

# Primjena tehnologije recikliranja nosivog sloja kolnika stabiliziranog upjenjenim bitumenom po hladnom postupku

---

Vičić, Domagoj

Graduate thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:796632>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Domagoj Vičić**

**Primjena tehnologije recikliranja nosivog sloja kolnika  
stabiliziranog upjenjenim bitumenom po hladnom postupku**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2023. godina**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Stručni diplomski studij  
Graditeljstvo u priobalju i komunalni sustavi  
Gospodarenje kolnicima**

**Domagoj Vičić  
JMBAG: 0296008830**

**Primjena tehnologije recikliranja nosivog sloja kolnika stabiliziranog  
upjenjenim bitumenom po hladnom postupku**

**Diplomski rad**

**Rijeka, srpanj 2023.**



Vičić, D. (2023): Primjena tehnologije recikliranja nosivog sloja kolnika stabiliziranog upjenjenim bitumenom po hladnom postupku  
Diplomski rad

GF  
Građevinski fakultet

## IZJAVA

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

---

Domagoj Vičić

U Rijeci, 01. srpnja 2023.

## **Zahvala:**

*Ovaj diplomski rad posvećujem svojoj užoj obitelji, posebno svojoj majci koja na žalost nije doživjela ovaj dan. Posebnu zahvalu dugujem supruzi Martini, djeci Rei i Gabrieli koji su mi bili moralna podrška i potpora na putu do uspjeha.*

*Bez njihove podrške, cjelokupno studiranje i dolazak do ovog trenutka u životu, bio bi puno zahtjevniji i neizvjesniji.*

*Također zahvaljujem kolegama sa posla koji su mi izlazili u susret tijekom studiranja i pisanja diplomskog rada. Ovdje sam dužan posebno izdvojiti i zahvaliti se kolegama Oliveru Aleksiću i Marinu Uzelcu.*

*I na kraju, ali nikako i najmanje važno, zahvaljujem se mentorici dr.sc. Marijani Cuculić, dipl. ing. građ. za suglasnost prilikom odabira teme, kao i na stručnoj pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.*

## PRIMJENA TEHNOLOGIJE RECIKLIRANJA NOSIVOG SLOJA KOLNIKA STABILIZIRANOG UPJENJENIM BITUMENOM PO HLADNOM POSTUPKU

### **Sažetak:**

*U radu je opisan tehnološki proces recikliranja istrošenih asfaltnih kolnika metodama In-situ i In-plant, kao i sve pripremne aktivnosti prije početka izvođenja radova recikliranja asfaltnih kolnika sa upjenjenim bitumenom po hladnom postupku. Opisana su laboratorijska ispitivanja koja se vrše u sklopu kontrole kvalitete izvedenih radova.*

**Ključne riječi:** *hladno recikliranje, upjenjeni bitumen, obnova asfaltnih kolnika, in-situ, in-plant, emulzija.*

**Abstract:** *The thesis describes the technological process of recycling used asphalt pavements using the In-situ and In-plant methods, as well as all the preparatory activities before starting the work of recycling asphalt pavements with foamed bitumen using the cold process. The laboratory tests performed as part of the quality control of the performed works are included.*

**Key words:** *cold recycling, foamed bitumen, restoration of asphalt pavements, in-situ, in-plant, emulsion.*

## Sadržaj

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 7  |
| 2. TEHNOLOGIJA HLADNOG RECIKLIRANJA .....   | 8  |
| 2.1. Osnovne karakteristike hladnog recikliranja .....                                | 8  |
| 2.2 Koristi kod primjene metode hladnog recikliranja kolnika sa upjenjenim bitumenom. | 9  |
| 2.3. Istražni radovi i ispitivanja prije izvedbe .....                                | 11 |
| 2.4. Veziva .....   | 15 |
| 2.4.1. <i>Odabir veziva</i> .....   | 19 |
| 3. RECIKLIRANJE HLADNIM POSTUPKOM METODOM IN-SITU .....                               | 20 |
| 3.1 Metoda In-situ .....  | 20 |
| 3.2. Korištenje mehanizacije .....  | 21 |
| 4. RECIKLIRANJE HLADNIM POSTUPKOM METODOM IN-PLANT .....                              | 26 |
| 4.1. Prednost proizvodnje hladne reciklaže sa upjenjenim bitumenom in-plant metodom   | 28 |
| 5. POČECI KORIŠTENJA TEHNOLOGIJE HLADNOG RECIKLIRANJA.....                            | 30 |
| <u>U REPUBLICI HRVATSKOJ</u> .....  | 30 |
| 5.1. Karakteristike kolničke konstrukcije prije recikliranja .....                    | 30 |
| 5.2. Postupak recikliranja .....  | 31 |
| 5.3 Analiza kvalitete nakon vremenskog perioda od dvije godine .....                  | 34 |
| 6. KONTROLA KVALITETE .....   | 35 |
| 7. ZAKLJUČAK .....  | 39 |
| 8. POPIS LITERATURE .....   | 41 |

## Popis tablica

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1: Rezultati ispitivanja određivanja penetracije i točke razmekšanja ..... | 13 |
| Tablica 2: Uvjeti za hladno recikliranu mješavinu [5].....                         | 15 |
| Tablica 3: Preporučena veziva u odnosu na sastav reciklirane mješavine [4].....    | 20 |
| Tablica 4: Uvjeti za granulometrijski sastav [4].....                              | 35 |
| Tablica 5: Rezultati ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće .....                  | 36 |
| Tablica 6: Rezultati ispitivanja stupnja zbijenosti .....                          | 37 |



## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Slika 1: Presjek kolnika prije i nakon recikliranja.....   | 8  |
| Slika 2: Poprečne pukotine uočene vizualnim pregledom .....  | 11 |
| Slika 3: Uzorak jezgre asfaltnog zastora kod poprečne pukotine .....                                   | 12 |
| Slika 4: Mjerenje dubine kolotruga mjernom letvom i mjernim klinom.....                                | 12 |
| Slika 5: Priprema laboratorijskog probnog tijela Marshall nabijačem sa pripremljenim<br>uzorcima ..... | 14 |
| Slika 6: Nastajanje upjenjenog bitumena [7].....   | 17 |
| Slika 7: Miješanje upjenjenog bitumena [7].....  | 17 |
| Slika 8: Cement [7] .....  | 18 |
| Slika 9: Asfaltni sloj postojeće konstrukcije nakon glodanja.....                                      | 21 |
| Slika 10: Vlak s jednom jedinicom.....   | 22 |
| Slika 11: Vlak s jednom jedinicom [7].....   | 22 |
| Slika 12: Mehanizacija za izradu hladne reciklaže, modeli WR 2500 i WM 400.....                        | 23 |
| Slika 13: Vlak s više jedinica [8].....  | 24 |
| Slika 14: Vlak s više jedinica na gradilištu [8].....  | 24 |
| Slika 15: Valjak za mehaničko zbijanje.....  | 25 |
| Slika 16: Postrojenje za proizvodnju hladno reciklirane mješavine metodom in-plant.....                | 26 |
| Slika 17: Proces proizvodnje metodom in-plant [3].....   | 27 |
| Slika 18: Mehanizacija za izradu hladne reciklaže, model WM 1000 .....                                 | 31 |
| Slika 19: Mehanizacija za izradu hladne reciklaže, model WR 2500 .....                                 | 31 |
| Slika 20: Motorni grejder za razastiranje.....   | 32 |
| Slika 21: Tehnologija ugradnje na gradilištu [8] .....   | 32 |
| Slika 22. Vlak za recikliranje [8].....  | 32 |
| Slika 23: Ispitivanje modula stišljivosti kružnom pločom.....  | 34 |
| Slika 24. Grafički prikaz granulometrijskog sastava glodane asfaltne mješavine.....                    | 35 |



Slika 25: Utvrđivanje stupnja zbijenosti volumetrom.....37

## 1. UVOD

Održavanje i obnova postojećih kolničkih konstrukcija predstavlja ključne izazove u kontekstu održivog razvoja modernih prometnih sustava. Sa sve većim brojem vozila na cestama, učestalim prometnim gužvama i ograničenim resursima, postaje neophodno pronaći inovativne i ekološki prihvatljive metode koje će omogućiti produženje vijeka trajanja kolnika, smanjenje troškova održavanja te smanjenje negativnih utjecaja na okoliš.

U skladu s tim, recikliranje nosivog sloja kolnika je tehnologija koja privlači sve veću pažnju u području održavanja cesta. Predstavlja proces u kojem se oštećeni kolnik uklanja na način da se mehaničkim glodanjem asfaltnog kolnika dobiva sirovina koja se obrađuje i miješa s vezivom, a zatim se mješavina vraća natrag na mjesto kako bi se stvorio novi sloj. Ova tehnika ima brojne prednosti u odnosu na tradicionalne metode obnove kolnika, uključujući smanjenje potrošnje agregata, uštedu energije i smanjenje emisija stakleničkih plinova. Korištenje recikliranog asfalta smanjuje potrebu za prirodnim resursima kao što su kameni agregati i bitumen. Time se smanjuje ovisnost o ograničenim izvorima tih materijala. [1]

Dosadašnja istraživanja usmjerena su na različite aspekte hladne reciklaže asfaltnih kolnika s ciljem poboljšanja tehnika na način da su bila usredotočena na razvoj optimalnih metoda miješanja recikliranog asfalta kako bi se postigao homogeni materijal s poboljšanim svojstvima. To uključuje proučavanje parametara miješanja, kao što su temperatura, vrijeme miješanja i brzina. [1]

Cilj ovog diplomskog rada je definirati postupak cjelog tehnološkog procesa recikliranja nosivog sloja kolnika stabiliziranog upjenjenim bitumenom po hladnom postupku metodama „IN-SITU“ i „IN-PLANT“, te prikazati laboratorijska i terenska ispitivanja kako bi utvrdili fizičko - mehanička svojstva recikliranog materijala. Kroz smanjenje potrošnje resursa, uštedu energije i smanjenje emisija, predmetna tehnologija ima potencijal postati ključni alat u postizanju ciljeva održivosti u prometnom sektoru.

