, 2001.

Aicher, S., Structural Adhesive Joints Including Glued-in Bolts, In S. Thelandersson & H. J. Larsen (Eds.), *Timber Engineering* (pp. 333-363). Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., Frangi, A., Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT, In *International net-work on timber engineering research INTER - Meeting 49*, 29-42, Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/311457058>, 2016.

Ehrhart, T., Steiger, R., Palma, P., Frangi, A., Estimation of the tensile strength of European beech timber boards based on density, dynamic modulus of elasticity and local fibre orientation, *Proceedings of the 2018 World Conference on Timber Engineering*, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000286967>, 2018a.

Ehrhart, T., Steiger, R., Palma, P., Frangi, A., Mechanical properties of European beech glued laminated timber. Paper 51-12-4, In *International net-work on timber engineering research INTER—meeting 51*, 2018b.

Fortuna, B., Plos, M., Šuligoj, T., Turk, G., Mechanical Properties of Slovenian Structural Beech timber, In *Proceedings of the 2018 World Conference on Timber Engineering*. Seoul, South Korea: World Conference on Timber Engineering, 2018.

Fortuna, B., Azinović, B., Plos, M., Šuligoj, T., Turk, G., Tension strength capacity of finger joined beech lamellas, *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(5), 985-994, <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01588-9>, 2020.

Frese, M., Blaß, H. J., Characteristic bending strength of beech glulam, *Materials and Structures*, 40(1), 3-13, <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9117-9>, 2007.

Kovryga, A., Stapel, P., van de Kuilen, J. W. G., Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech, *Wood Material Science & Engineering*, 15(5), 289-302, <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1596158>, 2020.

Plos, M., Fortuna, B., Šuligoj, T., Turk, G., Beech as construction wood, In *Common Foundations 2018 - uniSTem: 6th Congress of Young Researchers in the Field of Civil Engineering and Related Sciences*. Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, <https://doi.org/10.31534/CO/ZT.2018.25>, 2018.

Plos, M., Fortuna, B., Šuligoj, T., Turk, G., From Visual Grading and Dynamic Modulus of European Beech (*Fagus sylvatica*) Logs to Tensile Strength of Boards, *Forests*, 13(1), 77, <https://doi.org/10.3390/f13010077>, 2022.

Repe, A. N., Poljanec, A., Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2020, Ljubljana, 2021.

Sebera, V., Pečnik, J. G., Azinović, B., Milch, J., Huč, S., Wood-adhesive bond loaded in mode II: Experimental and numerical analysis using elasto-plastic and fracture mechanics models, *Holzforschung*, 75(7), 655-667, <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0141>, 2021.

Serrano, E., Mechanical Performance and modelling of Glulam, In S. Thelandersson & H. J. Larsen (Eds.), *Timber Engineering*, 67-79, Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

SIST, SIST EN 13183-1:2003 Moisture content of a piece of sawn timber-Part 1: Determination by oven dry method. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2003.

SIST, SIST EN 408:2010+A1:2012 Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2012.

SIST, SIST EN 14080:2013 - Lesene konstrukcije - Lepljeni lamelirani les in lepljeni masivni les, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2013.

Tran, V. D., Oudjene, M., Méausoone, P. J., Experimental and numerical analyses of the structural response of adhesively reconstituted beech timber beams, *Composite Structures*, 119, 206-217, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.013>, 2015.

Westermayr, M., Stapel, P., van de Kuilen, J.-W., Tensile and Compression Strength of Small Cross Section Beech (*Fagus s.*) Glulam Members. Paper 51-12-4, *International Net-Work on Timber Engineering Research INTER - Meeting 51*, 307-322, 2018.

FOTOREPORTAŽA IZGRADNJA LOGISTIČNEGA CENTRA TEDI SEŽANA



Slika 1. Logistični center TEDI Sežana v izgradnji.

Lokacija: Industrijska cona Sežana

Investitor: LOG Center A, d. o. o.

Izvajalec del: STRABAG, d. o. o.

Obseg del: Gradbeno-obrtniška in inštalacijska dela

Trajanje del: od maja 2022 do junija 2023

Logistični center TEDI Sežana izvaja podjetje STRABAG, d. o. o., po sistemu design&build. S svojimi 151 m širine in 409 m dolžine ter približno 65.000 m² uporabne površine bo največji logistični center in tudi eden največjih objektov v Sloveniji. Projekt zajema projektiranje in izvedbo gradbenih in obrtniških del, elektro in strojnih inštalacij, komunalne in tehnične infrastrukture ter zunanje ureditve.

Celoten objekt obsega skladišče z regali, upravni del objekta in tri anekse. Skladiščni del objekta je enoetažen, svetle višine 11,90 m. Upravni del centra, ki se nahaja na vzhodnem delu, je predviden v dveh nadstropjih. Preko treh aneksov objekta so urejeni glavni dostopi v halo.



