

**Damijan Zore, dipl. inž. grad.**

damijan.zore@igmat.eu

igmat, d. d.,

Zadobrovska cesta 4, 1260 Ljubljana Polje



**doc. dr. Robert Rijavec, univ. dipl. inž. grad.**

robert.rijavec@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



**Strokovni članek**

UDK/UDC: 502.15:625.765(497.4)

# PRIMERJAVA Z BITUMENSKIM VEZIVOM STABILIZIRANEGA MATERIALA Z VROČO ASFALTNO MEŠANICO BITUMEN STABILISED MATERIAL VERSUS HOT MIX ASPHALT

## Povzetek

Asfaltna zmes (ang. HMA – hot mixed asphalt) in z bitumenskim vezivom stabiliziran material (BSM) sta (glavna) materiala, ki se uporabljata pri gradnji, ojačitvah ali obnovah različnih voziščnih konstrukcij v okviru vzdrževanja vozišč. Med njima je kar nekaj razlik, ki jih povežemo s proizvodnim postopkom, načinom vgradnje ter funkcionalnostjo oziroma lastnostmi vgrajene plasti. Te razlike pomenijo, da pristop k načrtovanju teh zmesi ne sodi v razmeroma dobro uveljavljene okvire tradicionalnih metod načrtovanja zmesi, kot je HMA.

Namen tega članka je:

- približati BSM-tehnologijo strokovni javnosti,
  - predstaviti rezultate preiskav pri nas in v tujini ter s tem odpraviti vrzeli oziroma zvišati nivo razumevanja tovrstne tehnologije,
  - spodbuditi uporabo zmesi, s katero dosežemo primerljivo kakovost na ekonomsko in okoljsko bistveno bolj učinkovit način.
- To lahko pripomore k odpravi zaostanka pri vzdrževanju oziroma obnovi cest.

Ključne besede: obnova vozišč, temperaturna segregacija, finančne, časovne in okoljske koristi, BSM

## Summary

Asphalt mixture (HMA – hot mixed asphalt) and bitumen stabilised material (BSM) are the (main) materials used in the construction, reinforcement or renewal of various roadway structures as part of road maintenance. There are quite a few differences among them, related to the production process, the method of installation and the functionality or properties of the installation layer. These differences mean that the design approach for these mixes does not fit into the relatively well-established framework of traditional mix design methods such as HMA.

The purpose of this article is to:

- bring BSM technology closer to the professional public,
- present the results of research in Slovenia and internationally and thus close gaps or improve the level of understanding of this type of technology,
- promote the use of a mix that achieves comparable quality in a significantly more economically and environmentally efficient way. This can help clear backlogs in road maintenance or rehabilitation.

Key words: pavement renewal, temperature segregation, financial, time and environmental benefits, BSM

## 1 UVOD

Okolju prijazna in ekonomsko učinkovita gradnja z uporabo alternativnih materialov je v gradbeništvu vedno bolj pomembna ([Mavi, 2021], [Udomsap, 2020].) To še posebej velja za gradnjo, vzdrževanje in uporabo cest tako zaradi okoljskih kot tudi družbenopolitičnih dejavnikov [Picardo, 2023]. Zaradi večjega zavedanja družbe o vplivu na podnebne spremembe se povečuje pritisk na upravljavce javne infrastrukture in z njimi povezane deležnike, da ukrepajo tudi na področju, ki podpirajo t. i. zelene tehnologije cestogradnje, še posebej zato, ker ta vključuje tudi vzdrževalna dela (v javno korist). In tako so upravljavci velikokrat pred vprašanjem, kako izpeljati »zeleno javno naročilo«, a imamo tudi na to pripravljena priporočila [Praprotnik, 2014]. V nekaterih državah se je začelo dogajati, da so se srečali s pomanjkanjem kakovostnih agregatov za asfaltne zmesi. Poleg tega so se v zadnjem desetletju cene materialov za gradnjo cest močno zvišale ([SURs, 2024], [Infinity Galaxy, 2024]). Ta rast je še posebej izrazita pri bitumnu, vezivu v asfaltne zmesi, ki je trenutno prevladujoča vrsta materiala za plasti voziščnih konstrukcij v Sloveniji. Enega od razlogov za strmo rast cen bitumna je mogoče pripisati tudi prehodu svetovne rabe energije s tradicionalnih fosilnih goriv na obnovljive vire. Poleg tega se izboljšuje učinkovitost rafinerij, zaradi česar se zmanjšuje tudi proizvodnja bitumna, ki je stranski proizvod pri destilaciji nafte. Glede na povišane cene materialov za voziščne konstrukcije se iščejo gradbene tehnologije, ki so hkrati ekonomsko učinkovite in okolju prijaznejše. Tako gospodarski kot tudi okoljski dejavniki so v današnjem času zelo naklonjeni nizkoenergijskim tehnologijam pri gradnji cest, kot je BSM-tehnologija [Zore, 2023]. BSM se po svoji sestavi, strukturi in lastnostih razlikuje od običajnega HMA. Tudi sama tehnologija se razlikuje, vendar na koncu pridemo do primerljivega rezultata z bistveno nižjimi ekonomskimi vložki [Praprotnik, 2014].

Tehnologija je zanimiva tudi z vidika ponovne uporabe materialov, kajti v primeru BSM je na voljo več možnosti. Lahko stabiliziramo samo obstoječe materiale, mešanico obstoječega in (novega) dodanega materiala ali samo nov material. Postopek je velikokrat imenovan tudi »hladna reciklaža« ali »stabilizacija/reciklaža po hladnem postopku«, a moramo vedeti, da je bitumen za pripravo penjenega bitumna pred penjenjem v tekočem stanju, segret na podobno temperaturo kot pri proizvodnji HMA. V primeru uporabe bitumenske emulzije ni tako, bitumenska emulzija je suspenzija drobnih kapljic bitumna v vodi. Proizvajalci običajno priporočajo, da je emulzija pred stabiliziranjem segreta na temperaturo od 50 °C do 60 °C [RS MZI, 2023]. Izraz »hladen« je povezan s temperaturo nevezanega agregata pred stabilizacijo z vezivom. Po drugi strani pa postopke za ponovno uporabo (reciklažo) asfaltov za asfaltne plasti običajno razvrščamo na hladne, tople in vroče postopke na podlagi temperature proizvodnje zmesi [RS MZI, 2001]. Vsak od teh je nadalje razvrščen na postopek ponovne uporabe – reciklaže na obratu (ang. in-plant), in ponovne uporabe na kraju samem ali na mestu ponovne vgradnje (ang. in-situ). Primernost izbora postopka je odvisna od prostorskih danosti uporabe tehnologije, oddaljenosti obrata in od specifičnih vidikov projekta, kot sta ekonomska in tehnološka izvedljivost. Še več, različne tuje študije ([Muthen, 1999], [Lesueur, 2004], [Abreu, 2017]) so pokazale, da so nizkoenergijske tehnologije hladnejših mešanic na splošno bolj prijazne do družbe in oko-