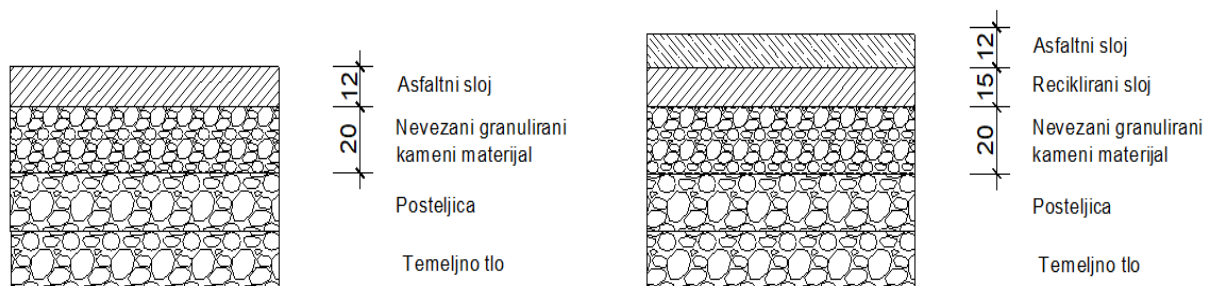
## 2. TEHNOLOGIJA HLADNOG RECIKLIRANJA

### 2.1. Osnovne karakteristike hladnog recikliranja

Jedna od novijih metoda koja se koristi za sanaciju i održavanje asfaltnih kolničkih konstrukcija je tehnika hladnog recikliranja. Hladno recikliranje je tehnički postupak kojim se obnavlja postojeća kolnička konstrukcija na način da se reciklira asfaltni kolnik bez zagrijavanja. Tom tehnikom se već postojeći, istrošeni materijali iz asfaltnog kolnika ponovno koriste da bi osigurali obnovljen i tehnički ispravan kolnik bez oštećenja.

U Hrvatskoj se koristi izvedba sanacije donjih nosivih slojeva, zamjena nosivih slojeva cementnom stabilizacijom ili hladnom reciklažom sa dodatkom cementa. [1]

Na slici 1 vidljivi su presjeci kolničke konstrukcije prije i nakon recikliranja.



Slika 1: Presjek kolnika prije i nakon recikliranja

Prednost hladne reciklaže sa upjenjenim bitumenom je u tome što izvedba novih asfaltnih slojeva može započeti neposredno nakon ugradnje iste, dok se ugradnja novih asfaltnih slojeva na podlozi od cementnom stabiliziranog sloja ili hladne reciklaže sa dodatkom cementa izvodi nakon 7 dana sukladno završetku njegovanja i ispitivanja laboratorijskih probnih uzoraka. U odnosu na tehnologiju izrade, tehnika hladnog recikliranja ima kraće vrijeme izvedbe u usporedbi na tehnologiju sa dodatkom cementa. [1]

Tehnologija hladnog recikliranja temelji se prvenstveno na glodanju postojećeg sloja kolničke konstrukcije. Najčešće se glode dubina od 75 mm do 125 mm odnosno do dubine do koje seže određeno oštećenje. Mehanički izglodani materijal se prosijava, drobi te miješa s dodatnim agregatom ako je potrebno. U mješavinu se dodaju oplemenjivači ovisno o

svojstvima koje želimo poboljšati. Moguće je dodati bitumensku emulziju, upjenjeni bitumen, sredstva za pomlađivanje, vapno, cement te materijale sličnih svojstava.

Ugradnja na dionici na kojoj vršimo rekonstrukciju vrši se motornim grejderima ili finišerima za ugradnju asfaltnih mješavina ako se radi metodom in plant ili reciklažnim vlakom koji se sastoji od reciklera, posipača cementa, cisterne za vodu, cisterne za bitumen, valjka i grejdera ukoliko se radi metodom in situ. Nakon toga vrši se mehaničko zbijanje valjcima do traženog stupnja zbijenosti. [1]

## 2.2 Koristi kod primjene metode hladnog recikliranja kolnika sa upjenjenim bitumenom

### ➤ Ekološki faktori

Recikliranje je jedan od najvažnijih procesa osiguravanja održivosti i ekološke osvještenosti. Prilikom primjene predmetne metode u cjelosti se koristi materijal iz postojećeg kolnika čime je odmah na samom početku eliminirano postojanje otpadnog materijala. Novi materijal dodaje se isključivo ukoliko prilikom izrade granulometrijske analize rezultati pokažu nedostatnu količinu frakcije 0-4 mm kojoj je količina propisana u pravilniku „Tehnički uvjeti za izradu nosivih slojeva kolnika tehnologijom recikliranja po hladnom postupku“. Sukladno tome, primjena predmetne metode rezultira manjom potrošnjom materijala. S obzirom da se smanjuje količina dopreme materijala ( u nekim slučajevima i potpuno izbacuje) smanjuje se i korištenje teške građevinske mehanizacije, drugim riječima emisije CO<sup>2</sup> što doprinosi ekološkoj osvještenosti. Osim pozitivnih održivih rješenja u procesu proizvodnje, metoda IN-SITU doprinosi i prilikom ugradnje recikliranog sloja na terenu, smanjenjem oštećenja cestovne mreže od transportnih vozila. [2]

### ➤ Kvaliteta reciklažnog sloja

Visoka kvaliteta reciklažnog sloja rezultat je kombinacije raznih čimbenika. Jedan od čimbenika je mikro procesorsko upravljani sustav pumpanja koji rezultira preciznim dodavanjem tekućina. Sami upjenjeni bitumen funkcionira kao čimbenik postizanja visoke kvalitete. Prilikom mješanja veziva i materijala u komori za mješanje, odvija se proces cjelovitog obavijanja zrna recikliranog sloja zahvaljujući upjenjenom bitumenu. Prilikom

postupka sušenja i isparavanja vode, zrno reciklažnog sloja ostane u potpunosti obavijeno bitumenom što rezultira visokom homogenosti asfaltnog sloja što također doprinosi kvaliteti reciklažnog sloja. [3]

➤ Minimalni poremećaji donjih slojeva kolnika

Poremećaj strukture donjih slojeva kolnika je minimalan u usporedbi sa obnavljanjem kolnika uz pomoć klasičnih građevinskih strojeva. Hladna reciklaža je obično rad u jednom prolazu. Kod korištenja stroja za reciklažu na gusjenicama, stražnje gusjenice prolaze samo jednom po izloženom materijalu donjih slojeva kolnika. Strojevi za reciklažu na kotačima s gumama razastiru materijal iza stroja, na koji se način izbjegava svaki kontakt između guma i izloženog materijala donjih slojeva kolničke konstrukcije. Prerada materijala kolnika sa klasičnim građevinskim strojevima često rezultira time da je posteljica izložena ponavljanim visokim naprezanjima od opterećenja, uzrokujući da se mjesta iskapanja moraju iskopati i zatrpati svježim dovezenim materijalom). [3]

➤ Kraće vrijeme građenja

Mehanizacija prilikom korištenja predmetne tehnologije izvođenja radova postiže visok proizvodni učinak. Kombinacija predmetne tehnologije (koja nas rješava egzistencije otpadnog materijala i minimizira prijevoz novog materijala) i korištene mehanizacije prilikom ugradnje dovodi do značajno kraćeg vremena građenja usporedno sa standardnim metodama izvedbe kolničke rekonstrukcije. [3]

➤ Sigurnost

Jedna od najvažnijih prednosti ovog postupka je visoka razina sigurnosti prometa koja se može postići. Kompletni vlak za reciklažu može se prilagoditi unutar širine prometne trake. Na primjer, na cestama sa dvije prometne trake, reciklaža se može izvoditi na jednoj polovici ceste tijekom dana, a po punoj širini ceste, dok se kompletna reciklirana prometna traka može otvoriti za promet u sumrak. [3]

### 2.3. Istražni radovi i ispitivanja prije izvedbe

Kako bi tehnika recikliranja bila kvalitetno izvedena odnosno kako bi ugrađeni materijal zadovoljavao svojim svojstvima, potrebno je izvesti detaljne istražne radove ispitivanja prije same izvedbe. Također, ispitivanjima se treba utvrditi da li je upravo ta metoda najracionalnija. Najčešće se tehnika hladnog recikliranja vrši na kolnicima koju su zdravi te koji imaju dobru odvodnju nosivih slojeva.

