

Primljen / Received: 17.10.2024.

Ispravljen / Corrected: 18.11.2024.

Prihvaćen / Accepted: 25.11.2024.

Dostupno online / Available online: 10.1.2025.

# Izgradnja ceste primjenom drvnog pepela

## Autori:



Prof.dr.sc. **Sanja Dimter**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek  
[sdimter@gfos.hr](mailto:sdimter@gfos.hr)

Autor za korespondenciju



**Goran Kuburić**, ing.stroj.  
Strizivojna Hrast d.o.o., Strizivojna  
[goran.kuburic@strizivojna-hrast.hr](mailto:goran.kuburic@strizivojna-hrast.hr)



**Ernest Ević**, mag.ing.aedif.  
Institut IGH d.d. RC Osijek  
[ernest.ivic@igh.hr](mailto:ernest.ivic@igh.hr)



**Goran Vrhovac**, dipl.ing.građ.  
Institut IGH d.d. RC Osijek  
[goran.vrhovac@igh.hr](mailto:goran.vrhovac@igh.hr)

Prethodno priopćenje

**Sanja Dimter, Goran Kuburić, Ernest Ević, Goran Vrhovac**

## Izgradnja ceste primjenom drvnog pepela

U radu su opisane posebnosti izgradnje pokusne dionice interne ceste u kojoj je drveni pepeo upotrijebljen za poboljšanje nosivosti posteljice te za izvođenje nosivog sloja kolničke konstrukcije. Tijekom izgradnje provedena su laboratorijska ispitivanja te terenska kontrolna ispitivanja. Rezultati su pokazali kako povećanje nosivosti posteljice primjenom stabilizacije drvnim pepelom iznosi 155 do 235 % u odnosu na prirodnu glinovitu posteljicu. Zbog vezivnih svojstava drvnog pepela nosivost posteljice nastavlja rasti i nakon izvedbe te uočeno povećanje nosivosti posteljice (14 dana nakon izvedbe) iznosi od 31 do 39 %. Nosivi sloj izveden od drvnog pepela ostvario je module stišljivosti  $M_s = 60$  do  $80$  MN/m<sup>2</sup> te tako udovoljio kriterijima nosivosti. Iskustva s pokusne dionice potvrđuju potencijal drvnog pepela za primjenu u poboljšanju nosivosti posteljice i za izradu nosivog sloja kolničke konstrukcije te mogu biti poticaj za racionalnije i ekonomičnije projektiranje i izgradnju kolničkih konstrukcija, posebno u područjima s velikim količinama otpadnog pepela iz drvene biomase kakvo je područje Slavonije.

### Ključne riječi:

održivi razvoj, drveni pepeo, interna cesta, pokusna dionica, kontrola kvalitete

Preliminary note

**Sanja Dimter, Goran Kuburić, Ernest Ević, Goran Vrhovac**

## Road building using wood ash

This paper describes the specifics of constructing a test section of an internal road where wood ash was used to improve the bearing capacity of the subgrade and to construct the base layer of the pavement structure. Laboratory testing and field control testing were conducted during the construction. The results showed that the increase in the bearing capacity of the subgrade by applying stabilization with wood ash ranges from 155 to 235 % compared to the natural clay subgrade. Due to the binding properties of wood ash, the bearing capacity of the subgrade continues to increase even after construction, with an observed increase of 31 to 39 % in bearing capacity within 14 days of construction. The base layer made of wood ash of different fractions achieved compressive modulus  $M_s = 60$  to  $80$  MN/m<sup>2</sup>, thus meeting the bearing capacity criteria. The experiences from the test section confirm the potential of wood ash for use in improving subgrade bearing capacity and in the construction of the base layer of pavement structures. This could encourage more rational and economical design and construction of pavement structures, especially in areas with large amounts of waste ash from wood biomass, such as the region of Slavonia.

### Key words:

sustainable development, wood ash, internal road, test section, quality control

## 1. Uvod

Primjena lokalnih materijala, prirodnih ili poboljšanih, u izgradnji kolničkih konstrukcija cesta može znatno racionalizirati troškove izgradnje, ponajprije kroz troškove transporta koji u cijeni materijala mogu biti znatni. Osim lokalnih materijala ekonomičnu izvedbu kolničke konstrukcije moguće je postići i iskorištenjem potencijala otpadnih materijala i industrijskih nusproizvoda koji nastaju kao tehnološki otpad. Radi se o materijalima koji zahtijevaju složeno odlaganje znatnih količina na odlagalištima, a primjena kojih ima znatno ekonomsko opravdanje i jasno se potiče smjernicama održivog razvoja [1]. Primjena nekoga lokalnog materijala, ako on nije obuhvaćen postojećim standardima, zahtijeva i detaljna laboratorijska ispitivanja te izvedbu pokusne dionice i uhođavanje tehnologije izvođenja. Slična je situacija s otpadnim materijalima odnosno industrijskim nusproizvodima. Da bi bili primjenjivi, ti materijali moraju udovoljiti određenim inženjerskim svojstvima, pokazati prihvatljivu razinu izvođenja i biti ekonomično usporedivi s tradicionalnim materijalima [1].

Koncept upotrebe lokalnih materijala, prirodnih ili poboljšanih, ima posebnu ulogu pri izgradnji gospodarskih cesta [2]. Gospodarske ceste su, za razliku od javnih cesta, jednostavne građevine po kojima teče promet vozila i strojeva za potrebe poljoprivrede i šumarstva. Osim za gospodarske ceste upotreba lokalnih materijala važna je i za izgradnju gradilišnih cesta koje svojom nosivošću i stanjem površine moraju osigurati neometanu dinamiku građenja. Obje skupine spomenutih cesta gotovo se uvijek grade uz minimalne troškove i najčešće kao zemljane. Taj način izvedbe svakako je najisplativiji, no s gledišta nosivosti, nije i najbolji. Zemljani zastor izvodi se od lokalnog tla s mjesta gradnje kojemu se, zbog poboljšanja nosivosti i granulometrijskog sastava, mogu dodati krupnija ili sitnija zrna pjeskovito-šljunkovitog materijala ili prašinastog materijala. Ti zastori, iako dovoljne nosivosti pri suhome vremenu, pri kišovitem vremenu postaju znatno deformabilni i, posebno u slučaju glinovitih tala, otežavaju ili onemogućuju kretanje vozila ili strojeva. Zato je povećanje čvrstoće i otpornosti na deformacije neophodno i kako bi se ostvarilo, pribjegava se raznim postupcima stabilizacije. Osim mehaničkom stabilizacijom lokalno tlo moguće je poboljšati kemijski, dodatkom različitih standardnih veziva poput cementa, vapna ili bitumena. Tako stabilizirano tlo može poslužiti kao vozna površina za kretanje vozila i strojeva ili kao podloga za kolničku konstrukciju iznad vozne površine. Pogodnost pojedinog veziva uvjetovana je osnovnim svojstvima tla se u skladu s time vapno koristi za glinovita tla, dok se cement i bitumen upotrebljavaju za stabilizaciju sitnozrnatih nekoherentnih tala. Osim spomenutih tradicionalnih veziva za stabilizaciju moguće je upotrebljavati veziva na bazi sintetičkih polimera, proizvode na bazi encima, ionske proizvode te lignine i smole [3]. To su proizvodi koji se mogu koristiti samostalno ili u kombinaciji s tradicionalnim vezivima (cement, vapno), a koja znatno pospješuju njihovo djelovanje. Bez obzira na vrstu nekog od suvremenih proizvoda u stabilizaciji tla, njihova je cijena