lja. Čeprav so lastnosti vroče recikliranih asfaltne zmesi, proizvedenih na obratu, primerljive z običajnimi vročimi asfaltne zmesmi (tj. s 100 % novim agregatom), je bilo ugotovljeno, da so koristi v smislu trajnosti pri takšnem pristopu zmerno visoke [Thom, 2019]. To je predvsem posledica omejitev, ki jih določajo nacionalne smernice glede količin recikliranega materiala oziroma asfaltne granulata v takšnih mešanicah, običajno do 30 masnih % [RS MZI, 2001]. Druga alternativa je vroča reciklaža asfaltne zmesi na kraju samem. S tem se sicer zmanjšajo stroški, povezani s transportom zmlatega oziroma odrezkanega materiala v proizvodni obrat, vendar so stroški energije zelo visoki, saj tehnologija vključuje segrevanje površine vozišča pred recikliranjem. Poleg tega te tehnologije ni mogoče uporabiti za obdelavo poškodb, globljih od nekaj centimetrov (približno 5 cm). Dorchie [Dorchie, 2008] je prikazal porabo energije za različne tehnologije gradnje voziščnih konstrukcij, zbranih iz različnih virov, vključno z možnostmi recikliranja. Za vsako tehnologijo je bila ocenjena poraba energije za različne postopke. Ugotovljeno je bilo, da je bila poraba energije na tono vgrajenega materiala od 15 % do 20 % manjša za postopek vročega recikliranja v obratu in na mestu vgradnje v primerjavi s HMA (samo novi materiali). Medtem ko je bilo pri hladnih postopkih recikliranja v obratu in na mestu vgradnje opaziti do 30 % oziroma do 80 % zmanjšanje porabe energije.

Proces hladne reciklaže, kot sam izraz pove, se izvaja brez segrevanja materialov. Na splošno vključuje rezkanje, mletje in mešanje materialov plasti obstoječe voziščne konstrukcije skupaj z razmeroma majhnimi količinami bitumna (penjenega/emulgirane) in aktivnega polnila. Ta material imenujemo BSM. Čeprav imata obe tehnologiji BSM (bitumenska emulzija in penjeni bitumen PB) svoje prednosti in slabosti, je npr. v Avstraliji tehnologija z uporabo PB postala pogostejši način obnove asfaltne voziščne konstrukcije zaradi potencialno hitrega, stroškovno učinkovitega in okolju prijaznega postopka gradnje [Austroads Ltd., 2019]. Izbiro ustreznega stabilizacijskega veziva kroji več dejavnikov, vključno s ceno, razpoložljivostjo, značilnostmi materiala, trajnostjo, politiko in izkušnjami. Glavna skrb je vedno cena na enoto. Prihajajo novi produkti, dodatki, ki so še vedno predmet razvoja, in ni nobenega dvoma, da enega samega stabilizatorja ni mogoče uporabiti za vse aplikacije.

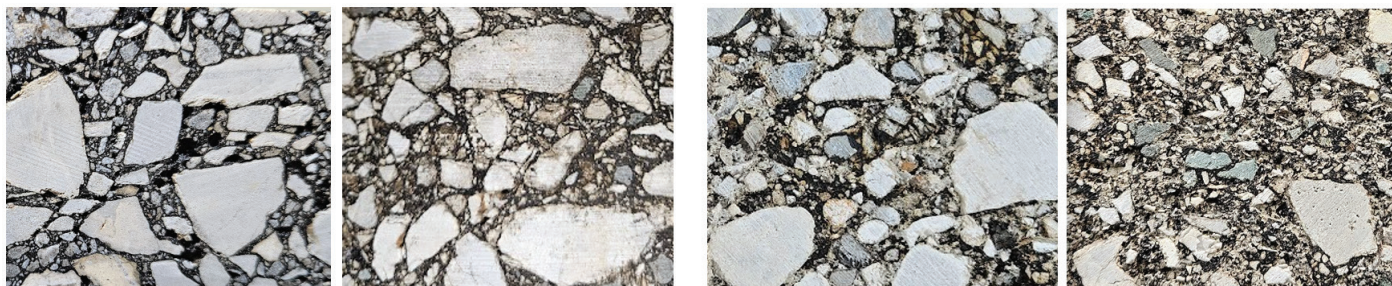
V nadaljevanju je predstavljen pregled bistvenih razlik. V posebnem poglavju so predstavljene prednosti oziroma pomanjkljivosti HMA in BSM.

## 2 RAZLIKE MED BSM IN HMA

Slika 1 prikazuje strukturo zmesi odvzetih jeder vgrajenih plasti HMA in BSM. V danem primeru so bili uporabljeni skoraj identični materiali, vendar sta zmesi proizvedeni po povsem različnih postopkih. Vizualno je zaznati precejšnjo podobnost.

### 2.1 Štiri osnovne razlike med BSM in HMA

Glede obdelave (priprave) uporabljenih materialov za proizvodnjo zmesi se razlikujeta v dveh vidikih – deležu vlage in temperaturi osnovnih materialov. Vhodni materiali za proizvodnjo BSM imajo temperaturo okolice in vsebujejo vodo (oziroma



**Slika 1.** Vizualna primerjava strukture plasti odvzetih jeder (leva dva primera HMA, desna dva BSM) [Igmat, 2023].

določen delež naravne vlage), medtem ko se vhodni materiali za proizvodnjo HMA segrevajo na približno 180 °C (posledično se vsa vlaga upari in odstrani). Proizvedena zmes BSM je torej hladna z določenim deležem vlage, asfaltna zmes HMA pa vroča in brez vlage.