Prije izvedbe potrebno je izvršiti detaljna terenska ispitivanja u koje spada: [4]

- uzorkovanje za potrebe ispitivanja granulometrijskog sastava
- vizualni pregled stanja površine kolnika
- mjerenje dubine kolotruga profilometrom ili mjernom letvom duljine 3 metra
- uzorkovanje jezgri asfaltnog kolnika
- ispitivanje modula stišljivosti
- terensko ispitivanje Californijskog indeksa nosivosti (CBR)

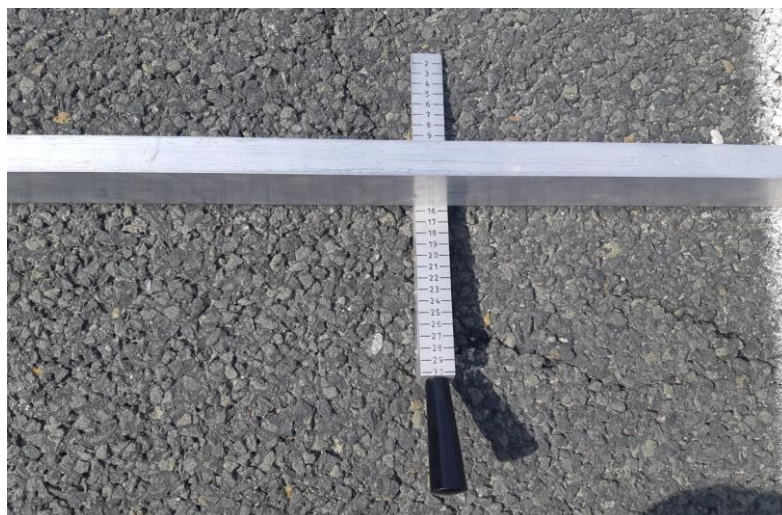
Vizualni pregled kolnika obavlja se kako bi se ustanovila vrsta oštećenja (slika 2), tip pukotina (slika 3), te dubina kolotruga (slika 4).



Slika 2: Poprečne pukotine uočene vizualnim pregledom



Slika 3: Uzorak jezgre asfaltnog zastora kod poprečne pukotine



Slika 4: Mjerenje dubine kolotraga mjernom letvom i mjernim klinom

Na terenu je potrebno uzorkovati jezgru asfaltnog kolnika u svrhu izdvajanja veziva na kojem će se vršiti ispitivanja dva parametra (tablica 1): [5]

- točka razmekšanja (metoda prstena i kuglice)
- penetracija.



*Tablica 1: Rezultati ispitivanja određivanja penetracije i točke razmekšanja*

| Svojstvo          | Norma ispitivanja | Jedinica mjere | Rezultat ispitivanja | Uvjeti kvalitete prema HRN EN 12591 |
|-------------------|-------------------|----------------|----------------------|-------------------------------------|
| Penetracija 25 °C | HRN EN 1426       | 1/10 mm        | 82                   | 70 - 100                            |
| Točka razmekšanja | HRN EN 1427       | °C             | 46,6                 | 43,0 – 51,0                         |

Predmetne parametre ocjenjujemo prema zahtjevu iz Tehničkog propisa za asfaltne kolnike nakon isteka eksploatacijskog perioda od pet godina. Na temelju svih dobivenih laboratorijskih i terenskih ispitivanja odabire se količina odnosno vrsta veziva. [5]

Također, potrebno je izvesti laboratorijska ispitivanja na uzetim jezgrama. Na temelju tih jezgri moguće je utvrditi te procijeniti sastav kolnika, kvaliteti bitumena, trenutačnu debljinu svih slojeva kolnika, kao vrsti i tipu postojećih asfaltnih slojeva.

Nadalje, dobivaju se i podaci o karakteristikama i sadržaju bitumena, njegovoj viskoznosti te količini i veličini zrna agregata na način da se jezgre uzete iz postojećeg asfaltnog kolnika laboratorijski obrade te se iz njih izuzme bitumensko vezivo pomoću otapala metodom ekstrakcije i u daljnjem postupku izvrši prosijavanje u svrhu dobivanja granulometrijskog sastava. [5]

U laboratoriju se analiziraju parametri vlačnih čvrstoća utvrđenih indirektnom metodom na način da se vrši priprema uzorka od materijala iz postojećeg asfaltnog sloja kojeg smo dobili mehaničkim glodanjem postojećeg asfaltnog sloja.

Nakon toga vrši se dodavanje upjenjenog bitumena te mehaničko zbijanje Marshall nabijačem (slika 5). Na tako pripremljenim uzorcima vrši se ispitivanje indirektno vlačne čvrstoće na suhim i vodom saturiranim uzorcima. [4]



Slika 5: Priprema laboratorijskog probnog uzorka Marshall nabijačem sa pripremljenim uzorcima

Granulometrijskom analizom utvrđuje se granulometrijski sastav, te da li je potrebno poduzeti dodatno predrobljavanje ili prosijavanje, a sve kako bi maksimalno zrno zadovoljilo uvjet manje od 32 mm.

Kalifornijskim indeksom nosivosti (CBR) dobiva se vrijednost nosivosti podloge. Pri odabiru debljine glodanja potrebno je bazirati se na preostaloj debljini kolnika nakon glodanja kako bi se osigurala potrebna nosivost za strojeve koji izvode recikliranje.

Mješavina, odnosno receptura mora se ispitati, provjeriti te dokazati sukladno „Tehničkim uvjetima za izradu nosivih slojeva kolnika tehnologijom recikliranja po hladnom postupku“. Te mora zadovoljavati uvjete iz tablice (tablica 2). [4]

Tablica 2: Uvjeti za hladno recikliranu mješavinu [4]

| Svojstva se odnose na  | Standardna svojstva  | Jedinice             | Uvjeti za prometno opterećenje |                                |  |
|--|--|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
|  |  |                      | Vrlo lako, lako i srednje      | Teško i vrlo teško             |  |
| Sastav i fizikalna svojstva                                      | Udio veziva  | [%(m/m)]             | ± 0,2                          |                                |  |
|  | Temperatura bitumena za pjenjenje  | [°C]                 | 160 do 195                     |                                |  |
|  | Optimalna vlažnost mješavine   | [%(m/m)]             | Mjeri se                       |                                |  |
|  | Vlažnost mješavine stabilizirane   | Bitumenskim vezivom  | [%(m/m)]                       | 60 do 80 % optimalne vlažnosti |  |
|  |  | Hidrauličnim vezivom |                                | ± 2                            |  |
| Gustoća suhog modificiranog Proctorovog uzorka                   | [t/m <sup>3</sup> ]  | Mjeri se             |                                |                                |  |
| Mehanička svojstva mješavine stabilizirane bitumenom             | Indirektna vlačna čvrstoća suhog Marshallovog uzorka - ITS suhi            | [MPa]                | ≥ 0,175                        | ≥ 0,225                        |  |
|  | Indirektna vlačna čvrstoća vodom zasićenog Marshallovog uzorka – ITS mokri | [MPa]                | ≥ 0,075                        | ≥ 0,100                        |  |
|  | Krutost  | [MPa]                | Mjeri se                       |                                |  |
| Mehanička svojstva mješavine stabilizirane hidrauličnim vezivima | Tlačna čvrstoća nakon 7 dana   | [MPa]                | 2,0 – 5,0                      |                                |  |
|  | Tlačna čvrstoća nakon 28 dana  | [MPa]                | 3,0 – 6,0                      |                                |  |
|  | Indirektna vlačna čvrstoća nakon 7 dana                                    | [MPa]                | Mjeri se                       |                                |  |
|  | Otpornost na vodu i smrzavanje nakon 28 dana                               | %                    | ≥ 80                           |                                |  |

## 2.4. Veziva

Reciklirani materijal koji se dobiva glodanjem miješa se sa vezivima. Najčešće se kao veziva koriste bitumenske emulzije, upjenjeni bitumen te dodaci poput cementa. Odabir najkvalitetnijeg veziva za pojedini projekt ovisi o rezultatima laboratorijskih ispitivanja.

Veziva nam omogućavaju da poboljšamo fizičko-mehanička svojstva te povećamo strukturnu nosivost tretiranog sloja.

### ➤ Bitumenska emulzija

Bitumenska emulzija je vezivo koji se najčešće koristi u količini od 1-3% ukupne težine. Jednostavna je za upotrebu te se može formirati ovisno o željenoj mješavini. Također ima više tipova bitumenskih emulzija što nam osigurava veći izbor. Mješavina s bitumenskom emulzijom može biti otporna na zamor, manje sklona pucanju te fleksibilna.