znatno viša od cijene standardnih veziva te je možda i to razlog zašto se u Hrvatskoj ti proizvodi upotrebljavaju vrlo rijetko.

Za razliku od spomenutih veziva i troškova njihove primjene, u ekonomičnome građenju cesta nude se otpadni materijali i industrijski nusproizvodi koji su besplatni, a imaju velik potencijal i mogućnost različite primjene. Neki od materijala, u skupini kojih se ističu leteći pepeo nastao izgaranjem ugljena u termoelektranama ili metalurška zgura, a u novije vrijeme i različite vrste biopepela nastale izgaranjem biomase iz poljoprivrede i šumarstva, posjeduju dobra pucolanska svojstva, što ih čini primjenjivima kao samostalnim vezivima ili kao dodacima vezivu. Primjena tih materijala nudi višestruke koristi te racionalizaciju troškova gradnje kroz:

- smanjenje količine potrebnoga hidrauličnog veziva u mješavini
- poboljšanje svojstava mješavina
- smanjenje količine otpadnog materijala na odlagalištima
- dodavanje vrijednosti otpadnome materijalu [4].

S obzirom na to da je takav nestandardni materijal, drveni pepeo, upotrebljavan u izgradnji pokusne dionice koja je predmet ovog rada, u nastavku rada dan je kratak osvrt na svojstva drvnog pepela te na mogućnost njegove primjene u cestogradnji.

## 2. Drveni pepeo: svojstva i mogućnost primjene

Drveni pepeo nastaje kao ostatak pri spaljivanju drvene biomase za proizvodnju električne i toplinske energije, a sastoji se od postojećih (dio organske strukture ili mineralne čestice dospjele u biomasu prilikom prikupljanja i obrade) i novoformiranih anorganskih tvari koje nastaju u procesu spaljivanja te često manjeg udjela nespaljene organske tvari, vlage i plinova [5]. Europskim katalogom otpada drveni pepeo klasificira se kao bezopasni otpad (trenutačno se u najvećoj mjeri tako i tretira) te odlaze na odlagališta otpada i (u znatno manjoj mjeri) na poljoprivredne i šumske površine. Količine, kvaliteta, fizikalna i kemijska svojstva drvnog pepela ovise o vrsti i spaljivanome dijelu drvene biomase, sadržaju mineralnih nečistoća, lokaciji gdje je biomasa rasla, načinu prikupljanja i obrade biomase, tehnologiji i temperaturi spaljivanja [5]. Tijekom izgaranja biomase nastaju tri različite frakcije pepela: pepeo ložišta, ciklonski leteći pepeo i filterski leteći pepeo. Pepeo ložišta čine najkrupnije frakcije pepela (čestice veće od 100  $\mu\text{m}$ ) koje se prikupljaju pod rešetkom kotla. Često su pomiješane s nečistoćama poput pijeska, zemlje ili pak materijala ležišta kod spaljivanja u fluidiziranome sloju. Ciklonski leteći pepeo krupnija je frakcija letećih pepela (čestice veće od 5  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ ) koja je prenesena dimnim plinovima u sekundarnu zonu spaljivanja. Najfiniju frakciju čini filterski pepeo koji se prikuplja na elektrostatskim filtrima (veličina čestica od 1 do 5  $\mu\text{m}$ ). Potencijal primjene drvnog pepela u građevinarstvu rano je prepoznat i bio je predmetom brojnih istraživanja koja su utvrdila kako djelovanje pepela u mješavinama može biti posredno i neposredno. Pri neposrednome djelovanju

pepeo svojim granulometrijskim sastavom popravljiva sastav osnovnog materijala mješavine (mehanička stabilizacija), dok u posrednome djelovanju pepeo svojim kemijskim sastavom inicira određene kemijske reakcije kao posljedice pucolanske aktivnosti ili hidrauličnog vezanja pepela, a kojima se u konačnici poboljšavaju svojstva mješavine. Udio CaO i pucolana u kemijskome sastavu drvnog pepela upućuje na mogućnost djelomične ili potpune zamjene veziva (cementa i vapna) prilikom stabilizacije slabije nosivih materijala posteljice u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija ili u betonskim mješavinama. U slučaju nešto slabijeg učinka u mješavini pepelu se kao aktivator može dodati cement ili vapno [5]. Osim kao vezivo drveni pepeo može se upotrebljavati kao zamjena za mineralno punilo u asfaltnim mješavinama [6, 7] ili kao agregat u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija [8]. Mjesto primjene ovisit će o frakciji drvnog pepela.

Najbrojnija istraživanja primjene biopepela u cestogradnji provedena su u stabilizaciji glinovitih i pjeskovitih materijala posteljice, a rezultati su pokazali kako se udio tradicionalnih veziva za stabilizaciju posteljice (vapna ili cementa) može znatno smanjiti odnosno u cijelosti zamijeniti drvnim pepelom, a da pri tome inženjerska svojstva mješavina ostanu u traženim granicama [9-16].

Ciklonski leteći pepeli i pepeli ložišta našli su svoju primjenu u nosivim slojevima kolničke konstrukcije gdje mogu poboljšati nosivost i ponašanje sloja kroz učinak mehaničke stabilizacije ili svojim vezivnim svojstvima. Istraživala se i mogućnosti primjene različitih frakcija biopepela u nevezanim i cementom stabiliziranim nosivim slojevima kolničke konstrukcije [8, 16-23], a dobiveni rezultati upućuju na poboljšana fizikalno-mehanička inženjerska svojstva mješavina s dodatkom biopepela.