Obe zmesi običajno vsebujeta približno med 4 % in 8 % (neaktivnega) polnila. To je zmes (finih) kamnitih zrn, manjših od 0,063 mm. Tretja razlika je v lastnostih uporabljenega polnila, kajti BSM vsebuje tudi do 1 % aktivnega polnila, cementa ali hidriranega apna.

Četrta razlika je obvitost zrn z bitumnom. Pri proizvodni BSM penjeni bitumen obviije in se zlepi večinoma samo s finimi delci (večja zrna ostanejo neobvita), s tem ko vroč bitumen pri proizvodnji HMA obviije vsa zrna.

Zgoraj predstavljene razlike bistveno vplivajo na lastnosti zmesi in plasti.

## 2.2 Proizvodnja zmesi

### 2.2.1 Proizvodnja asfaltne zmesi HMA

Po svetu in v Sloveniji so se zaradi doseganja zelo uspešne operativnosti najbolj uveljavili stacionarni tipi obratov za proizvodnjo asfaltnih zmesi s šaržnim načinom proizvodnje. Ti zagotavljajo najvišjo stopnjo zaupanja v konstantnost lastnosti proizvedene zmesi. Tudi če se pojavi odstopanje zrnivosti vhodnih materialov, to ne predstavlja bistvenega odstopanja zrnivosti proizvedene zmesi. Uporabljene frakcije kamnitih zrn se namreč v asfaltnem obratu na vibracijskih sitih ponovno presejejo in razporedijo po nazivnih velikostih v pripadajoče presejke oziroma vroče silose. Več ko je silosov različnih zrnivosti, manjše bo odstopanje skupne zrnivosti proizvedene zmesi, kar je bistveno za fizikalne in mehanske lastnosti zmesi oziroma plasti.

Vroč bitumen je doziran v osušeno vročo zmes kamnitih zrn, ki ima v fazi vgrajevanja funkcijo maziva, kar pripomore k lažjemu in boljšemu zgoščanju plasti. Ko se plast ohladi, bitumen preide v svojo primarno vlogo veziva.

### 2.2.2 Proizvodnja stabilizirane zmesi BSM

BSM lahko proizvodimo na obratu ali na mestu vgraditve. Proizvodnja na obratu se izvaja po postopku (enostavnejše) kontinuirne proizvodnje. Iz dveh zalogovnikov oziroma prekatov se vhodna materiala neprekinjeno dovajata v mešalnik, kjer se

med mešanjem dodaja vezivo in vodo. V primeru, da je zrnavost uporabljenih materialov ves čas ustrezna in konstantna, potem je tudi skupna zrnavost proizvedene zmesi ustrezna. Lahko pa se pojavi odstopanje zrnivosti vhodnih materialov, kar je treba zaznati in primerno ukrepati:

- v primeru manjšega odstopanja je v določenih primerih možno izboljšati lastnosti proizvedene zmesi s korekcijo nastavitve deležev materialov na obratu,
- če je odstopanje večje, zmes ni primerna za tovrstno uporabo. Da se temu v čim večji možni meri izognemo, je treba predhodno vzorčiti in ugotavljati lastnosti vhodnih materialov (na odlagališču) ter s sejanjem ali drobljenjem izboljšati ali izločiti neustrezen material,
- odstopanje zrnivosti pri proizvodnji na mestu vgraditve je možno do določene mere izboljšati v primeru nizkega deleža finih delcev. Če je odstopanje večje ali če je zaznati večji delež glinenih delcev, je takšna zmes manj ustrezna ali neustrezna.

Treba je poudariti, da so odstopanja zrnivosti obstoječih materialov pri proizvodnji na mestu vgraditve na regionalnih in občinskih cestah (bistveno) večja kot na avtocestnih odsekih, kjer se je v preteklosti bistveno več posvečalo homogenosti materialov in kontroli kakovosti.

BSM vsebuje vodo, ki pripomore k doseganju boljše homogenizacije zmesi, olajša mešanje, služi kot mazivo v fazi zgoščevanja in aktivira proces hidratacije aktivnega polnila. Uporabljene zmesi pri proizvodnji (na mestu vgraditve ali na obratu) vsebujejo določen delež naravne vlage. Ta je do neke mere konstanten, vendar se lahko pojavijo tudi večja odstopanja, sploh če se dela izvajajo v deževnem obdobju ali po njem, kar privede do težav. Glede na ugotovljeni delež naravne vlage je treba korigirati delež dodane vlage tako, da zmes vsebuje ustrezen delež skupne vlage, ki znaša med 70 % in 90 % vrednosti po Proctorju.

Odstopanje deleža vlage in posledice:

- če je skupni delež vlage v zmesi med proizvodnjo prenizek (< 50 %), bo težje doseči ustrezno zgoščenost plasti,
- če je delež visok (približno 100 %), bo doseganje togosti plasti bistveno počasnejše, sploh če je plast izpostavljena neugodnim vremenskim razmeram,
- v primeru, ko je delež vlage v zmesi zelo visok (> 100 %), se plasti ne da zgostiti in običajno ni zmožna prenašati niti lahke prometne obremenitve.

V literaturi [TC2, 2020] (str. 202) je navedeno, da je treba vsak dan vzorčiti in preiskati karakteristike vsaj šestih vzorcev zmesi.



Vsekakor je treba vhodne materiale in proizvedeno zmes ves čas vizualno pregledovati in ocenjevati ugotovljene lastnosti glede na pričakovane lastnosti ter izvesti ustrezne korekcije nastavitve, če so potrebne. Oseba, ki je odgovorna za kakovost izvedenih del, mora imeti opravljeno ustrezno izobraževanje in imeti čim več izkušenj, kajti brez strokovnega in ažurnega pristopa nastanejo drastične napake.

## 2.3 Transport zmesi, zgoščevanje in nega plasti

### 2.3.1 Transport zmesi, zgoščevanje in nega plasti HMA

Asfaltno zmes HMA lahko vgradimo oziroma ustrezno zgosimo, samo če dosega dovolj visoko temperaturo. Vgradnja ni najbolj uspešna tudi v določenih primerih, če je temperatura plasti previsoka. Ustrezno zgoščena plast zagotavlja odpornost proti obremenitvam prometa in vremenskim vplivom, kar bistveno izboljša trajnost plasti.

Proizvedena zmes se začne ohlajati takoj po izpustu iz mešalnega bobna na tovorno vozilo. Poleg ohlajanja je med transportom običajno podvržena tudi precejšnji temperaturni segregaciji, kajti na površini se bistveno hitreje ohlaja kot v sredici.

zgoščenosti asfaltne plasti bistveno manj ustrezni ali celo neustrezni.