Zbijanje sloja s bitumenskom emulzijom normalno počinje kad mješavina počne mijenjati boju iz smeđe u crnu. Proces najčešće traje između 10 minuta i 2 sata ovisno o bitumenskoj emulziji, dubini recikliranja te vremenskim uvjetima. [6]

### Ograničenja specifična za bitumenske emulzije

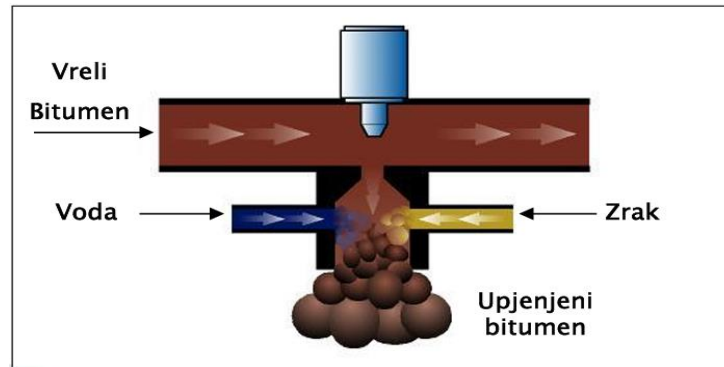
- Suhi materijal ne može se miješati sa bitumenskom emulzijom. Kako bi se izbjeglo prerano pucanje, u agregatu mora biti prisutna dovoljna vlaga kako bi se olakšala disperzija dodane tekućine. Međutim, ako je pri korištenju tehnologije in-situ sadržaj vlage previsok, dodavanje bitumenske emulzije može dovesti do toga da ukupni sadržaj tekućine premaši optimalnu količinu potrebnu za mehaničko zbijanje. [6]
- Ako je temperatura materijala koja se miješa preniska, bitumenska emulzija će se slabo dispergirati. Nije preporučljiva upotreba kada je temperatura materijala koji se tretira niža od 10°C. [6]
- Formulacija bitumenske emulzije. Proces miješanja zahtijeva primjenu stabilne klase emulzije, na primjer, sporo stvrdnjavajuće kationske emulzije (CSS60) ili stabilne anionske emulzije (SS60). Upotreba neodgovarajuće klase emulzije uzrokovala je probleme na nekim projektima. Prerano lomljenje (flash set) nestabilne bitumenske emulzije, na primjer, brzo stvrdnute (CRS) emulzije, može oštetiti sustav za nanošenje i/ili spriječiti miješanje začepljenjem komore za miješanje na recikleru. Tamo gdje je bitumenska emulzija previše stabilna ili nekompatibilna s materijalom, može proći mnogo mjeseci (ili čak godina), da se razbije. [6]

### ➤ Upjenjeni bitumen

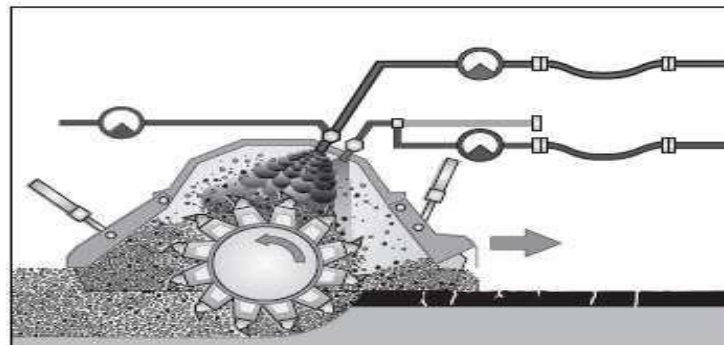
Upjenjeni bitumen proizvodi se dodavanjem male količine vode u vrući bitumen.

Kada se ubrizgava u vrući bitumen, voda naglo isparava, uzrokujući pjenjenje bitumena u zasićenoj pari u kojoj bitumen ekspandira 20 do 30 puta od svog izvornog volumena. Pjenjenje bitumena rezultira nizom poboljšanja te se može postići dugotrajniji premaz i kod hladnih i mokrih frakcija agregata. U procesu pjenjenja može se proizvesti manje viskozno vezivo, ova vrsta veziva ima nisku temperaturu koja obično ne prelazi 60°C. [7]

Ukoliko se odluči na mješavinu s upjenjenim bitumenom potrebno je prvo ispitati njegove karakteristike. U mješavini sa upjenjenim bitumenom može se koristiti i cement u funkciji aktivnog punila. Koristi se u sličnom omjeru kao i bitumenska emulzija no kod ove vrste bitumena dodaje se i 2-5% vode u odnosu na težinu (Slika 6 i 7). [7]



Slika 6: Nastajanje upjenjenog bitumena [7]



Slika 7: Miješanje upjenjenog bitumena [7]

Valjanje započinje odmah nakon polaganja mješavine te je potrebno vlaženje guma valjaka kako bi se spriječilo lijepljenje mješavine. Neposredno nakon ugradnje i zbijanja može se pristupiti ugradnji asfaltnih slojeva.

Korištenje upjenjenog bitumena smanjuje emisije ugljičnog dioksida i plinova koji nastaju izgaranjem, osobito kada se koristi kao hladno vezivo za sanaciju i pomiješan s obnovljenim asfaltnim materijalima za kolnik. [2]

#### Ograničenja specifična za upjenjeni bitumen

Za upjenjeni bitumen potrebno je da u materijalu bude dovoljno finih čestica kako bi se olakšala disperzija bitumena. Tamo gdje materijal ima manjak sitnih čestica, proizvodit će se loša mješavina koju karakterizira mnogo grudica bogatih bitumenom, tako loša disperzija bitumena neće osigurati potrebno povećanje kohezije, niti će smanjiti osjetljivost na vlagu. Iz tog razloga, minimalni preporučeni sadržaj sitnih čestica (postotak koji prolazi kroz sito od 0,075 mm) je 4%. [6]

Upjenjeni bitumen se neće raspršiti ako je temperatura materijala preniska za vrstu bitumena koji se pjeni. Općenito, upjenjeni bitumen se ne preporučuje kada je temperatura materijala koji se obrađuje ispod 15°C. Međutim, kada se zapjeni bitumen niske viskoznosti, na primjer, Pen > 150, materijal na nižim temperaturama je uspješno tretiran. [6]

Sadržaj vlage u materijalu koji se obrađuje igra glavnu ulogu u raspršivanju bitumena. Idealan sadržaj vlage u vrijeme miješanja je "točka rasta" materijala, što je sadržaj vlage pri kojem materijal postiže maksimalan volumen.

To je obično između 65% i 75%. Loša disperzija bitumena događa se kada je materijal previše mokar (fine čestice "plivaju") ili suviše suh (nedovoljno vlage da se krhotine bitumena zagriju i prijanjaju na sitne čestice), što rezultira velikim brojem grudica. [6]

#### ➤ Cement

Količina cementa u odnosu na ukupnu količinu iznosi 1 – 4 %. Za cement je karakteristično da se može dodati i u suhom stanju (slika 8). Dodavanjem takve vrste cementa može stvoriti probleme s otprašivanjem. Ukoliko se koristi manja količina tada se povećava opasnost od oštećenja uzrokovana vlagom odnosno smrzavanjem i odmrzavanjem te dovodi do gubitka čvrstoće. Ukoliko se koristi količina cementa u većim postocima tada dolazi do proizvoda koji ima osobine krutog materijala koji je sklon nastajanju pukotina od skupljanja. [6]

Mehaničko zbijanje valjcima nakon ugradnje mješavine sa cementom započinje odmah nakon polaganja mješavine. Polaganje idućeg sloja izvodimo nakon postizanja tlačnih čvrstoća dobivenih nakon 7 dana. [6]



Slika 8. Cement [7]

### **2.4.1. Odabir veziva**

Pri odabiru veziva potrebno je voditi računa o njegovim svojstvima. Za mješavine veziva osiguravaju brže očvršćivanje kao i postizanje ranije čvrstoće te povećanja otpornosti na vlagu. Ukoliko se laboratorijskim ispitivanjem utvrdi da materijal dobiven mehaničkim glodanjem asfaltnog kolnika koji se koristi za proizvodnju hladne reciklaže ne zadovoljava indeks platičnosti, odnosno da je rezultat ispitivanja indeksa plastičnosti viši od  $IP > 10$  primjenjuje se hidratizirano vapno u svrhu stabilizacije postojećeg nosivog sloja. [4]

Ako se u svrhu nosivog sloja želi iskoristiti postojeći asfaltni kolnik s minimalnim udjelom mehanički glodanog asfaltnog kolnika od 65 % ili više, te ako je laboratorijskim ispitivanjem utvrđena penetracija bitumenskog veziva u postojećoj asfaltnoj konstrukciji veća od 15 (1/10 mm) za odabir veziva usvaja se upjenjeni bitumen.

Ako je penetracija bitumenskog veziva u postojećoj asfaltnoj konstrukciji manja od 10 (1/10 mm) tada se za odabir veziva usvaja bitumenska emulzija. [4]

Kod postojećih kolničkih konstrukcija za nosive slojeve materijali kod kojih je udio glodanog asfalta manji od 65 %, i penetracija bitumenskog veziva u postojećoj asfaltnoj konstrukciji manja od 5 (1/10 mm) tada se za odabir veziva usvaja cement. [4]

Važeća tehnička regulativa općenito propisuje metode ispitivanja za projektiranje mješavine koje mogu služiti za određivanje količine aditiva i vode potrebne za miješanje te ima li reciklirana smjesa odgovarajuću otpornost na deformaciju i strukturalnu čvrstoću.

Točan udio usvojenog veziva određuje se projektom sastava reciklirane mješavine (tablica 3). Zajednička svojstva svih navedenih veziva koja se koriste pri izradi hladno recikliranih slojeva je poboljšanje nosivosti kolničkih konstrukcija. [8]

Tablica 3: Preporučena veziva u odnosu na sastav reciklirane mješavine [4]

| Sastav reciklirane mješavine  |  | Preporučeno vezivo                |
|-------------------------------|--|-----------------------------------|
| Udio glodanog asfalta (% m/m) | Penetracija bitumena iz glodanog asfalta (1/10 mm) |                                   |
| < 65                          | < 5  | Bitumensko ili hidraulična veziva |
| 65 – 100                      | 5 do 15  | Bitumensko vezivo*                |
| 100                           | > 15   | Upjenjeni bitumen**               |

\* Dodati u mješavinu najmanje 15% m/m agregata 0/4 mm

\*\* Dodati u mješavinu najmanje 30% m/m drobljenog agregata potrebne granulometrije. Bitumenska emulzija se u ovom slučaju ne preporuča.