Dobra inozemna iskustva i rezultati istraživanja primjene drvnog pepela potaknula su 2017. suradnju Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek s tvrtkom *Strizivojna Hrast* d.o.o. iz Strizivojne, kada su i provedena prva ispitivanja stabilizacije s pepelom [9]. Suradnja se intenzivirala i proširila provedbom znanstvenoistraživačkog projekta pod nazivom „Primjena pepela

iz drvene biomase u nosivim slojevima kolničke konstrukcije (BioPAV)“ 2019. [24]. Interes za suradnju bio je obostran: utvrditi u kojoj je mjeri moguće iskoristiti potencijal drvnog pepela u održivoj gradnji cesta te na taj način potaknuti ekonomičniju i racionalniju izgradnju cesta i u konačnici pridonijeti dobrobiti gospodarstva regije odnosno županije. Nakon provedenih potpunih laboratorijskih istraživanja s drvnim pepelom, na različitim mješavinama i za različite slojeve, izvedena je pokusna dionica na internoj cesti u krugu tvornice *Strizivojna Hrast* d.o.o.

### 3. Izgradnja pokusne dionice interne ceste primjenom drvnog pepela

#### 3.1. Općenito

*Strizivojna Hrast* d.o.o. jest tvrtka osnovana 1996. u Strizivojni, mjestu nedaleko od Đakova u Osječko-baranjskoj županiji, a koja se bavi preradom drveta i proizvodnjom parketa i drugih proizvoda od drveta. Industrijsko postrojenje tvrtke *Strizivojna Hrast* d.o.o. prostire se na površini od 5,6 ha, a čine ga pilana, radionice za proizvodnju drvnih proizvoda, natkrivene nadstrešnice za prirodno sušenje drvnih elemenata i ostale prateće građevine te kogeneracijsko postrojenje za proizvodnju električne i toplinske energije [25] (slika 1.).

Dnevno se u kogeneracijskome postrojenju spaljuje oko 110 t drvene biomase i količine drvnog pepela koje svakodnevno nastaju su znatne. Na godišnjoj razini količina nastalog drvnog pepela iznosi oko 700 t. Drvnu masu koja se upotrebljava kao gorivo čini otpad od drveta i kore nastao pri preradi i proizvodnji drvnih proizvoda i drvene sječke (šumska biomasa), pri čemu se koristi isključivo čista, netretirana drvena biomasa. Kogeneracijsko postrojenje s 3,3 MW električne energije i 2 x 3 MW toplinske energije ujedno je prvo kogeneracijsko postrojenje na biomasu pušteno u pogon u Hrvatskoj 2011. [25]. Trenutačno je drveni pepeo upisan u očevidnik nusproizvoda pod rednim brojem NUS 268 [27] te se upotrebljava u poljoprivredne svrhe kao gnojivo, poboljšivač tla i za neutralizaciju kiselosti tla.



Slika 1. Industrijski kompleks tvrtke *Strizivojna Hrast* d.o.o. u Strizivojni s položajem pokusne dionice [26]

Od 2013. do danas, u više navrata, u krugu tvornice *Strizivojna Hrast* d.o.o. gradile su se kolničke konstrukcije internih cesta i prometnih površina s nosivim slojevima od drvnog pepela [25]. Ideja o toj primjeni bila je potaknuta velikom količinom drvnog pepela na odlagalištu i zaposlenici tvrtke su, bez prethodnih saznanja o pogodnosti drvnog pepela za izgradnju cesta, odlučili izgraditi ceste i prometne površine uz minimalna ulaganja. Kolničke konstrukcije bile su različitih debljina i sastava. Nosivi sloj od drvnog pepela izvodio se u debljinama 50 – 100 cm, a zastor je izveden od mješavine drobljenog kamena u debljini 10 cm. Pojedine kolničke konstrukcije bile su izgrađene bez zastora od drobljenog kamena, samo s nosivim slojem od drvnog pepela. Prateći ponašanje internih cesta i prometnih površina stalno izloženih kretanju teških teretnih vozila i kontrolirajući njihovu nosivost utvrđeno je kako ceste udovoljavaju zahtjevima nosivosti i omogućuju neometan promet vozila. Izmjereni moduli stišljivosti na nevezanome kamenom zastoru iznosili su 50 – 100 MPa [25].

### 3.2. Izgradnja pokusne dionice

Mjesto za gradnju pokusne dionice odabrano je na temelju razgovora s predstavnicima tvornice, a smješteno je na račvanju pristupnih cesta (slika 1.) kojima svakodnevno voze teška teretna vozila. Pristupne ceste (njih pet) širine su 4 m i duljine 200 m te je promet na njima organiziran kružno. S obje strane pristupnih cesta odlažu se drveni trupci, a po cestama svakodnevno vozi 8 do 10 teških teretnih vozila sa šumarskim prikolicama mase 36 do 40 t.

U lipnju 2023. započela je izgradnja pokusne dionice, pri čemu se drveni pepeo koriste za izvedbu nosivog sloja i za poboljšanje zemljane posteljice [28]. U izgradnji koristio se miješani drveni pepeo (mješavina svih triju frakcija drvnog pepela) s odlagališta u neposrednoj blizini pokusne dionice.

Pokusna dionica površine 80 m<sup>2</sup> bila je građena u dvije faze. Probno polje 1, u kojemu je kolnička konstrukcija izvedena u prirodnoj posteljici, izgrađeno je u lipnju 2023., a u rujnu iste godine izgrađeno je probno polje 2, s posteljom poboljšanom dodatkom drvnog pepela (slika 2.). Sve radove na iskopima, planiranju, miješanju i zbijanju izveli su radnici tvrtke *Strizivojna Hrast* d.o.o. mehanizacijom koja im je u tome trenutku bila na raspolaganju.

#### 3.2.1. Svojstva tla na kojemu je izgrađena pokusna dionica

Pokusna dionica izvedena je u srednje plastičnoj anorganskoj glini Cl, čija je prirodna vlažnost iznosila 24,4 %. Granica tečenja materijala tla iznosila je 39,99 %, granica plastičnosti 22,20 %, a indeks plastičnosti 17,79 % [29]. Laboratorijski određena vrijednost kalifornijskog indeksa nosivosti CBR tla iznosila je 2,0 %, dok bubrenja nije bilo (0,0 %) [30].