Za preprečevanje temperaturne segregacije asfaltne zmesi imamo nekaj ukrepov, povezanih s transportom in vgradnjo, ki so prikazani na sliki 2.

Segret bitumen je tekoč in se pri mešanju zmesi in vgrajevanju plasti obnaša kot mazivo. To omogoča kamnitim zrnjem v asfaltni zmesi, da v fazi zgoščevanja med seboj lažje zdrsijo in se namestijo v čim bolj homogeno in zgoščeno strukturo plasti.

Štiri temperature, ki vplivajo na uspešnost zgoščevanja:

- temperatura proizvedene asfaltne zmesi,
- temperatura okolice (temperatura zraka in hitrost vetra),
- temperatura podlage (temperatura tal ali obstoječe asfaltne plasti),
- stopnja temperaturne segregacije (nizka, srednja, visoka).

Glede na lastnosti zmesi in temperaturne pogoje okolja se da določiti ohlajevalno krivuljo plasti. Plast je treba zgoščevati v t. i. časovnem oknu glede na ohlajevalno krivuljo plasti (slika 3).

V nadaljevanju je predstavljen izračun ohlajevalne krivulje in časovnega okna s programom PaveCool [MnDOT, 2024]. Podatki za izračun: predviden pričetek izvedbe del (dan, ura), vrsta zmesi (finozrnata, grobozrnata ali SMA), temperatura zraka, hitrost vetra, vreme (sončno, delno oblačno, oblačno), zemlje-

„Zaprte“ ponjave



Tovornjaki s potisno tehnologijo



Podajalniki

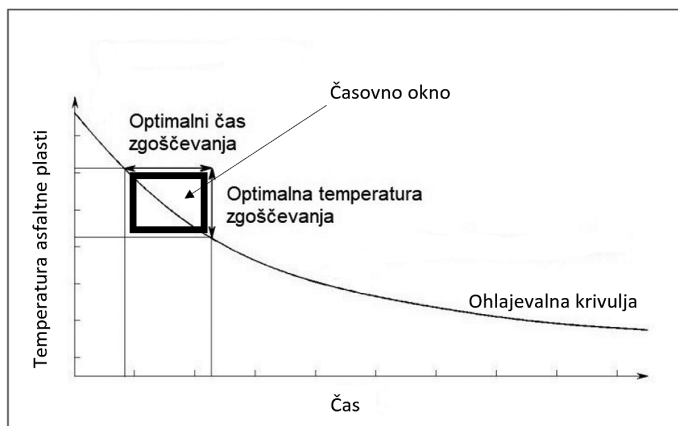


**Slika 2.** Ukrepi za zmanjšanje temperaturne segregacije [Rošer, 2021].

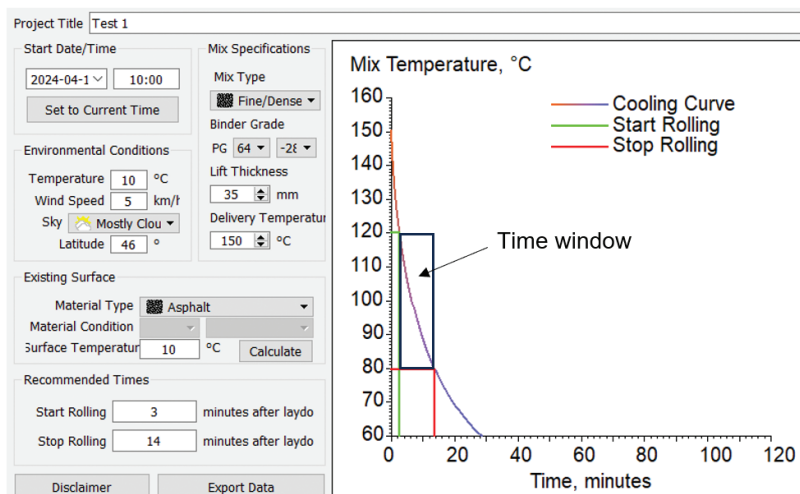
Dejavniki, ki vplivajo na zniževanja temperature in temperaturno segregacijo [Rošer, 2021]:

- količina zmesi na tovornem vozilu (večja količina se počasneje ohlaja),
- oblika kesona (kvadratni ali polkrožni prerez). Kvadratni je bolj podvržen temperaturni segregaciji, ker se zmes v vogalih hitreje ohlaja,
- vrsta kesona (potisni, izoliran ali toplotni zabojnik),
- vrsta ponjave na kesonu (odprta ali zaprta),
- način vgrajevanja (podajalnik, finiše z mešalnim polžem).

Klasično asfaltiranje ne omogoča uspešnega preprečevanja temperaturne segregacije. Dokazano je bilo, da znaša razlika temperature plasti, takoj za finišejem, do 60 °C (tudi v najbolj ugodnih vremenskih razmerah) [Rošer, 2021]. To nakazuje, da so na lokalnih mestih pogoji za doseganje ustrezne



**Slika 3.** Ohlajevalna krivulja in časovno okno.



**Slika 4.** Izračun ohlajevalne krivulje in časa zgoščevanja s programom PavementCool [MnDOT, 2024].

pisna širina, vrsta bitumna, debelina plasti, temperatura zmesi ob dostavi, vrsta podlage (asfaltna plast, betonska plast, nevezana nosilna plast drobljenca) in temperatura podlage.

V navedenem primeru (slika 4) mora biti zgoščevanje plasti (z valjarji) končano najkasneje štirinajst minut po vgradnji s finišejem. Ko se plast ohladi na približno 80 °C [Grover, 2023], bitumen iz funkcije maziva preide v svojo primarno funkcijo veziva in potem se plast ne da več zgoščevati.

Običajno ni potrebna nikakršna obdelava ali nega plasti.

### 2.3.2 Transport zmesi, zgoščevanje in nega plasti BSM

Kot že omenjeno, lahko BSM proizvedemo po dveh različnih postopkih – na mestu vgradnje ali na obratu. Pri proizvodnji na mestu vgradnje transport zmesi ni potreben, zmes se proizvaja na mestu samem. Proizvedena zmes, ki ostaja za reciklatorskem, se takoj zgošča z valjarjem. Po obdelavi z grederjem se izvede še sekundarno zgoščevanje.