Slika 2. Logistični center s pripadajočo zunanjo ureditvijo v izgradnji.

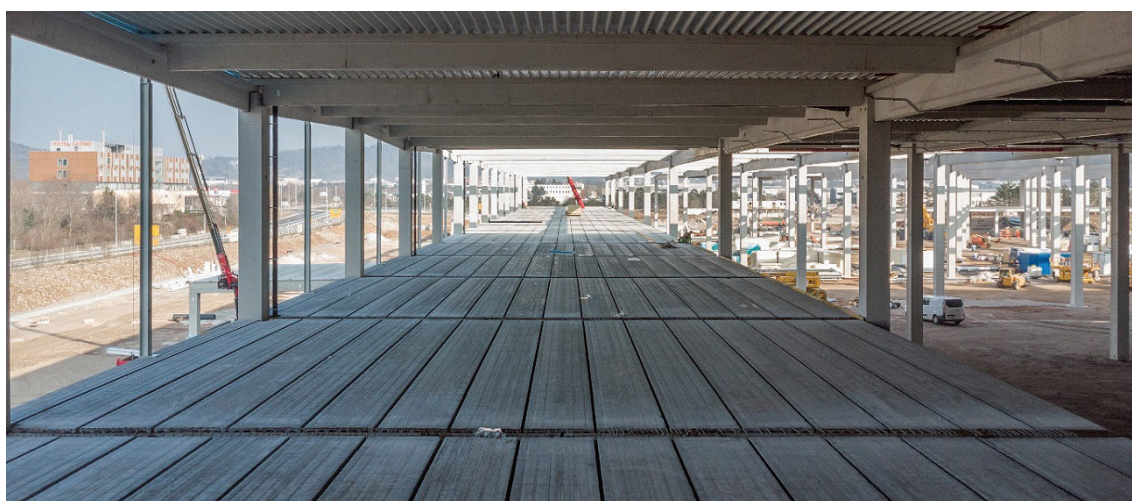
Objekt je plitvo temeljen, s 320-imi čašastimi betonskimi temelji, trdnostnega razreda C30/37. Armiranobetonska konstrukcija je v celoti montažna, sestavljajo jo armiranobetonski stebri, prednapete votle plošče (v območju upravnega oz. pisarniškega dela in dela skladišča na severnem delu objekta), A-nosilci ter sekundarni nosilci, preko katerih se izvaja ravna streha. Tlak v objektu je mikroarmirani beton debeline 18 cm s kvarčnim posipom.



Slika 3. Izvedba temeljev ter priprave na montažo armiranobetonske konstrukcije.



Slika 4 in 5. Montaža armiranobetonske konstrukcije.

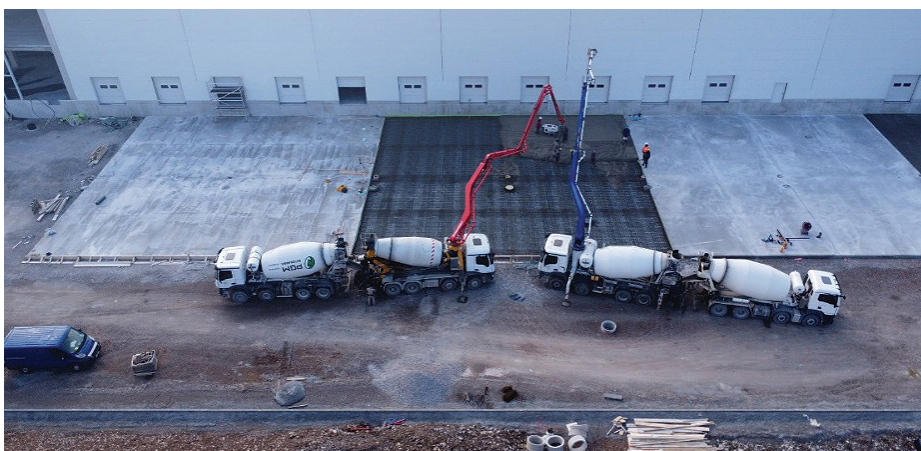


Slika 6. Izvedba medetažne montažne plošče.

Konstrukcijo obkroža armiranobetonski parapetni zid višine 120 cm in debeline 15 cm, na katerem sloni fasada iz t. i. »sendvič« panelov. Na severni in južni strani objekta je predvidenih 105 nakladalnih ramp za tovorna vozila. Okoli objekta so v območju nakladalnih ramp predvidene armiranobetonske plošče debeline 25 cm za težek promet, na transportni poti pa asfaltno vozišče.