Ispitivanja nosivosti posteljice i nosivog sloja na pokusnoj dionici provedena su dinamičkom pločom te je iz dobivenoga

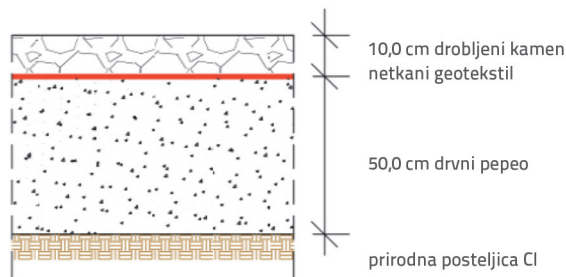
dinamičkog modula deformacija (Evd) i korelacijskog odnosa sa statičkim modulom stišljivosti određena vrijednost modula stišljivosti (Ms).



Slika 2. Pokusna dionica s probnim poljima [26]

#### 3.2.2. Probno polje 1 od km 0+000 do 0+010,00

Na probnome polju 1 kolnička konstrukcija izvedena je na prirodnoj posteljici, a njezin sastav prikazan je na slici 3.



Slika 3. Sastav kolničke konstrukcije – probno polje 1

Pokusnu dionicu je prije samog iskopa trebalo očistiti od različitog (otpadnog) građevnog materijala (lom cigle, usitnjeni ostaci betonskih ploča i blokova) te ostataka korijenja i granja. Nakon čišćenja pristupilo se iskopu tla te planiranju i zbijanju posteljice (slika 4.). Pri planiranju posteljice vodilo se računa o poprečnome nagibu od 4 % kako bi se omogućila odvodnja procjedne vode. Na



Slika 4. Isplanirana i zbijena posteljica na probnome polju 1

više je mjesta kontrolirana nosivost posteljice, a prosječni modul stišljivosti iznosio je  $M_s = 12,0 \text{ MN/m}^2$ .

Na zbijenu i ispitanu posteljicu navezen je i isplaniran miješani drveni pepeo s odlagališta (slika 5.). Pepeo se nasipavao u slojevima, u konačnoj debljini od 50 cm, a zbijanje drvnog pepela izvedeno je valjkom mase 5 t pod vibracijom (slika 6.).



Slika 6. Zbijanje nosivog sloja od drvnog pepela

Nakon kontrole nosivosti sloja od drvnog pepela ( $M_s = 60 - 80 \text{ MN/m}^2$ ) postavljen je netkani geotekstil  $100 \text{ g/m}^2$  (slika 7.), na koji je ugrađen nevezani zastor od drobljenoga kamena u debljini 10 cm. Granulometrijska krivulja kamene mješavine upotrijebljena za izvođenje zastora odstupala je od krivulje definirane Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama OTU [31] jer je za izradu zastora upotrijebljen drobljeni kamen koji su u tome trenutku u tvornici imali na zalih. Maksimalno zrno u drobljenoj kamenoj mješavini iznosilo je 200 mm. Nakon razastiranja i planiranja zastora pristupilo se zbijanju sloja i



Slika 5. Nasipavanje nosivog sloja od drvnog pepela

kontroli njegove nosivosti (slika 8.). Moduli stišljivosti izmjereni na šest mjesta na nevezanome kamenom zastoru iznosili su od 55,5 do  $72,0 \text{ MN/m}^2$ . Modul stišljivosti kao pokazatelj nosivosti izmjeren je ponovno na istim mjestima tri mjeseca nakon ugradnje i tada je nosivost zastora bila veća i ujednačenija te iznosila  $71,5 - 80,90 \text{ MN/m}^2$ .



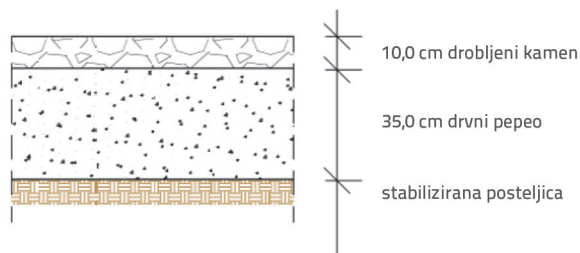
Slika 7. Geotekstil na nosivome sloju drvnog pepela [32]



Slika 8. Izvedeni nevezani zastor interne ceste od drobljenog kamena [32]

### 3.2.3. Probno polje 2 od km 0+010,00 do 0+020,00

Na probnome polju 2 izvedena je posteljica stabilizirana drvnim pepelom, a sastav kolničke konstrukcije prikazan je na slici 9.



Slika 9. Sastav kolničke konstrukcije – probno polje 2

Nakon iskopa tla, u neposrednoj blizini probnog polja, bagerom je usitnjeni materijal iz iskopa izmiješan s miješanim (sve tri frakcije) drvnim pepelom (slika 10.). Nakon što je postignuta dovoljno homogena mješavina tla i pepela u jednakim omjerima (50 : 50 %), mješavina je razastrta (slika 11.), i isplanirana na posteljici te zbijena u sloj debljine 15 do 17 cm (slika 12.). Kontrola nosivosti dinamičkom pločom, provedena neposredno nakon zbijanja, na više mjesta na posteljici pokazala je module stišljivosti  $M_s = 30,7$  do  $48,4$  MN/m<sup>2</sup>. S obzirom na činjenicu da drveni pepeo ima vezivna svojstva koja se razvijaju u odgovarajućem vremenskom razdoblju, nosivost je kontrolirana i 14 dana nakon zbijanja, a dobiveni rezultati modula stišljivosti bili su veći i iznosili  $M_s = 35,4$  do  $49,3$  MN/m<sup>2</sup>. Nakon kontrole nosivosti posteljice miješani drveni pepeo navezen je, isplaniran i zbijen u sloj debljine 35 cm. Sloj drvnog pepela zbijen je valjkom mase 5 t pod vibracijom. Na nosivi sloj ugrađen je nevezani zastor od drobljenog kamena u debljini 10 cm, a moduli stišljivosti izmjereni na nevezanome kamenom zastoru iznosili su od  $72,8$  do  $83,9$  MN/m<sup>2</sup>. Po svojim su vrijednostima, iako nije postavljen netkani geotekstil, izmjereni moduli stišljivosti slični vrijednostima modula izmjenjenima na prvome probnom polju tri mjeseca nakon njegove izvedbe.



Slika 10. Miješanje drvnog pepela i usitnenog materijala iz iskopa [32]



Slika 11. Razastiranje mješavine drvnog pepela i materijala iz iskopa



Slika 12. Zbijanje posteljice stabilizirane drvnim pepelom

Od trenutka izgradnje pokusne dionice njome svakodnevno voze teška teretna vozila sa šumarskim prikolicama natovarenima drvnim trupcima (slika 13.). Kolnička konstrukcija pokusne dionice u izvrsnom je stanju, ne uočavaju se nikakve deformacije ili druge vrste oštećenja na zastoru. U lipnju 2024. (godinu dana od izvedbe prvoga probnog polja pokusne dionice) ponovno je izmjerena nosivost vozne površine i vrijednosti modula stišljivosti iznosile su  $M_s = 75,00$  do  $85,00$  MN/m<sup>2</sup>.