Zmes, proizvedena na obratu, se s tovornjaki transportira na gradbišče in vgrajuje s finišejem. Pri transportu na daljšo razdaljo lahko pride do izgube vlage v BSM, druge problematike običajno ni. Zgoščevanje plasti je skoraj identično zgoščevanju vroče asfaltna zmesi, le da tu ni problematike ohlajevanja in temperaturne segregacije kot pri HMA. V obeh primerih je treba po zaključku zgoščevanja doseči zaprto površino plasti. Običajno moramo plast dodatno vlažiti in valjati z valjarjem s pnevmatikami, da se na površini poveča delež finih delcev. Takšna obdelava zapolni površinske votline in s tem uklešči oziroma utrdi groba zrna, kar bistveno poveča odpornost plasti proti izpadanju zrn. Če bo plast izpostavljena začasnemu prometu ali če se pričakujejo padavine, je treba površino pobrizgati z bitumensko emulzijo. V primeru, da se po plasti odvija promet, jo površinsko vlažimo (ne sme se izsušiti in prašiti).

Na vgrajeni plasti BSM se lahko prične z izvedbo asfaltnih del ali se prepusti prometu, ko plast doseže dovolj visoko to-

gost, da uspešno prenese omenjene obremenitve brez večjih deformacij. Pred pričetkom vgrajevanja (asfaltna) krovne plasti se s površine BSM odstrani ves material, ki ni vezan s plastjo, oziroma se plast očisti, da se razkrije tekstura zrn plasti.

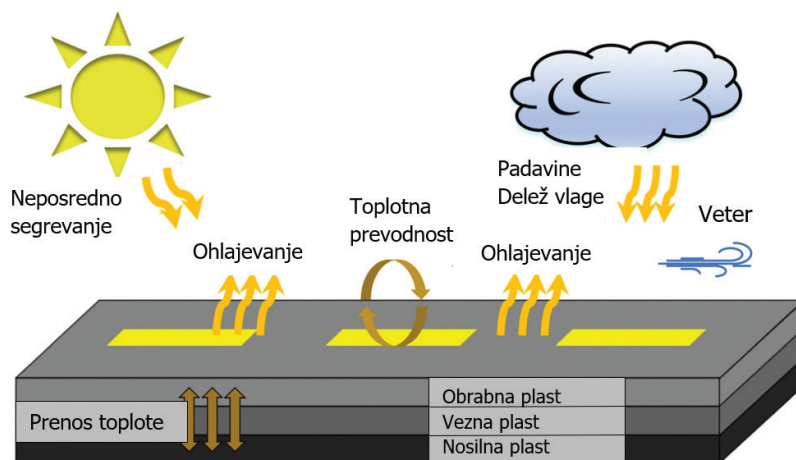
## 2.4 Pogoji za pridobivanje togosti vgrajene plasti

Ena bistvenih razlik med BSM in HMA so pogoji za pridobivanje (zgodnje) togosti vgrajene plasti. V obeh primerih so pomembni časovni okviri, kdaj bo vgrajena plast zmožna prenašati obremenitve prometa brez povzročitve večjih deformacij. Razumevanje teh razlik je ključno za uspešno izvedbo gradbenih projektov, predvsem tistih, ki se gradijo v polovični zapori vozišča, in je potrebna po čimprejšnji izpostavitvi prometu nujna.

### 2.4.1 Pridobivanje togosti HMA

Asfaltna plast ima v primerjavi z drugimi materiali (cementni beton, HSM – s hidravličnim vezivom stabiliziran material in v nekaterih primerih tudi BSM) bistveno prednost glede časa od vgradnje do zmožnosti prenašanja obremenitev. Togost narašča z zniževanjem temperature v vgrajeni plasti. Zmes se začne ohlajati takoj po mešanju, ohlajanje se nadaljuje med transportom, vgrajevanjem, zgoščevanjem in po zgoščevanju. Večja ko je debelina plasti, počasneje se ohlaja. Ustrezna zgodnja togost plasti je običajno dosežena, ko se temperatura plasti zniža pod 50 °C oziroma 30 °C [RS MZI, 2009]. Doseže se v zelo kratkem času, od nekaj minut do nekaj ur [Grover, 2023], odvisno od debeline plasti in štirih temperatur (poglavje 2.3.1).

Površina plasti je določeno obdobje (približno od šest do dvanajst mesecev) nekoliko bolj občutljiva za površinske deformacije (zavijanje koles na mestu, točkovne obremenitve ...), vendar sončna svetloba oziroma UV-žarki delujejo ugodno, saj povečajo površinsko togost plasti (dolgoročno pa sončna svetloba škodljivo vpliva na asfaltno plast in zmanjšuje življenjsko dobo).



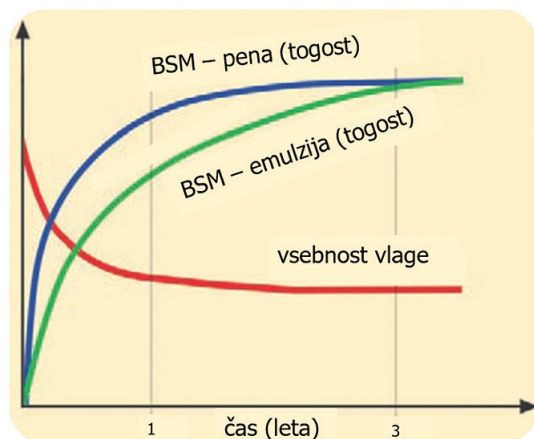
**Slika 5.** Termični okoljski vplivi na plast [Gong, 2022].

Ugodni pogoji za pridobivanje zgodnje togosti asfaltne plasti: čim tanjša plast, hladna plast pod vgrajevano plastjo; oblačno, vetrovno, hladno vreme.

Ugodni pogoji za pridobivanje zgodnje togosti plasti BSM: nizek delež vlage v plasti, ustrezen delež cementa v zmesi; sončno, vetrovno, vroče vreme; nizek delež vlage v ozračju.