Slika 7. Izvedba parapetnih zidov okoli objekta.



Slika 8. Betonaža zunanjih armiranobetonskih plošč.

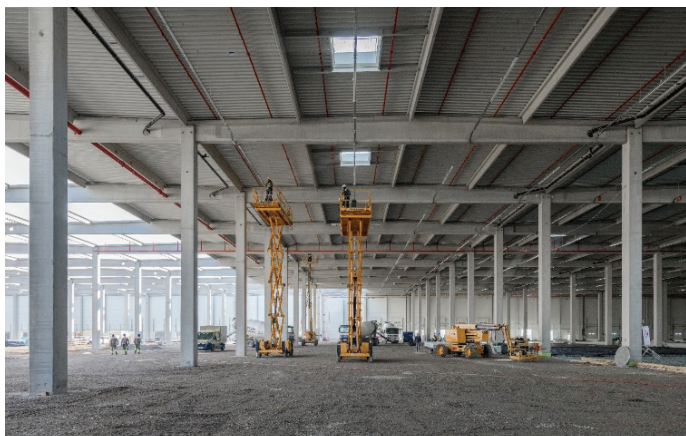
Poleg izgradnje logističnega centra TEDI se izvajajo tudi parkirišče za osebna vozila, kompletna zunanja ureditev objekta ter izgradnja dostopnih poti s pripadajočo tehnično infrastrukturo na površini 75.000 m². Objekt je trenutno v fazi zaključevanja montaže armiranobetonske konstrukcije z nekaj več kot polovico izvedene strehe in fasade in pripadajočih strojnih ter elektro inštalacij. Izvajajo se zunanje armiranobetonske plošče, komunalna infrastruktura in ceste ter zalogovnik požarne vode in transformatorska postaja objekta.



Slika 9. Elementi ravne strehe.



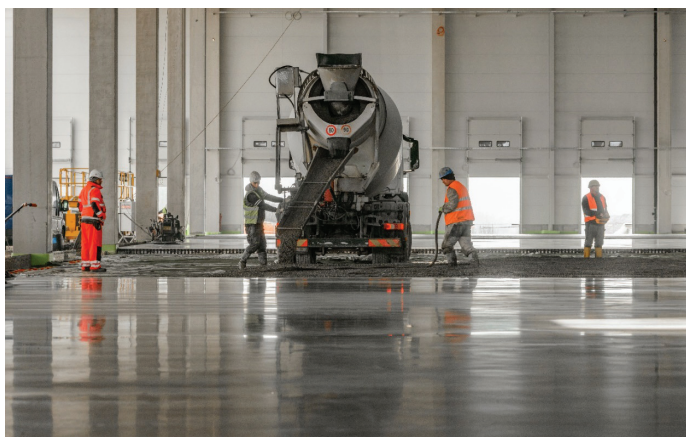
Slika 10. Izvedena streha.



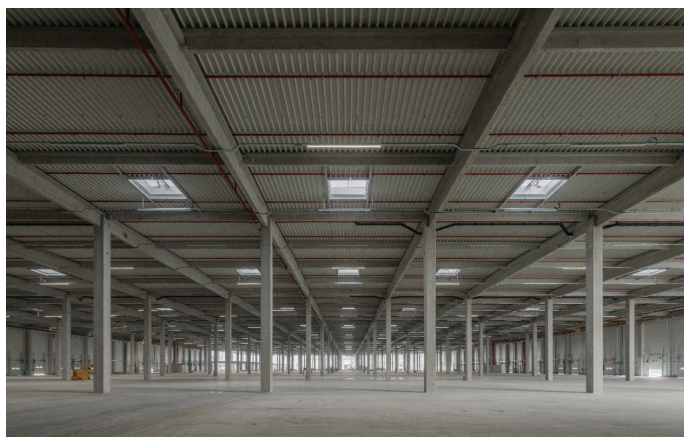
Slika 11. Skladiščna hala s pripadajočimi inštalacijami.



Slika 12. Izvedba inštalaterskih del.



Slika 13. Betoniranje talne plošče v objektu.



Slika 14. Pogled na skladiščno halo s pripadajočimi inštalacijami.

Velik izziv med gradnjo predstavlja teren s številnimi kraškimi jamami globine 40 do 60 m ter logistična organizacija. Predviden zaključek izgradnje je junij 2023.

Fotografije: arhiv podjetja STRABAG, d. o. o.