Slika 13. Izgled pokusne dionice u lipnju 2024. [32]

### 3.3. Kontrola kvalitete pri izvođenju

Programom ispitivanja na terenu bilo je planirano samo ispitivanje nosivosti posteljice i slojeva kolničke konstrukcije dinamičkom pločom te je iz dobivenoga dinamičkog modula deformacija (Evd) i korelacijskog odnosa sa statičkim modulom stišljivosti određena vrijednost modula stišljivosti (Ms). Opseg laboratorijskih ispitivanja bio je znatno širi, u svemu prema Općim tehničkim radovima na cestama OTU, knjigama II. [33] i III. [31].

#### 3.3.1. Terenska ispitivanja

Ispitivanje dinamičkoga deformacijskog modula provedeno je neposredno nakon zbijanja svakog od slojeva, na više različitih mjesta na sloju, te nakon odgovarajućega vremenskog razdoblja. Modul stišljivosti prirodne posteljice od srednje plastične gline iznosio je 12 MN/m<sup>2</sup>, što je znatno niže od propisane minimalne nosivosti zemljanih materijala prema OTU-u [33] koja iznosi 30,0 MN/m<sup>2</sup>. Međutim, uobičajeno je da se na zemljanim tlima (materijalima iskopne kategorije C) izvođači radova susreću sa smanjenom nosivošću posteljice te pribjegavaju nekim od postupaka poboljšanja nosivosti.

Znatno bolji rezultati nosivosti postignuti su na posteljici stabiliziranoj drvnim pepelom. Dodatak drvnog pepela izraženih hidrauličnih svojstava (50 % u mješavini tla) poboljšao je nosivost glinovite posteljice već neposredno nakon zbijanja, kada su moduli stišljivosti iznosili Ms = 30,7 do 48,4 MN/m<sup>2</sup>. Nosivost posteljice kontinuirano se povećavala tijekom vremena te je nakon 14 dana iznosila Ms = 35,4 do 49,3 MN/m<sup>2</sup>. Nosivost je na posteljici poboljšanoj drvnim pepelom izmjerena u šest točaka u dva navrata, neposredno nakon zbijanja i 14 dana poslije, a dobiveni rezultati vidljivi su u tablici 1.

Iz rezultata mjerenja vidljivo je da je samo na jednome mjernom mjestu nosivost bila nešto niža zbog veće provlaženosti,

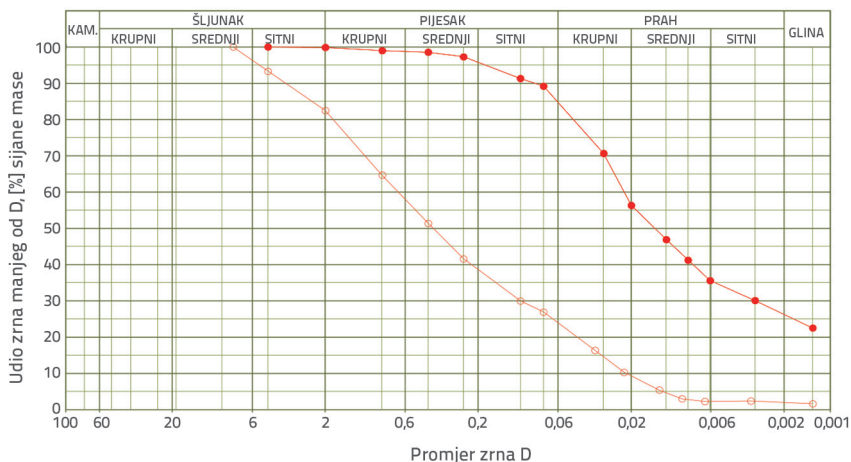
Tablica 1. Vrijednosti izmjenjenoga deformacijskog modula (modul stišljivosti) na posteljici [34]

Mjesto ispitivanja	Evd [MN/m <sup>2</sup> ]	Evd [MN/m <sup>2</sup> ]	Povećanje nosivosti posteljice [%]
	20.09.2023.	3.10.2023.	
1	31,8	35,4	11,32
2	25,9	40,7	57,14
3	40,3	44,8	11,17
4	35,7	49,3	38,10
5	30,7	42,7	39,09
6	48,4	36,1*	-

\*provlaženo mjesto, smanjena nosivost posteljice nakon 14 dana

Tablica 2. Rezultati laboratorijskih ispitivanja [29, 30, 35, 36]

Svojstva		Ispitivanje prema:	Tlo	Drvni pepeo	Mješavina tlo/pepeo
Prirodna vlažnost [%]		ASTM D 2216-10	24,4	23,7	-
Gustoća čvrstih čestica [Mg/m <sup>3</sup> ]		ASTM D 854-14 Metoda B, toč. 9.3	2,58	2,65	2,60
Granulometrijski sastav	Koeficijent nejednolikosti U	ASTM D 422-63	-	30,90	262,4
	Promjer najvećeg zrna [mm]		4,75	8,0	60,0
Konzistencija tla	Granica tečenja [%]	BS 1377:1990 dio 2, točke 4.5 i 5	39,99	-	-
	Granica plastičnosti [%]		22,20	-	-
	Indeks plastičnosti [%]		17,79	-	-
Standardni Proctor	Optimalni udio vode [%]	HRN EN 13286-1	22,6	14,1	19,0
	Najveća suha gustoća [Mg/m <sup>3</sup> ]		1,49	1,13	1,27
Kalifornijski indeks nosivosti, CBR [%]		HRN EN 13286-47	2	22	9
Bubrenje [%]			0	0,1	0,5



Slika 14. Granulometrijski dijagram [35]

međutim i takva je udovoljila minimalno traženoj vrijednosti nosivosti za posteljicu od zemljanog materijala (30 MN/m<sup>2</sup> prema OTU II. [33]), dok su sve ostale vrijednosti nosivosti posteljice bile više. Uočljiv je porast nosivosti posteljice nakon 14 dana od 11 % do 57 % u odnosu na nosivost mjerenu neposredno nakon zbijanja posteljice.