## 2.4.2 Pridobivanje togosti BSM

Pri stabiliziranju s penjenim bitumnom (in aktivnim polnilom) se z zgoščevanjem doseže takojšnji pojav kohezijskih sil, ki ustvarijo odpornost proti deformacijam, vendar je ustrezna togost za prenašanje večjih prometnih obremenitev običajno dosežena šele takrat, ko je vsebnost vlage v plasti dovolj nizka oziroma se dovolj zniža (približno na 50 % vrednosti optimalne vlage po Proctorju). Ustrezna začetna togost je lahko dosežena v nekaj urah do 24 ur. Če je po vgradnji plast izpostavljena ugodnim vremenskim razmeram, se delež vlage hitreje zniža in plast posledično hitreje pridobiva togost. Togost plasti torej narašča z zniževanjem vsebnosti vlage v plasti in z vplivom procesa hidratacije cementa. Pri uporabi bitumenske emulzije je doseganje ustrezne togosti zaradi zakasnitve razpada emulzije počasnejše kot pri uporabi penjenega bitumna. Končna togost plasti BSM je dosežena v približno treh letih [Wirtgen, 2012].



**Slika 6.** Zniževanje vsebnosti vlage v plasti (naraščanje togosti plasti) [Wirtgen, 2012].

## 2.5 Obnašanje plasti in karakteristike trajnosti

### 2.5.1 Preiskava odpornosti proti nastanku kolesnic

Vse asfaltne plasti, ki bodo izpostavljene težki, zelo težki ali izredno težki prometni obremenitvi, preskušamo glede na odpornost proti preoblikovanju oziroma nastanku kolesnic DWTT (ang. Dry Wheel Tracking Test) v skladu z zahtevami iz standarda SIST 1038-1 [SIST, 2008]. To je fizična preiskava, ki simulira prometno obtežbo, izraženo s prehodi osne obremenitve pod posameznim kolesom. Standardizirano kolo premera 200 mm, širine 50 mm, obremenjeno s silo 700 N, opravi 10.000 prehodov po plasti v zaprti komori pri temperaturi 60 °C, pri čemer senzor meri nastanek trajne deformacije v plasti. Ker je plast izpostavljena neugodnemu pogoju (60 °C), nudi manjši odpor in je bolj dovzetna za nastanek trajne deformacije.

Plasti HMA običajno dosegajo predvidene zahteve, seveda pa se hitro lahko zgodi, da rezultat ni ustrezen. V takih primerih vzroke iščemo v premehkem bitumenskem vezivu, prevelikem deležu bitumenskega veziva, prenizki zgoščenosti plasti, nizkem deležu zračnih votlin v plasti in neustreznemu zrnastosti sestavi oziroma kombinaciji dejavnikov.

Z omenjeno preiskavo smo ugotavljali tudi nastanek kolesnic v plasti BSM, kar je ključnega pomena za razumevanje obnašanja tovrstnega materiala. Julija 2023 se je izvajala obnova avtocestnega odseka A2/O623 Ivančna Gorica-Bič, kjer se je proizvajal BSM z naslednjo sestavo zmesi: asfaltni granulati (RA) 75 %, drobljenec 0/2 mm 25 %, penjeni bitumen 2,0 %, cement 1,0 %, delež optimalne vlage 5,1 %.

Na gradbišču smo vzorčili zmes in jo v laboratoriju Igmat, d. d., z valjastim zgoščevalnikom zgostili v kalup (debelina 70 mm), podobno kot pripravljamo vzorce asfaltne plasti za preiskavo nastanka kolesnic. Po vsaki preiskavi se je ugotavljala tudi vsebnost vlage v plasti.

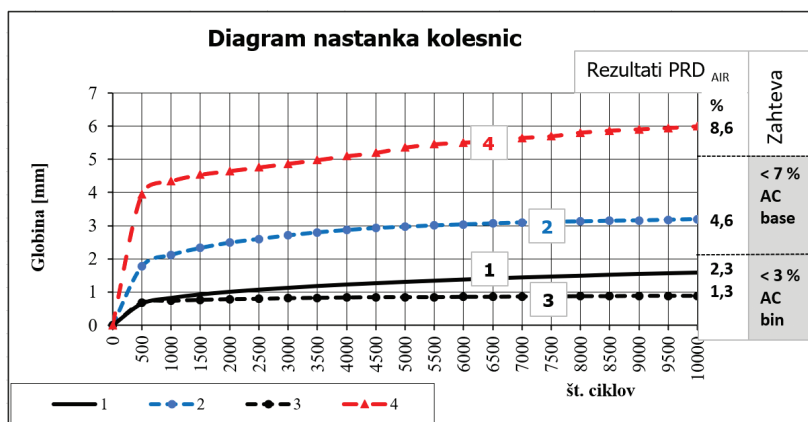
Izvedlo se je več preiskav nastanka kolesnic (DWTT) z različnim deležem vlage, v različnih temperaturnih pogojih in starostih [Igmat, 2023]:

- 1. starost 24 ur, vsebnost vlage 1,5 %, temperatura 60 °C,
- 2. starost 24 ur, vsebnost vlage 4,5 %, temperatura 22 °C,
- 3. starost 72 ur, vsebnost vlage 4,6 %, temperatura 22 °C,
- 4. starost 3 ure, vsebnost vlage 5,5 %, temperatura 22 °C.

Rezultati preiskav DWTT – diagram nastanka kolesnic so prikazani na sliki 7.

Vsi rezultati preiskave sorazmerne globine kolesnic, razen številke 4, so skladni z zahtevo v standardu SIST 1038-1 [SIST, 2008] za nosilno asfaltno plast PRDair < 7 %. Nekateri rezultati so skladni celo z zahtevo za vezno asfaltno plast (AC bin), za katero je predpisana najstrožja zahteva PRDair < 3 %.

To nakazuje, da je ustrezno proizvedena zmes in vgrajena plast BSM, podobno kot asfaltna plast, relativno kmalu po vgradnji zmožna prenašati zelo težko prometno obremenitev.



**Slika 7.** Rezultati preiskav nastanka kolesnic v plasti BSM [Igmat, 2023].

Preiskava številka 1 (graf 1 na sliki 7) je bila izvedena v skladu s standardom SIST EN 12697-22 [SIST, 2020a], ki se uporablja za asfaltno plast. Opravljena je bila 24 ur po pripravi plasti, pri temperaturi 60 °C, z 8-urnim predhodnim vzdrževanjem plasti pri 60 °C. Pri preiskavi nastanka kolesnic je bila določena sorazmerna globina kolesnice PRDair 2,3 %. Nepričakovano zelo dober rezultat smo pripisali znižanju deleža vlage v plasti zaradi izpostavljenosti visoki temperaturi 60 °C in s tem znatnemu povečanju togosti plasti. Vse naslednje preiskave so bile zato izvedene pri temperaturi laboratorija 22 °C, preizkušanci pa so bili do preiskave pokriti z mokro krpo, da se je ohranila naravna vlaga v plasti, kar za BSM predstavlja neugoden pogoj.