### 3. RECIKLIRANJE HLADNIM POSTUPKOM METODOM IN-SITU

#### 3.1 Metoda In-situ

Recikliranje in-situ je tehnika koja se temelji na postupku obrade materijala iz sastava postojeće kolničke konstrukcije na licu mjesta. Materijal koji se glode (slika 9), ne transportira se na postrojenje gdje se miješa već se sve izvodi na samom gradilištu. Brži je način izvedbe od metode in-plant.

Proces kod tehnike na licu mjesta sastoji se od usitnjavanja izglodanog materijala već postojeće konstrukcije, određivanja veličine zrna tog recikliranog kolnika, dodavanja aditiva ukoliko je potrebno, te drugih bitumenskih veziva, miješanje svih komponenti, zatim ugradnja reciklirane mješavine i polaganje novog asfaltnog zastora.

Pri cijelom tom procesu potrebno je zadovoljiti zahtjev za odgovarajućom debljinom kolnika kao i zahtjev za kvalitetom materija.





Slika 9: Asfaltni materijal postojeće konstrukcije nakon glodanja

### 3.2. Korištenje mehanizacije

Postupak korištenja mehanizacije metodom in-situ je organizacijsko tehnološki process koji se sastoji od niza međusobno povezanih radnji.

Prva u nizu radova je mehaničko glodanje postojeće kolničke konstrukcije do projektirane dubine gdje osim asfaltnih slojeva mogu biti uključeni i ostali slojevi kolničke konstrukcije (stabilizirani, mehanički zbijeni slojevi). Mehanički glodani material se ostavlja na mjestu glodanja te se mehanički zbija na projektiranu visinsku kotu.

Druga faza u nizu je posipanje cementa na mehanički glodani sloj sa kamionskom cisternom koja ima mogućnost preciznog doziranja cementa.

Sljedeća faza u nizu je proizvodnja hladno recikliranog asfaltnog kolnika, umješavanjem mehanički glodanog materijala i razastrtog cementa sa upjenjenim bitumenom i optimalnim udjelom vode koji se dozira sa reciklerom.

Sve dodane komponente koje se koriste pri proizvodnji moraju imati kontrolu doziranja mikro procesorom u svrhu preciznog udjela komponenti.

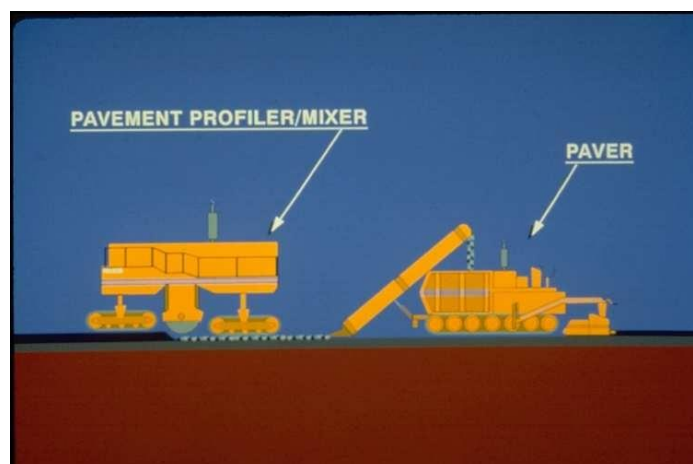
## Vlak s jednom jedinicom

Vlak s jednom jedinicom (slika 10, 11) sastoji se od stroja koji sadrži glavu za glodanje, smještenu u donjem položaju za glodanje koja zahvaća kolnik do potrebne dubine glodanja te veličine zrna te prskalice u komori za glodanje koja dodaje tekući aditiv mješavini. Količina ovisi o volumenu materijala te se određuje prema dubini, širini glodanja te brzini napredovanja jedinice. Može sadržavati uređaj za drobljenje i prosijavanje. [8]

Nakon stroja za recikliranje tim djelom trase prolaze standardni strojevi za ugradnju.



Slika 10: Vlak s jednom jedinicom



Slika 11: Vlak s jednom jedinicom [7]

### Vlak s dvije jedinice

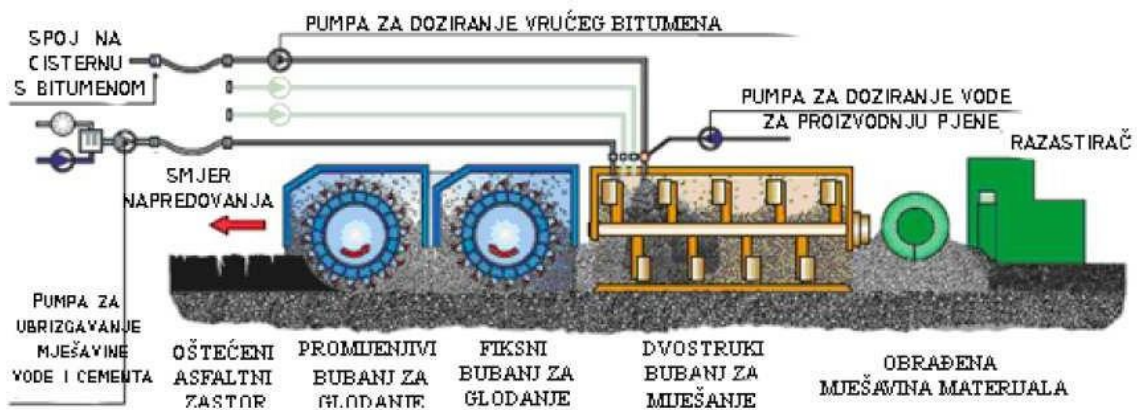
Kod vlaka s dvije jedinice (Slika 12) bitna je suradnja dva stroja. Prvi je stroj za glodanje koji djeluje u punoj širini voznog traka i glođe kolničku konstrukciju na određenu debljinu nakon čega ju odlaže u prihvatnu košaru finišera miješalice te uređaja koji pomoću računala precizno dozira količinu veziva. Smješten je pored bubnja za miješanje. Drugi je finišer s mješalicom – čija uloga je da miješa i proizvodi recikliranu mješavinu. [8]



Slika 12: Mehancizacija za izradu hladne reciklaže, modeli WR 2500 i WM 400

### Vlak s više jedinica

Vlak s više jedinica (slika 13, 14) sastoji se od stroja za glodanje koji djeluje u punoj širini voznog traka i glođe kolničku konstrukciju na određenu debljinu nakon čega transportira materijal do jedinice za prosijavanje i drobljenje koji se nalazi na prikolici s montiranim jedinicama za prosijavanje i drobljenje. Prosijavanje se vrši s dva sita veličine otvora 37,5 mm i 31,5 mm, ostatak koji je ostao nakon prosijavanja, odnosno zrna koja su većih dimenzija od potrebnih šalju se na drobljenje te se ponovno vraćaju na prosijavanje. Sljedeći u nizu je uređaj za doziranje koji osigurava potrebnu količinu materijala u mješalicu te računala koji precizno dozira količinu veziva prije ulaska u finišer s mješalicom čija uloga je da miješa i proizvodi recikliranu mješavinu dok se ne dobije homogena smjesa. [8]



Slika 13: Vlak s više jedinica [8]



Slika 14: Vlak s više jedinica na gradilištu [8]

Nakon što se dobila mješavina recikliranog materijala i veziva tu je mješavinu potrebno ugraditi u kolničku konstrukciju. Stroj koji se koristi za taj dio procesa je motorni grejder.

Pri ugradnji materijala potrebno je izvesti kolnik bez segregacije te eliminirati probleme neravnosti a to se postiže sa kvalitetno proizvedenom recikliranom mješavinom te osposobljenom operativnom radnom snagom.

Mješavine kod tehnike hladnog recikliranja su nešto kruće od mješavina kod vrućih asfaltnih konstrukcija te je potrebno koristiti teže valjke (slika 15). Najčešće se koriste teški pneumatiki s vibro valjcima.



Slika 15. Valjak za mehaničko zbijanje

#### 4. RECIKLIRANJE HLADNIM POSTUPKOM METODOM IN-PLANT

Od šezdesetih godina razvijene su mnoge vrste hladnih miješalica koje su lako pokretne i također prikladne za recikliranje asfaltne mješavine. Moderna postrojenja za hladno miješanje imaju istu preciznost kao i postrojenja za vrući proizvedeni asfalt čak i ako su sustavi upravljanja manje opsežni. U hladnoj proizvodnji glodani asfaltni materijal se ne zagrijava već ima istu temperaturu kao i okolina tijekom miješanja, koja je približna 15-30°C.