### 3.3.2. Laboratorijska ispitivanja

Laboratorijska ispitivanja obuhvatila su određivanje vlažnosti tla i drvnog pepela, gustoće, granulometrijskog sastava, konzistencije tla, optimalnog udjela vode i maksimalno suhe prostorne mase prema standardnome Proctorovu pokusu, indeksa nosivosti CBR i bubrenja (rezultati svih navedenih ispitivanja prikazani su u tablici 2.) te tlačne čvrstoće mješavine tla i pepela (rezultati su prikazani u tablici 4.). Granulometrijskom analizom uzoraka dobivene su krivulje materijala tla (gornja granulometrijska krivulja) i miješanoga drvnog pepela (donja granulometrijska krivulja), koje su prikazane na slici 14.

Tablica 3. Kemijski sastav drvnog pepela [24]

Komponente		MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO
Pepeo ložišta	mas. %	2,64	0,82	3,48	2,34	1,40	7,13	43,74
Ciklonski pepeo		3,06	0,44	4,05	2,90	1,59	2,82	46,9
Elektrofilterski pepeo		2,39	0,22	1,25	3,61	21,55	25,99	33,38

Tablica 4. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine tla i drvnog pepela [37]

Njega uzoraka [dani]	Tlačna čvrstoća mješavine [MN/m <sup>2</sup> ]	Minimalna tlačna čvrstoća mješavine stabilizirane vapnom [MN/m <sup>2</sup> ]
	HRN EN 13286-41	Prema toč. 2-11 OTU knjiga 2
7	0,48	0,40
28	0,55	0,50

Osim fizikalnih svojstava za učinak drvnog pepela u mješavini važan je i njegov kemijski sastav koji ovisi o anorganskome sastavu drvne biomase. Kemijski sastav drvnog pepela prikazan je u tablici 3., a kao što je vidljivo iz sastava, dominira kalcijev oksid CaO, čiji je udio od 33,38 do 43,74 mas. %, ovisno o frakciji pepela, a što upućuje na vezivnu sposobnost pepela [12, 22].

Na uzorcima mješavine sastavljene od tla i drvnog pepela u jednakim udjelima provedeno je ispitivanje tlačne čvrstoće prema HRN EN 13286-41. Uzorci mješavine pripremljeni su u skladu sa standardnim Proctorovim postupkom (HRN EN 13286-2) te njegovani 7 i 28 dana u vlažnoj komori pri 20 °C±5 °C i 90 – 95 % r.h. Ispitana su po tri uzorka mješavine za svaku njegu, a srednja vrijednost tlačne čvrstoće prikazana je u tablici 4.

### 3.3.3. Analiza rezultata ispitivanja

Osnovni materijal (tlo) pokusne dionice pripada skupini srednje plastičnih anorganskih glina simbola Cl, s gustoćom čvrstih čestica 2,58 (Mg/m<sup>3</sup>). Prirodna vlažnost tla iznosi 24,4 %. Drvni pepeo koji je korišten u izgradnji pokusne dionice mješavina je triju frakcija pepela koje nastaju pri izgaranju u različitim omjerima. Gustoća miješanog drvnog pepela iznosi 2,65 (Mg/m<sup>3</sup>).

Iz granulometrijskog dijagrama na slici 12. uočava se dobra graduiranost mješavine drvnog pepela s max. zrnom 8 mm i koeficijentom nejednolikosti U = 30,9. Zrna su opisana kao ugata, tvrda i trajna. Osim fizikalnih svojstava za djelovanje drvnog pepela u mješavini s tlom (ili samostalno) važan je i kemijski sastav pepela. Prema autorima Sarkkinenu i dr. [12] te Bohrnu i dr. [22], kada se primjenjuju kao vezivo u stabilizaciji



različitih materijala, biopepeli moraju sadržavati barem 20 % CaO kako bi pokazali dobra vezivna svojstva. Zastupljenost različitih oksida u kemijskome sastavu vidljiva je u tablici 3. Dominira kalcijev oksid CaO u udjelima 33,38 do 46,9 mas.% te drveni pepeo djeluje kao samostalno vezivo. Učinak miješanoga drvnog pepela u mješavini vidljiv je u poboljšanju nosivosti izraženom indeksom nosivosti CBR (tablica 2.) i rezultatima tlačne čvrstoće (tablica 4.).

Kalifornijski indeks nosivosti CBR za glinovito tlo iznosi 2 %, dok za mješavinu tla i pepela (50/50 %) indeks nosivosti iznosi CBR = 9 %, što u konačnici upućuje na povećanje nosivosti od 350 %. Dodavanjem drvnog pepela glinovitome tlu optimalan udio vode u mješavini smanjen je (19,0 %), kao i najveća suha gustoća (1,27 Mg/m<sup>3</sup>).

Kako bi se učinak drvnog pepela bolje uočio, usporedbe radi, u tablici 4. su uz rezultate tlačne čvrstoće mješavine tla i pepela prikazani i kriteriji minimalne tlačne čvrstoće koji su propisani u OTU-u II. [33] za mješavine stabilizirane vapnom. Količina vapna potrebna za postizanje minimalne tlačne čvrstoće mješavine obično se kreće od 3 do 5 % mase suhog tla. Iz rezultata je vidljivo kako su tlačne čvrstoće mješavine tla i pepela nakon 7 i 28 dana veće od traženih minimalnih vrijednosti tlačne čvrstoće za stabilizaciju vapnom. Tlačna čvrstoća nakon 7 dana veća je za 20 % u odnosu na klasičnu stabilizaciju vapnom, dok je tlačna čvrstoća nakon 28 dana veća za 10 % u odnosu na stabilizaciju vapnom za isto vrijeme njege. Iako norma HRN EN 13286-41 to ne propisuje, ispitana je i tlačna čvrstoća uzoraka neposredno nakon izrade, a koja je iznosila 0,3 MN/m<sup>2</sup>.

Učinak drvnog pepela vidljiv je u laboratorijskim i u terenskim parametrima nosivosti (tablica 1.) te se uočava njegov doprinos u odnosu na tradicionalno vezivo za glinovite materijale – vapno. Glinoviti materijal slabijih svojstava poboljšani su dodatkom miješanoga drvnog pepela u udjelu 50 %. Budući da se pokusna dionica gradila bez laboratorijski dobivenog prethodnog radnog sastava te da je udio pepela u mješavini izabran zbog praktičnosti i jednostavnosti izvedbe, moguće je očekivati još bolje rezultate nosivosti, ali za to je potrebno provesti dodatna laboratorijska ispitivanja s različitim udjelima drvnog pepela u mješavini tla. Nosivi sloj ceste koji je izveden od drvnog pepela na oba probna polja pokusne dionice udovoljio je kriterijima nosivosti i potvrdio svoju primjenu u kolničkoj konstrukciji. Izmjereni moduli stišljivosti iznosili su od 60 do 80 MN/m<sup>2</sup>. Usporedbe radi, nosivi slojevi izvedeni od pijeska (česti u kolničkim konstrukcijama u Slavoniji i Baranji) imaju module stišljivosti  $M_s = 60$  do 80 MN/m<sup>2</sup> [22]. Uzroci dobrih rezultata nosivosti nosivog sloja s pepelom leže u fizikalnim svojstvima mješavine pepela (tri frakcije pepela različitog udjela u mješavini) i dobroj graduiranosti mješavine

pepela, ali i u kemijskome sastavu drvnog pepela u kojemu mu udio kalcijeva oksida CaO daje vezivna svojstva.