Pri preiskavah številki 2 in 3 (slika 7) gre za plasti s podobnim deležem vlage, a z razliko časovnega zamika izvedbe preiskave dveh dni. Rezultat preiskave številka 2 izkazuje bistveno slabšo vrednost PRDair 4,6 % od rezultata preiskave številka 3 PRDair 1,3 %, ki ga gre v celoti pripisati povečanju togosti plasti zaradi hidratacije cementa, kajti delež vlage je praktično enak. To nakazuje, da se togost plasti s časom povečuje, tudi ob neugodnih vremenskih razmerah.

Zmesi, uporabljeni za preiskavo številka 4, je bil pred zgoščevanjem v kalup dodan 1 % vlage. Rezultat odraža togost plasti v najbolj občutljivem obdobju, ko je bila plast izpostavljena dvema neugodnima pogojema takoj po vgradnji, ko hidratacija cementa še nima vpliva in je delež vlage v zmesi zelo visok. Vrednost PRDair 8,6 % je slaba, kot je bilo tudi pričakovano.

## 2.5.2 Dolgoročno obnašanje plasti oziroma karakteristike trajnosti

Kot je navedeno v poglavju 2.1, pri proizvodnji HMA vroč bitumen obvijsa vsa zrna, pri proizvodnji BSM pa penjeni bitumen obvijsa in se zlepi večinoma samo s finimi delci, to odraža bistveno razliko pri dolgoročnem obnašanju plasti.

HMA podobno kot s hidravličnim vezivom stabiliziran material (HSM) ali cementni beton velja za neprekinjeno vezan material. To pomeni, da vezivo obvijsa vsa zrna ter zapolni tudi večino zračnih votlin v plasti in s tem vezivo tvori neprekinjeno povezano strukturo plasti. V tovrstnih plasteh se pri obremenitvi s prometom pojavijo v spodnjem delu plasti natezne napetosti, ki lahko povzročijo nastanek razpok. Tako se ob ponavljajočih obremenitvah prometa od spodnje strani navzgor prične nastanek mikrorazpok, ki povzročijo zmanjšanje togosti plasti, ki se nadaljuje v nastanek večjih razpok, ki prodirajo proti površini plasti.

Pri BSM so z bitumnom obвити samo fini delci, ki se pri zgoščevanju stisnejo z večjimi zrni. Tako nastane na tisoče točkovnih zvarov, ki med seboj večinoma niso povezani, zato je BSM prekinjeno vezan material in se obnaša drugače kot vsi drugi materiali, ki se uporabljajo za gradnjo cest [Collings, 2011]. V plasti BSM se glede na ugotovitve [Collings, 2011] ne pojavljajo razpoke zaradi utrujanja. Ta ugotovitev je bila dokazana v več laboratorijih s štiritočkovnim upogibnim preizkusom. V plasti nastane razpoka, ko napetosti presežejo njeno strižno trdnost in se pojavi lokalizirana deformacija kot posledica gibanja po-



sameznih delcev (preusmeritev in/ali premik) znotraj telesa materiala. Obnašanje plasti BSM je podobno kot pri nevezanih materialih, vendar z izboljšano kohezivno trdnostjo ter povečano odpornostjo proti dinamični obremenitvi in vodi.

## 2.6 Občutljivost za vodo in zmrzljinska varnost

Vse asfaltne zmesi morajo imeti po standardu SIST 1038-1 [SIST, 2008] opravljeno preiskavo občutljivosti za vodo. Preiskava po SIST EN 12697-12 [SIST, 2018] ugotavlja občutljivost asfaltnih preizkušancev za vodo na podlagi karakteristik posredne natezne trdnosti (ang. indirect tensile strength - ITS) mokrih in suhih preizkušancev. Mokri preizkušanci so pred preiskavo izpostavljeni vakumu 6,7 kPa in 72-urni temperaturni stabilizaciji v vodi, segreti na 40 °C. Mokri preizkušanci morajo dosegati vsaj 70 % oziroma 80 % trdnosti suhih preizkušancev. Običajno so te vrednosti dosežene, v nekaterih primerih celo presežene. Neustrezni rezultati se pojavijo v primerih slabih kakovostnih karakteristik vhodnih materialov, slabe obvitosti zrn z bitumnom, prisotnosti previsokega deleža nečistoč ...

Običajno za HMA ni zahtevanih posebnih preiskav glede zmrzljinske varnosti, razen na avtocestnem programu, kjer morajo po standardu SIST EN 12697-46 [SIST, 2020b] obrabne asfaltne plasti HMA dosegati ustrezno odpornost proti razpokam pri nizkih temperaturah.

V preteklih letih sta bili v Sloveniji opravljeni dve raziskavi občutljivosti za vodo in zmrzljinske varnosti BSM [Igmat, 2023]. Pobuda za izvedbo prve tovrstne raziskave je bila dana novembra 2009 v zvezi z obnovo vozišča na odseku hitre ceste H3/0090 in 0690 Ljubljana (Celovška-Koseze), kjer se je obravnavalo tudi možnost, da se obnova vozišča izvede po postopku hladne reciklaže, ki je v primerjavi s klasičnimi postopki obnove ekonomsko ugodnejša in okoljsko primernejša. Glavni pomislek je bil, da vozišče po izvedbi hladne reciklaže ne bi izpolnjevalo kriterijev zmrzljinske varnosti. Tako so bile v podjetju Igmat, d. d., izvedene naslednje preiskave:

1. določitev ITS v suhem in mokrem stanju; po petih dneh,
2. določitev ITS po 12 ciklih zamrzovanja na sedem dni starih, prostih preizkušancih,
3. določitev ITS po 12 ciklih zamrzovanja na sedem dni starih, ukalupljenih preizkušancih,
4. določitev linearnih dvizkov CBR preizkušancev po 12 ciklih zamrzovanja in tajanja,
5. določitev tlačne trdnosti v CBR kalupe zgoščenih preizkušancev po zamrzovanju.