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Luka Bolčič. Analiza obsega razlivanja poplavnih voda zaradi naraščajoče gladine morja na območju mesta Izola, mentor izr. prof. dr. Simon Rusjan, somentor znan. sod. dr. Andrej Vidmar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=144086>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smeri Gradbene konstrukcije, Geotehnika-hidrotehnika, Nizke gradnje)

Samida Ferizović. Analiza podpornega zidu na južnem portalu predora Vodriž v programu Sofistik, mentor izr. prof. dr. Sebastjan Bratina, somentor izr. prof. dr. Vojkan Jovičič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=143978>

Danijel Jelušič. Požarna odpornost zaščitenih in nezaščitenih jeklenih stebrov, izpostavljenih lokaliziranemu požaru, mentor prof. dr. Tomaž Hozjan, somentor Gregor Udovč;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=143979&lang=slv>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRAJENO OKOLJE

Yaser Chafoori. Optimization of early seepage detection in embankments using a distributed temperature system based on fiber optic sensing, mentor izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, somentor prof. dr. Jaromir Riha;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=144087>

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI GRADBENIŠTVA

Rok Lačen. Teorija uvrtenih pilotov s cevitvijo ter preveritev nosilnosti posameznih pilotov na lokaciji Javornik-nakupovalni center, mentor izr. prof. dr. Primož Jelušič, somentor prof. dr. Bojan Žlender;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=83610&lang=slv>

Jure Kljajič. Nosilnost plitvih temeljev na armirani zemljini, mentor prof. dr. Bojan Žlender, somentor izr. prof. dr. Primož Jelušič;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=83609&lang=slv>

Rubriko ureja **Eva Okorn**, gradb.zveza@siol.net

3.3.2023

GBC Slovenija - Strokovno srečanje " Koraki do trajnostne gradnje s toplotnim ovojem stavbe"

Dol pri Ljubljani, Slovenija
<https://gbc-slovenia.si/dogodki-in-izobrazevanja/strokovno-srecanje-koraki-do-trajnostne-gradnje-s-toplotnim-ovojem-stavbe>

8.-11.3.2023

MEGRA 2023 – 32. mednarodni sejem gradbeništva, energetike, komunale in obrti

Gornja Radgona, Slovenija
www.megra.pomurski-sejem.si

9.3.2023

IZS - Slovenski inženirski dan – Strokovna konferenca "Požarna varnost stavb in infrastrukture"

Ljubljana, Slovenija
www.izs.si/aktualno/slovenski-inzenirski-dan-2023/

13.3.2023

Educenter - Srečanje z ženskami v gradbeništvu

Ljubljana, Slovenija
<https://educenter.si/dogodek/hestia-2/>

17.-20.3.2023

ICBMC 2023 - 8th International Conference on Building Materials and Construction

Kjoto, Japonska
www.icbmc.org

22.-23.3.2023

6. konferenca Biznis in trendi v gradbeništvu

Portorož, Slovenija
<https://akademija-finance.si/konference/gradbena-konferenca/>

4.-6.4.2023

S.ARCH BERLIN – 10th International Conference on Architecture and Built Environment

Berlin, Nemčija
www.s-arch.net/s-arch-berlin

21.4.2023

DGIT Novo mesto – Strokovni posvet "Mostovi povezujejo"

Otočec, Slovenija
www.dgitnm.si

22.-23.5.2023

SMARTINCS'23 - Conference on Self-Healing, Multifunctional and Advanced Repair Technologies in Cementitious Systems

Gent, Belgija
<https://smartincs.ugent.be/index.php/conference>

24.-25.5.2023

Dan ZBS 2023 – 20 let združenja

Lipica, Slovenija
www.zabeton.si

29.-31.5.2023

15th International Conference Underground Construction Prague 2023

Praga, Češka
www.ucprague.com/

7.-9.6.2023

17DECGE – 17th Danube - European Conference on Geotechnical Engineering

Bukarešta, Romunija
<https://17decge.ro/>

25.-28.6.2023

9ICEG - 9th International Congress on Environmental Geotechnics

Hania, Kreta, Grčija
www.iceg2022.org

26.-28.6.2023

NUMGE 2023 - 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering

London, Anglija
www.imperial.ac.uk/numerical-methods-in-geotechnical-engineering/

20.-23.8.2023

INTER-NOISE 2023 — 52nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering

Čiba, Japonska
<https://internoise2023.org>

3.-6.9.2023

IS-PORTO 2023 - 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials

Porto, Portugalska
<https://web.fe.up.pt/~is-porto2023/>

17.-21.9.2023

12ICG - 12th International Conference on Geosynthetics

Rim, Italija
www.12icg-roma.org

18.-22.9.2023

ICCC 2023 — 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023

Bangkok, Tajska
www.iccc2023.org

28.-30.9.2023

11th International Conference on Auditorium Acoustics 2023

Atene, Grčija
<https://auditorium2023.org/>

Rubriko ureja **Eva Okorn**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: gradb.zveza@siol.net