#### 4. Zaključak

U ovome radu prezentirana su iskustva izgradnje pokusne dionice ceste primjenom drvnog pepela unutar industrijskog postrojenja tvrtke *Strizivojna Hrast* d.o.o. kao dio interne ceste po kojoj svakodnevno voze teška teretna vozila natovarena drvnim trupcima. Miješani drveni pepeo s odlagališta neposredno uz pogone upotrijebljen je za poboljšanje nosivosti glinovite posteljice i za izgradnju nosivog sloja kolničke konstrukcije. Tijekom izgradnje pokusne dionice provedena su laboratorijska i terenska ispitivanja radi kontrole kvalitete. Poseban učinak drvnog pepela uočen je pri stabilizaciji glinovite posteljice, gdje je njezina nosivost povećana do četiri puta u odnosu na nosivost prirodne, nestabilizirane posteljice, a povećavanje nosivosti stabilizirane posteljice nastavljeno je. Drveni pepeo uspješno je zamijenio prirodni agregat poput šljunka, pijeska ili drobljenoga kamena, koji se inače koristi u izgradnji nosivih slojeva kolničke konstrukcije.

Stanje izvedene pokusne dionice vidljivo je na slici 13., a moduli stišljivosti izmjereni godinu dana nakon izvedbe dionice potvrđuju stabilnu i nosivu konstrukciju bez oštećenja, koja u cijelosti udovoljava zahtjevu svakodnevnog prometa teških teretnih vozila. Usporede li se troškovi izgradnje ceste standardnim agregatom i vezivom, a da se posebno ne analiziraju trenutačno važeće cijene materijala i veziva, s troškovima izgradnje pokusne dionice (besplatnim) drvnim pepelom, jasno se uočava mogućnost znatne racionalizacije troškova izgradnje i uštede. Osim toga udovoljava se zahtjevima održivog razvoja za ponovnom upotrebom / recikliranjem drvnog pepela u cilju smanjenja znatnih količina pepela na odlagalištima, čije se kontinuirano povećavanje očekuje i dalje.

#### Zahvala

Za izvođenje pokusne dionice nisu izdvojena posebna novčana sredstva. Nastala je isključivo dobrom voljom i osobnim angažmanom svih zainteresiranih i uključenih u njezinu izgradnju.

Organizacija i izgradnja pokusne dionice omogućena je zahvaljujući ljubaznosti Mate Ravlića, vlasnika tvornice *Strizivojna Hrast* d.o.o. u Strizivojni. Sve radove na izvođenju posteljice i kolničke konstrukcije izveli su radnici tvornice. U kontrolu kvalitete i provedbu terenskih i laboratorijskih ispitivanja bili su uključeni zaposlenici Laboratorija za materijale i konstrukcije *Instituta IGH d.d.* RC Osijek.

#### LITERATURA

- [1] Dimter, S., Rukavina, T., Barišić, I.: Alternative, environmentally acceptable materials in road construction. In Handbook of Research on Advancements in Environmental Engineering, Ed.: Gaurina-Međimurec, N., IGI Global: Hershey, PA, USA, 2014, pp. 557–583.
- [2] Šikić, D. i drugi: Tehnički uvjeti za gospodarske ceste, Znanstveni savjet za promet JAZU, Zagreb, 1989.
- [3] Rukavina, T., Dragčević, V., Lopuh, S., Rajič, S.: Metode stabilizacije slabo nosivog tla pri izgradnji prometnica, *Građevinar* 59 (2007) 4, pp. 301–309.