Iako dominiraju kontinuirani procesi miješanja, koriste se i postrojenja za šaržno miješanje. Zajednička značajka postrojenja je visok stupanj mobilnosti i kratko vrijeme puštanja u pogon nakon premještanja (cca 24h). Ova metoda je prikladna za rad u malim razmjerima, jer blizina gradilišta ili privremenog skladišnog prostora može smanjiti transportne potrebe. [4]

Proizvodnja hladne reciklaže sa upjenjenim bitumenom in-plant metodom predstavlja jedan od najučinkovitijih načina korištenja recikliranog asfalta u novim projektima. Vrijeme od proizvodnje, prijevoza do završnog mehaničkog zbijanja ugrađenog sloja sukladno tehničkim uvjetima za izradu nosivih slojeva kolnika tehnologijom recikliranja po hladnom postupku iznosi najduže do 5 sati. [4]

Proizvodno postrojenje (slika 16), za proizvodnju hladno reciklirane mješavine asfaltnog kolnika metodom in-plant potrebno je pozicionirati tako da je vrijeme prijevoza reciklirane mješavine što kraće, zbog gubitka optimalne vlažnosti reciklirane mješavine što je jako bitno zbog kvalitetne izvedbe recikliranog sloja. [4]

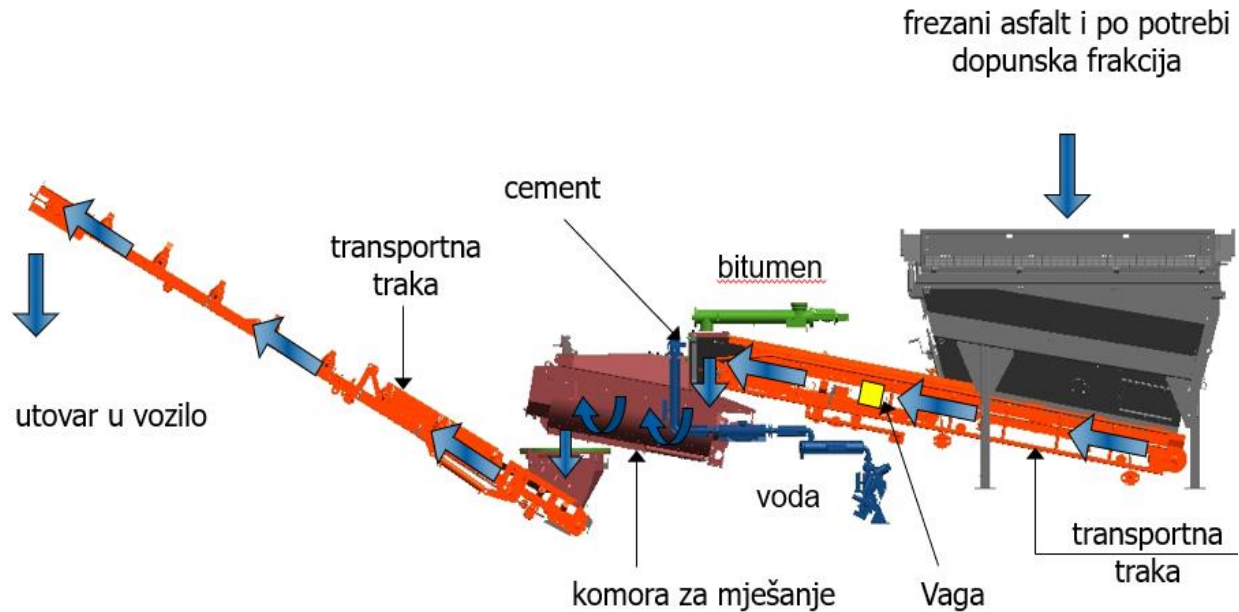


Slika 16. Postrojenje za proizvodnju hladno reciklirane mješavine metodom in-plant

Glodani asfalt kao sirovina za reciklažu prevozi se do proizvodnog postrojenja te se po potrebi vrši usitnjavanje na drobilišnom postrojenju.

Prvi korak u procesu proizvodnje (slika 17), hladne reciklaže je prikupljanje asfaltnog materijala koji će se reciklirati. Ovaj materijal može biti istrošeni asfaltni sloj s postojeće ceste ili drugi asfaltni materijal koji se želi ponovno upotrijebiti.

Prikupljeni asfaltni materijal se prethodno obrađuje kako bi se uklonile nečistoće i poboljšala njegova kvaliteta. Ova priprema uključuje drobljenje i mljevenje asfaltnog materijala, te eventualno dodavanje drugih agregata ili aditiva kako bi se postigla optimalna smjesa za reciklažu.



Slika 17. Proces proizvodnje metodom in-plant [3]

U sljedećem koraku, bitumen se upjenjuje kako bi se postigla bolja adhezija s agregatima. Upjenjavanje bitumena se postiže korištenjem posebnih uređaja koji ubrizgavaju zrak u bitumen i vodu pod kontroliranim uvjetima. Ovaj proces stvara finu pjenu od bitumena koja se zatim miješa s asfaltnim materijalom.

Uz upjenjeni bitumen, pripremljeni asfaltni materijal se miješa u posebnim mješalicama kako bi se postigla homogena smjesa.

Nakon miješanja hladna reciklaža sa upjenjenim bitumenom je spremna za dostavu i ugradnju na određenoj lokaciji. Ovaj reciklirani materijal može se koristiti za izgradnju novih cesta ili popravke postojećih.

#### 4.1. Prednost proizvodnje hladne reciklaže sa upjenjenim bitumenom in-plant metodom

Smanjenje troškova: [2] Korištenje hladne reciklaže s upjenjenim bitumenom može smanjiti troškove u usporedbi s proizvodnjom novog asfalta. Ova metoda omogućuje ponovno korištenje postojećeg asfaltnog materijala, što rezultira manjim troškovima nabave novih materijala.

Održivost i smanjenje otpada: [2] Proizvodnja hladne reciklaže s upjenjenim bitumenom pridonosi održivosti jer koristi reciklirane materijale umjesto novih sirovina. Ova metoda smanjuje količinu asfaltnog otpada koji završava na odlagalištima i doprinosi očuvanju prirodnih resursa.



Poboljšana kvaliteta i izdržljivost: [2] Hladna reciklaža s upjenjenim bitumenom omogućuje postizanje visoke kvalitete i izdržljivosti asfaltne smjese. Uz pomoć upjenjenog bitumena, reciklirani materijal može imati bolju adheziju, otpornost na habanje i trajnost.

Smanjenje emisija stakleničkih plinova: [2] Ova metoda proizvodnje asfalta smanjuje emisije stakleničkih plinova u usporedbi s konvencionalnim postupcima. Hladna reciklaža s upjenjenim bitumenom zahtijeva manje energije i niže temperature, što rezultira manjim utjecajem na okoliš.

Reciklirani asfaltni kolnici sve više dobivaju na popularnosti zbog svojih brojnih prednosti i pozitivnih utjecaja na okoliš. Istraživanje koje su proveli prof. Xiaodan Chen i prof. Hao Wang sa Sveučilišta u New Jersey-u nam govori da kvantificiranje emisija stakleničkih plinova asfaltnih kolnika koji sadrže obnovljeni asfaltni kolnik koriste procjenu životnog ciklusa s vremenskim aspektom. Faze životnog ciklusa uključuju nabavu sirovina, proizvodnju postrojenja, izgradnju, održavanje i kraj životnog vijeka. Vremenski ovisna funkcija raspadanja ugljičnog dioksida usvojena je kako bi se uhvatio učinak vremena u procjeni inventara životnog ciklusa. Studija slučaja obnove prometnice pokazuje da četiri kritična čimbenika mogu utjecati na utjecaj recikliranja kolnika na okoliš, uključujući sadržaj recikliranog materijala, učinkovitost miješanja čistog i recikliranog veziva, sadržaj vlage recikliranog agregata i razine performansi kolnika. Kako se udio recikliranog materijala povećava, tako se smanjuju emisije stakleničkih plinova. Međutim, prednosti uštede sirovina mogu se kompenzirati povećanim sadržajem vlage recikliranog agregata i kraćim vijekom trajanja kolnika s kolnikom od recikliranog asfalta. Kako se sadržaj vlage u recikliranom agregatu povećava, performanse recikliranog asfaltnog kolnika moraju doseći višu razinu kako bi se izbjeglo opterećenje okoliša. S druge strane, rezultati pokazuju da je utjecaj recikliranja asfaltnih kolnika na okoliš precijenjen ako se ne uzme u obzir vremenski aspekt. Ovo otkriće pojačava važnost obrasca fizičkog raspadanja emisija stakleničkih plinova tijekom vremena u procjeni životnog ciklusa za potencijal globalnog zatopljenja. [9]

## 5. POČECI KORIŠTENJA TEHNOLOGIJE HLADNOG RECIKLIRANJA U REPUBLICI HRVATSKOJ

Iako se u svijetu metoda recikliranja koristi zadnjih 30 godina u Hrvatskoj se tek prije 15 godina počinje koristiti recikliranje asfaltnih slojeva. [8]

Tehnika recikliranja se prvi put primijenila 2008. godine na državnoj cesti D55, dionica Vinkovci – Županja, između Vinkovaca i Gradišta. Točnije, na tom djelu trase koristila se tehnika hladnog recikliranja na licu mjesta. Dionica je bila duljine 17,8 km. [8]

Izabrana je upravo ta dionica jer ima dobre geometrijske elemente, nisu potrebne korekcije nivelete, promjene širine kolnika. Na tom djelu dionice bilo je nužno samo izvršiti korekciju poprečnih nagiba. [8]

### 5.1. Karakteristike kolničke konstrukcije prije recikliranja

Na kolničkoj konstrukciji ceste na kojoj je bilo nužno izvesti sanaciju prvo su se vršila terenska ispitivanja od strane Grupe za gospodarenje u okviru Hrvatskih cesta d.o.o. na čelu sa dr. sc. Matom Sršenom, čiji su rezultati ispitivanja iskazani u Stručnom radu objavljenom u časopisu Građevinar 2010. god. [8]