- [4] Dimter, S., Zagvozda, M., Tonc, T., Šimun, M.: Construction of economical pavement structures with wood ash, 30<sup>th</sup> International Baltic Road Conference (IBRC 2021) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1202 (2021) 012048, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1202/1/012048>
- [5] Zagvozda, M., Dimter, S., Rukavina, T., Netinger Grubeša, I.: Mogućnosti primjene biopepela u cestogradnji, Građevinar, 70 (2018) 5, pp. 393-402. <https://doi.org/10.14256/JCE.2074.2017>
- [6] Dimter, S., Šimun, M., Zagvozda, M., Rukavina, T.: Laboratory evaluation of the properties of asphalt mixture with wood ash filler, Materials, 14 (2021) 3, pp. 1-17, <https://doi.org/10.3390/ma14030575>
- [7] Šimun, M., Dimter, S., Grubješić, G., Vukelić, K.: Contribution to the Research on the Application of Bio-Ash as a Filler in Asphalt Mixtures, Applied sciences (Basel), 13 (2023) 11, pp. 6555, <https://doi.org/10.3390/app13116555>
- [8] Dimter, S., Zagvozda, M., Milovanović, B., Šimun, M.: Usage of Wood Ash in Stabilization of Unbound Pavement Layers, Road and Rail Infrastructure VI, Proceedings of the Conference CETRA 2020\*, ed. Lakušić, S., 20-21 May 2021, Zagreb, Croatia, pp. 981-987, <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2020.1016>
- [9] Zagvozda, M., Rukavina, T., Dimter, S.: Wood bioash effect as lime replacement in the stabilisation of different clay subgrades, International Journal of Pavement Engineering, 23 (2020) 8, pp. 2543-2553, <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1862839>
- [10] Zagvozda, M., Dimter, S., Rukavina, T.: Subgrade Bearing Capacity Improvement With Bioash. Proceedings of the 26<sup>th</sup> World Road Congress, Abu Dhabi, 2019, Connecting Cultures, Enabling Economies, 10p.
- [11] Supancic, K., Obernberger, I.: Wood ash utilisation as a stabiliser in road construction, First results of large-scale tests, 19<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, 43 (2011), pp. 859-870, Berlin
- [12] Sarkkinen, M., Kujala, K., Kemppainen, K., Gehör, S.: Effect of biomass fly ashes as road stabilisation binder, Road Materials and Pavement Design, (2016), pp. 1-13.
- [13] Ureña, C., Azañón, J.M., Caro, J.M., Irigaray, C., Corpas, F., Ramírez, A., Rivas, F., Salazar, L.M., Mochón, I.: Use of Biomass Ash as a stabilization agent for expansive marly soils (SE Spain), EGU General Assembly, 2012, (2012).
- [14] Emeh, C., Igwe, O.: The combined effect of wood ash and lime on the engineering properties of expansive soils, International Journal of Geotechnical Engineering, XX (2016) X, pp. 1-11, <https://doi.org/10.1080/19386362.2015.1125412>
- [15] Okagbue, C.O.: Stabilization of Clay Using Woodash, Journal of Materials in Civil Engineering, 19 (2007) pp. 14-18, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(14))
- [16] Škëls, P., Bondars, K., Plonis, R., Haritonovs, V., Paeglītis, A.: Usage of Wood Fly Ash in Stabilization of Unbound Pavement Layers and Soils, Proceedings of 13<sup>th</sup> Baltic Sea Geotechnical Conference, Vilnius, pp. 122-125 (2016) <https://doi.org/10.3846/13bsgc.2016.017>
- [17] Sarkkinen, M., Luukkonen, T., Kemppainen, K.: A wasterock and bioash mixture as a road stabilization product, Selected papers from the 3<sup>rd</sup> Edition of the International Conference on Wastes: Solution, Treatments and Opportunities, Viana do Castelo, pp. 283-288, (2015)
- [18] Vestin, J., Arm, M., Nordmark, D., Lagerkvist, A., Hallgren, P., Lind, B.: Fly ash as a road construction material, WASCON 2012 Conference proceedings, Gothenburg, (2012), pp. 1-8.
- [19] Kaakkurivaara, T., Kolisoja, P., Uusitalo, J., Vuorimies, N.: Fly Ash in Forest Road Rehabilitation, Croatian Journal of Forest Engineering, 37 (2009) 1, pp. 119-130.
- [20] Bohrn, G., Stampfer, K.: Untreated Wood Ash as a Structural Stabilizing Material in Forest Roads, Croatian Journal of Forest Engineering, 35 (2014), pp. 81-90.
- [21] Škëls, P., Bondars, K., Haritonovs, V.: Wood fly ash stabilization of unbound pavement layers, 19<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE 2017, Coex Convention Center Seoul, South Korea, 2017.
- [22] Dimter, S., Zagvozda, M., Tonc, T., Šimun, M.: Evaluation of Strength Properties of Sand Stabilized with Wood Fly Ash (WFA) and Cement, Materials, 15 (2022) 99, Paper No.: 3090, <https://doi.org/10.3390/ma15093090>
- [23] Dimter, S., Zagvozda, M., Tonc, T., Zvonarić, M.: Impact of different wood ash fractions on the load - bearing capacity of sand mixtures, Road and Rail Infrastructure VII, Proceedings of the Conference CETRA 2022, ed. Lakušić, S., 11-13 May 2022, Pula, Croatia, pp. 449-456, <https://doi.org/10.5592/CO/CETRA.2022.1473>
- [24] Primjena pepela iz drvene biomase u slojevima kolničke konstrukcije - Bio PAV, znanstveno istraživački projekt Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek IZIP-GrAFOS-2018., voditeljica prof.dr.sc. Sanja Dimter <https://www.croris.hr/projekti/projekt/5444>
- [25] Dimter, S., Kuburić, G., Ević, E., Vrhovac, G.: Contribution to green (road) construction displayed in wood production factory Strizivojna Hrast d.o.o, 9. Congress of Croatian Builders, ed. Lakušić, S., 21-24 April 2024, Cavtat, Croatia, pp. 267-276, <https://doi.org/10.14256/9SHG.2024.214>
- [26] [https://earth.google.com/web/@45.22313493,18.41769939,81.61644031a,1654.05343212d,35y,0h,0t,0r/data=OgMKATA\(20.02.2024.\)](https://earth.google.com/web/@45.22313493,18.41769939,81.61644031a,1654.05343212d,35y,0h,0t,0r/data=OgMKATA(20.02.2024.))
- [27] [https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-procjenu-utjecaja-na-okolis-i-odrzivo-gospodarenje-otpadom-1271/gospodarenje-otpadom/ocevidnici-7589/7589\(29.02.2024.\)](https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-procjenu-utjecaja-na-okolis-i-odrzivo-gospodarenje-otpadom-1271/gospodarenje-otpadom/ocevidnici-7589/7589(29.02.2024.))
- [28] Stjepanović, V.: Osiguranje kvalitete materijala i radova pri izvođenju nosivih slojeva kolničkih konstrukcija / Dimter, Sanja (mentor), Kuburić, Goran (neposredni voditelj, Osijek, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2023.
- [29] Izvještaj o ispitivanju granice tečenja, granice plastičnosti i indeksa plastičnosti br. 72501-GP-23 0104, Institut IGH d.d. RC Osijek, 7.07.2023.
- [30] Izvještaj o ispitivanju bubrenja i kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) s opterećenjem nakon 96 sati potapanja u vodi br. 72501-0325/23, Institut IGH d.d. RC Osijek, 28.08.2023.
- [31] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, knjiga 3, Hrvatske ceste- hrvatske autoceste 2001.
- [32] Dimter, S., Kuburić, G., Ević, E., Vrhovac, G.: Iskustva izgradnje pokusne dionice ceste s drvnim pepelom, Zbornik sažetaka predavanja - 18. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva / Štimac Grandić, Ivana, Dražin Lovrec, Nina (ur.). Zagreb: Hrvatska komora inženjera građevinarstva, 2024. pp. 123-123
- [33] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, knjiga 2, Hrvatske ceste- hrvatske autoceste 2001.
- [34] Izvještaj o ispitivanju dinamičkog deformacijskog modula br. 72501-0334/23, Institut IGH d.d. RC Osijek, 3.10.2023.
- [35] Izvještaj o ispitivanju granulometrijskog sastava tla br. 72501-GS-23 0104\_23 0105, Institut IGH d.d. RC Osijek, 7.07.2023.
- [36] Izvještaji o ispitivanju laboratorijske suhe gustoće i udjela vode - zbijanje po Proctoru, br. 72501-23 0104 (tlo), 72501-23 0105 (pepeo), 72501-23 0106 (mješavina tla i pepela), Institut IGH d.d. RC Osijek, 12.07.2023.
- [37] Izvještaj o ispitivanju tlačne čvrstoće br.72501-0327/23, Institut IGH d.d. RC Osijek, 7.11.2023.