Pripremni radovi započeli su vizualnim pregledom postojeće kolničke konstrukcije. Vizualnim pregledom prikupljene su informacije u vidu tipova oštećenja kolnika. Mjerenjem dubine kolotraga najveća deformacija koja se zatekla varirala je od 2 do 22 mm (veličine su izmjerene laserskim profilografom). Također, na većem djelu dionice površina kolnika je bila raspucana te je bilo više prethodnih popravaka ostalih oštećenja. Maksimalni Međunarodni indeks ravnosti za to područje iznosio je 4,9 m/km dok je prosječna vrijednost IRI iznosila 2 m/km. Provjerom kolničke konstrukcije na smrzavanje utvrđeno je da kolnik na nekoliko dijelova te dionice nije imao odgovarajuću otpornost na smrzavanje. Nosivost kolnika dobivena je na temelju defleksija mjerenih deflektografom La Croix. Kako bi se utvrdili slojevi odnosno debljine tih slojeva izvedene su sondažne bušotine na temelju čega je

dokazano da se kolnička konstrukcija sastojala od nosivog sloja prosječne debljine 35 cm te od dva do četiri asfaltna sloja ukupne prosječne debljine od 22 cm. [8]

Na temelju dobivenih podataka analize strukture kolnika, laboratorijskih ispitivanja materijala postojećeg kolnika, te izvodivosti postupka rehabilitacije od strane projektanta

nudila su se tri rješenja sanacije: [8]

- izvedba nadogradnje s nevezanim kamenim materijalom, nosivim slojem od bitumeniziranog kamenog materijala potrebne debljine te slojem od završnog asfaltnog sloja
- uklanjanje svih asfaltnih slojeva (debljine i do 25 cm) – neracionalno rješenje koje je brzo odbačeno
- postupak hladnog recikliranja

Razmatrala su se sva tri slučaja no odabrao se treći zbog prednosti te zbog same cijene. Dubina reciklaže je određena prema dubini kolotraga te prema debljinama slojeva koji će osigurati nosivost. [8]

## 5.2. Postupak recikliranja

Na temelju dobivenih podataka nakon provedenih terenskih i laboratorijskih ispitivanja odabrano je glodanje u debljini od 22 cm. Zbog nepovoljnog granulometrijskog sastava mješavine iz postojeće kolničke konstrukcije bilo je potrebno dodati još agregata zbog nedovoljno punila koje je potrebno za disperziju upjenjenog bitumena. Na postojeći kolnik razastro se sloj drobljene kamene sitneži maksimalne veličine zrna 4mm prosječne težine 75 – 105 kg/m<sup>2</sup>.

Nakon postavljanja kamenog agregata izvršeno je recikliranje razastrtog materijala debljine 22 cm te debljina prosutog kamenog materijala. Ukupna debljina iznosila je oko 28 cm. Izglodani sloj povećava volumen za 5 % što je bilo uzeto u obzir pri projektiranju.

U mješavinu su dodana veziva poput upjenjenog bitumena (2-3%) zbog velikih trajnih deformacija - kolotraga, cementa (1-2%) te vode (4,5-5,5%). [8]

Tehnologija kojom se izvršio postupak recikliranja sastojala se od strojeva: [8]

- cisterne za bitumen koja prevozi vrući bitumen zagrijan na 180°C
- WM 1000 (slika 18), sa spremnikom 25 t cementa i 14 m<sup>3</sup> vode koji služi za miješanje cementa i vode te dodaje mješavinu u stroj WR 2500



Slika 18: Mehanizacija za izradu hladne reciklaže, model WM 1000

- WR 2500 (slika 19), Služi za glodanje postojećeg asfaltnog sloja te ima ugrađen sustav koji dozira vrući bitumen i vodu u materijal čineći upjenjeni bitumen te dozira cementno mlijeko/suspenciju [8]



Slika 19: Mehanizacija za izradu hladne reciklaže, model WR 2500

- Motorni grejder (slika 20), dodatno razastire recikliranu mješavinu na traženu visinu čime osigurava zadovoljavajuću uzdužnu i poprečnu ravnost



Slika 20: Motorni grejder za razastiranje

- Valjak (slika 21), služi za mehaničko zbijanje ugrađenog sloja



Slika 21: Tehnologija ugradnje na gradilištu [8]



Slika 22. Vlak za recikliranje [8]

Mješavina za stabiliziranje koja se sastoji od cementne stabilizacije te upjenjenog bitumena je trajna mješavina te mu upjenjeni bitumen služi kao vezivo. Upjenjeni bitumen se obavija oko zrna frezane smjese. Sam postupak izveo se s glodalicom koja je imala spremnik za bitumen te prikolicom za cement i vodu. [8]

Nakon sloja izvedenog metodom hladnog recikliranja postavljeno je vruće asfaltno pojačanje (BNS 22, debljine 60mm) te pokrovni sloj s polimerom modificiranim bitumenom (AB 11E, debljine 40mm). Bitumen koji se koristio u završnom sloju je ojačan polimerom zbog značajnog prometnog opterećenja. [8]

### **5.3 Analiza kvalitete nakon vremenskog perioda od dvije godine**

U rujnu 2010. godine, Grupa za gospodarenje u okviru Hrvatskih cesta d.o.o dvije godine nakon izgradnje predmetne dionice provela je vizualni pregled rehabilitirane dionice. Tim pregledom ustanovljeno je da cesta ne pokazuje nedostatke u vidu uzdužne neravnosti, pukotina dok je dubina kolotruga iznosila oko 3,0 mm. Na osnovi ustanovljenih rezultata možemo zaključiti da hladno reciklirana struktura kolnika iskazuje značajke sukladno očekivanim. [8]

## 6. KONTROLA KVALITETE

U sklopu proizvodnje hladno reciklirane mješavine sa upjenjenim bitumenom provodi se kontrola kvalitete u svrhu dokazivanja kvalitete proizvedene i ugrađene hladno reciklirane mješavine.

Kontrola kvalitete vrši se sukladno trenutno važećim Tehničkim uvjetima za izradu nosivih slojeva kolnika tehnologijom recikliranja po hladnom postupku, Hrvatske ceste, 2013. [4]

Prije ugradnje hladno recikliranog sloja metodom in-plant potrebno je provjeriti nosivost sloja ispitivanjem modula stišljivosti (Slika 23). Prilikom ugradnje vrši se uzorkovanje hladno reciklirane mase za potrebe ispitivanja: [4]

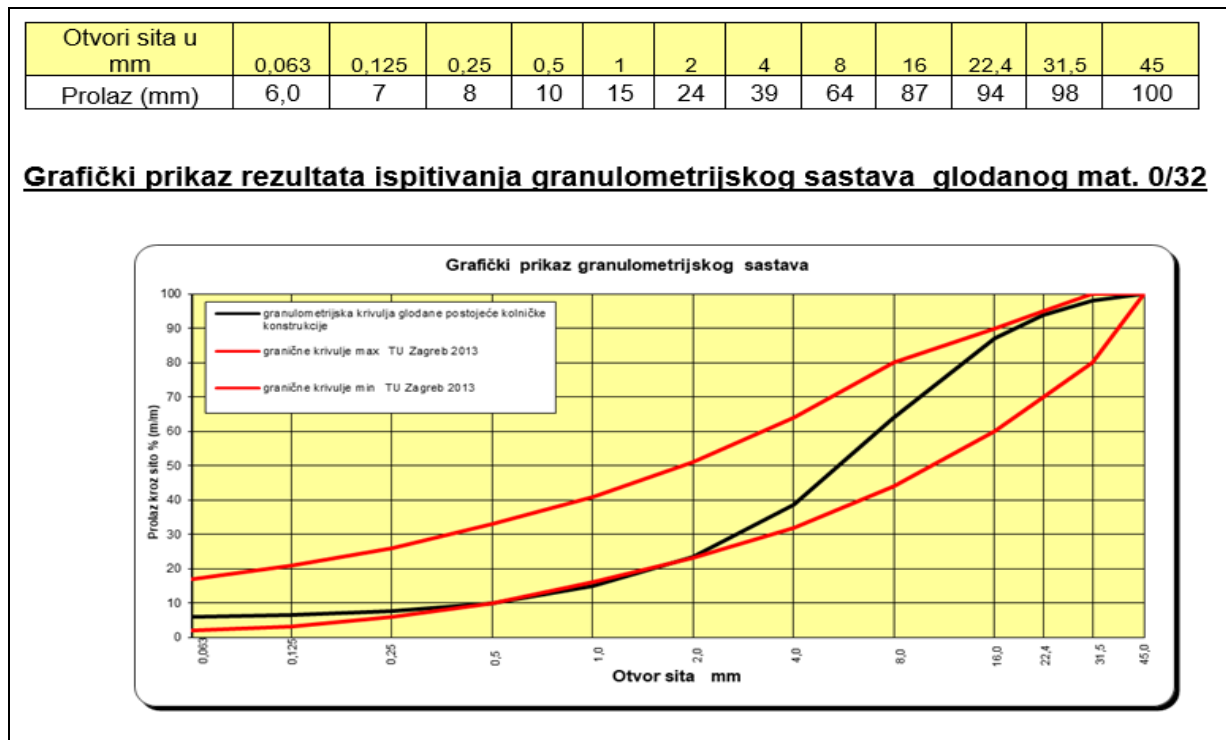
- Određivanja udjela vlage
- Ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće suhog i mokrog uzorka
- Gustoće suhe mješavine
- Granulometrijsku analizu



Slika 23: Ispitivanje modula stišljivosti kružnom pločom

U sklopu kontrole kvalitete vrši se uzorkovanje hladno reciklirane mješavine, te je potrebno provesti ispitivanje granulometrijskog sastava.

Ispitivanje granulometrijskog sastava, (Slika 24) hladno reciklirane mješavine mora zadovoljiti granične vrijednosti koje su zadane tehničkim uvjetima (Tablica 4). Na primjeru je vidljivo da kumulativni prolaz na situ 1,0 mm pokazuje manje odstupanje od traženog. [4]



Slika 24: Grafički prikaz granulometrijskog sastava glodane asfaltne mješavine

Tablica 4: Uvjeti za granulometrijski sastav [4]

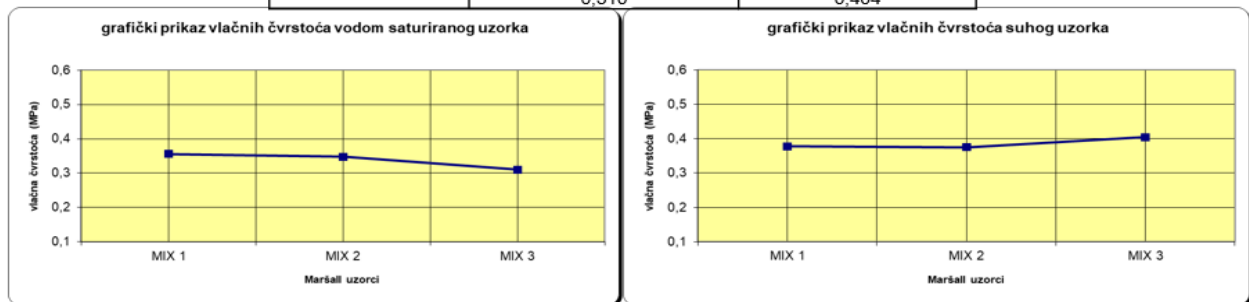
| Otvor sita [mm] | Kumulativni prolaz kroz sito [% (m/m)] |         |
|-----------------|--|---------|
|                 | Najmanji                               | Najveći |
| 0,063           | 2                                      | 17      |
| 0,125           | 3                                      | 21      |
| 0,25            | 6                                      | 26      |
| 0,5             | 10                                     | 33      |
| 1               | 16                                     | 41      |
| 2               | 23                                     | 51      |
| 4               | 32                                     | 64      |
| 8               | 44                                     | 80      |
| 16              | 60                                     | 90      |
| 22,4            | 70                                     | 95      |
| 31,5            | 80                                     | 100     |
| 45              | 90                                     |         |
| 63              | 100                                    |         |



Nakon provedenog laboratorijskog ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće suhog i mokrog uzorka hladno reciklirane mješavine (Tablica 5), te dobivenih rezultata iz kojih je vidljiva prosječna vlačna čvrstoća vodom saturiranih uzoraka 0,338 (Mpa) i suhog uzorka 0,385 (Mpa) i pripadajućih grafičkih prikaza moglo se zaključiti da manja odstupanje od traženih granulometrijskih vrijednosti ne utječu na bitna svojstva hladno reciklirane mješavine.

Tablica 5: Rezultati ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće

| Marshall uzorci (Mješavina) | Vlačna čvrstoća vodom saturiranog uzorka (N/mm <sup>2</sup> ) / (MPa) | Vlačna čvrstoća suhog uzorka (N/mm <sup>2</sup> ) / (MPa) |
|-----------------------------|---|---|
| 1                           | 0,356   | 0,378   |
| 2                           | 0,348   | 0,375   |
| 3                           | 0,310   | 0,404   |



Nakon razastiranja te mehaničkog statičkog i dinamičkog zbijanja potrebno je izvršiti utvrđivanje stupnja zbijenosti na način da se volumetrom (slika 25) odredi volumen mase sloja te usporedi sa gustoćom uzorka dobiven laboratorijskim zbijanjem modificiranim Proctorovim postupkom (tablica 6). Na osnovu izračuna rezultata ispitivanja stupnja zbijenosti u čiji izračun ulazi udio vode, prostorna masa suhog uzorka dobivenih ispitivanjem volumetrom te prostorne mase dobivene po proctorovom postupku, dobiveni rezultat stupnja zbijenosti od 99,3%, sukladno Tehničkim uvjetima za izradu hladno recikliranih slojeva kolničke konstrukcije, zadovoljava minimalno tražene vrijednosti od 98,0%.



Slika 25. Utvrđivanje stupnja zbijenosti volumetrom

Tablica 6: Rezultati ispitivanja stupnja zbijenosti

| REZULTATI ISPITIVANJA STUPNJA ZBIJENOSTI |                   |            |           |                             |                            |                    |          |
|--|-------------------|------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|----------|
| Redni broj                               | Datum ispitivanja | Stacionaža | Udio vode | Prostorna masa suhog uzorka | Prostorna masa po Proctoru | Stupanj zbijenosti | Napomena |
| 1  | -                 | -          | 7,4       | 1,569                       | 1,580                      | 99,3               |          |

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu analizirana je hladna reciklaža kao održiva tehnika za obnovu asfaltnih površina. Cilj rada bio je pružiti uvid u prednosti, tehniku provedbe i kvalitetu dobivenog materijala putem hladne reciklaže.

Analizom provedenih laboratorijskih i terenskih ispitivanja možemo zaključiti da hladna reciklaža ima brojne prednosti u odnosu na tradicionalne metode popravaka i obnove asfaltnih površina. Korištenje recikliranog materijala smanjuje potrebu za eksploatacijom prirodnih resursa, smanjuje otpad i negativan utjecaj na okoliš te rezultira energetski učinkovitijim procesom. Osim toga, hladna reciklaža može biti ekonomičnija opcija u odnosu na potpuno novu izgradnju ceste, smanjujući troškove materijala i energije.

Također, možemo zaključiti da pravilna primjena hladne reciklaže rezultira kvalitetnim materijalom s odgovarajućim fizičko mehaničkim svojstvima. Parametri kao što su granulometrijska distribucija, udio veziva i kompaktacija bitni su za postizanje visoke stabilnosti i trajnosti recikliranog asfalta.

Unatoč brojnim prednostima, hladna reciklaža ima i određene izazove i ograničenja. Potrebna je pažljiva priprema postojećeg materijala, pravilan izbor aditiva, kontrola kvalitete i kontrolirani uvjeti primjene kako bi se osigurala optimalna kvaliteta recikliranog asfalta. Također, važno je naglasiti da su lokalni uvjeti i zahtjevi bitni za odabir odgovarajuće tehnike i metode hladne reciklaže.

U zaključku, hladna reciklaža predstavlja održivu i ekološki prihvatljivu tehniku za obnovu asfaltnih površina. Korištenjem postojećih asfaltnih materijala umjesto da se stvara potreba za novim materijalima dodatno se smanjuje potreba za eksploatacijom prirodnih resursa poput kamena, šljunka i bitumena. Njena primjena može smanjiti negativan utjecaj na okoliš, smanjiti troškove i pružiti visokokvalitetne ceste. Buduće tehnologije, istraživanja i razvoj u području hladne reciklaže mogu doprinijeti daljnjem poboljšanju njene učinkovitosti i prihvaćenosti u građevinskoj industriji.

U Hrvatskoj od ukupno 57 asfaltnih baza 22 baze su opremljene sa uređajima za dodavanje recikliranog asfalta. Proizvedeno je 2,57 milijuna tona asfaltnih mješavina koje su se koristile za izgradnju te održavanje cesta. Od toga je samo 19% od ukupne proizvodnje proizvedeno sa dodatkom reciklažnog asfalta. Za svu tu količinu koristili su se novi, prirodni agregati i bitumeni. Iz tog podatka vidljivo je koliko su se velike količine agregata bespotrebno uzele prirodi. Reciklirano je po hladnom postupku s upjenjenim bitumenom (uglavnom in-plant postupkom) 21.300 m<sup>3</sup> postojećih kolnika.

Važno je napomenuti da kvaliteta recikliranog asfalta ovisi o pravilnom postupku recikliranja i miješanju s drugim materijalima. Stoga je važno da se reciklirani asfalt proizvodi i koristi u skladu s preporukama i standardima struke.

Uz sve ove prednosti, korištenje recikliranog asfalta je ekološki odgovoran pristup koji može doprinijeti održivom razvoju i smanjenju negativnog utjecaja na okoliš.

## 8. POPIS LITERATURE

- [1] Ceste i mostovi, glasilo Hrvatskog društva za ceste, Via Vita, Zagreb, srpanj/kolovoz 2010.
- [2] Giani M.I., Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling, Milano, 2015.
- [3] Wirtgen-Priručnik za hladnu reciklažu, RO.Technologies AG, Zürich, studeni 2004.
- [4] Tehnički uvjeti za izradu nosivih slojeva kolnika tehnologijom recikliranja po hladnom postupku, Hrvatske ceste, Zagreb, 2013.
- [5] Tehnički uvjeti za asfaltne kolnike, Hrvatske ceste, Zagreb, 2015.
- [6] Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, Southern African Bitumen Association (Sabita), Howard Place, 2020.
- [7] Saleh A., Gáspár L., Advantages and limitations of using foamed bitumen, Acta Technica Jaurinensis, Budapest, 2021.
- [8] Sršen M, Majkić M, Orkić M, Hladno recikliranje asfaltnih kolnika, Građevinar, Zagreb, 2010.
- [9] Xiaodan C. Hao W. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect, Rutgers, New Jersey, 2018.

### Internetski izvori

- [10] <https://www.h-a-d.hr/>