Mešanica 70% asfaltne granulate (RA) in 30% kamnitega drobljenca je bila stabilizirana z 2,6 % bitumna B 70/100 in 2 % cementa CEM III/B32,5 N. Opomba avtorjev: takratna zmes je vsebovala 2 % cementa, kar ni skladno z zahtevo današnjega TSPI [RS MZI, 2023], ki dovoljuje največ 1 % cementa. V zaključku poročila je navedeno, da so volumske deformacije zaradi zamrzovanja ocenjene kot zanemarljive, upad trdnosti po zamrzovanju pa je v okviru standardnih zahtev za preostalo trdnost. Kriterij nad 70 % je izpolnjen pri vseh testih. Ugotovljeno je bilo, da zmes izpolnjuje kriterije zmrzljinske varnosti.

Petkovšek in Maček [Petkovšek, 2013] sta preiskala 12 indikativnih karakteristik materialov, 36 vzorcev materialov za nevezane nosilne plasti in 6 vzorcev BSM – s penjenim bitumnom. Predstavila sta, da imajo s penjenim bitumnom pripravljene zmesi zmanjšano toplotno prevodnost oziroma povečano odpornost proti prodiranju zmrzali in so brez ledenih leč.

Glede na zgornje ugotovitve in navedbe lahko sklepamo, da v primeru uporabe kakovostnih materialov ustreznih zrnivosti ni pričakovati težav v smislu zmrzljinske varnosti.

## 2.7 Funkcionalnost plasti

Obe zmesi, HMA in BSM, se uporabljata v voziščni konstrukciji, kar pomeni, da morata uspešno prenašati tako statične in dinamične obremenitve prometa kot tudi klimatske in hidrološke vplive. HMA se uporablja za nosilno, vezno in obrabno plast, s tem ko se pri nas BSM uporablja za spodnjo nosilno plast pod asfaltnimi plastmi. V tujini so primeri, ko je bil BSM pri obnovi (daljših odsekov avtocest ca. 20 km) uspešno uporabljen tudi za nosilno in vezno plast ter nadgrajen samo z obrabno asfaltno plastjo ali površinsko prevleko.

Leta 1997 [Loudon International, 2024] je bil s postopkom na mestu vgraditve zgrajen 386 km dolg cestni odsek, ki je povezal zunanji svet z novim naftnim poljem Shaybah v vzhodni Savdski Arabiji. Širina vozišča 9,4 m, debelina plasti BSM 200 mm, nadgrajena s površinsko prevleko v debelini 6 mm. Celoten odsek, namenjen prometu težkih vozil, je bil uspešno zaključen v samo šestih mesecih z uporabo treh reciklažnih vlakov, ki so neprekinjeno delovali 24 ur na dan.

Obnove vozišč in raziskave na severu Kitajske v letih 2018 in 2019 so zagotovile dodatna znanja o dejavnikih, ki vplivajo na kakovost in trajnost BSM-ja, zlasti v območjih z mrzlo zimo in s spomladansko odjugo [Zhao, 2021]. BSM ne sme biti izpostavljen padavinam dlje časa, še posebej ne v obdobju z nizkimi temperaturami.

Leta 2011 je bilo na voznem pasu za tovornjake na prometno zelo obremenjeni avtocesti Ayrton Senna med mestoma Sao Paulo in Rio de Janeiro izvedeno testno polje v dolžini 600 m [Collings, 2015]. V nočnem času je bila voziščna konstrukcija z rezkanjem odstranjena do globine 350 mm in takoj nadomeščena z dvema plastema BSM (proizvedeno na obratu), nadgrajena z asfaltno plastjo v debelini samo 20 mm. Ob zori je bil obnovljen odsek izpostavljen težki prometni obremenitvi. Po dveh letih je bila na osnovi ugotovitev in monitoringa testnega polja sprejeta odločitev, da se tak način obnove lahko uporabi za obnovo vseh pasov za tovorni promet na omejeni 50 km dolgi avtocesti. BSM je edini material za gradnjo vozišč, ki je po vgradnji v večji debelini (ca. 300 mm) zmožen takoj prenašati težko prometno obremenitev brez večjih deformacij.

Številne obalne ceste v severnem Queenslandu v Avstraliji so bile obnovljene s tehnologijo BSM s postopkom na mestu vgraditve. Leta 2017 je tropski ciklon Debbie povzročil opustošenje s poplavo, vendar so te ceste večinoma (v 80 % primerih) ostale konstrukcijsko nepoškodovane, kar kaže na to, da je material odporen tudi proti določeni obliki poplav [Pinkelman, 2022].



## 3 PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI

### 3.1 Asfaltna zmes HMA

Človek uporablja asfalt – zmes agregata, vezanega z bitumnom, že več kot sedem tisoč let in je eden od najpogostejše uporabljenih gradbenih materialov. Proizvodnja asfaltne zmesi je dovršena proizvodnja, ki zagotavlja najmanjša odstopanja zrnivosti, kar je bistvenega pomena za kakovostno in trajno plast voziščne konstrukcije. Zaradi segrevanja in sejanja vhodnih materialov je relativno drag material in ima visok ogljični odtis. Proizvedena zmes je podvržena temperaturni segregaciji, plasti s prenizko temperaturo pa ni več mogoče zgostiti. Da bi se temu v čim večji možni meri izognili, moramo uporabljati ustrezne tehnološke postopke, prevozna sredstva in mehanizacijo za vgrajevanje oziroma je treba zmes čim prej vgraditi. Obstoječe asfaltno vozišče je relativno enostavno za obnovo in dotrajana plast oziroma zmes se lahko 100% ponovno uporabi. V primerjavi z drugimi zmesmi ima prednost glede časa od vgradnje do zmožnosti prenašanja težkih prometnih obremenitev.

### 3.2 Stabilizirana zmes BSM

Prednost BSM-tehnologije je uporaba obstoječih materialov, ki so običajno zelo poceni ali celo brezplačni. Ravno ti materiali predstavljajo velikokrat pomanjkljivost, kajti verjetnost, da bo prišlo do odstopanja kakovostnih karakteristik (delež vlage, zrnavostna sestava, prisotnost glinenih delcev ...), je večja, kot če bi uporabili nove materiale.

Druga velika prednost je, da se zmes proizvaja po hladnem postopku. To pomeni, da vhodnih materialov ni treba segreti, kot je to potrebno pri proizvodnji asfaltnih zmesi. S tem prihranimo velike količine energije. Prihranek je tudi pri količini uporabljenega bitumna, kajti BSM vsebuje (v primerjavi z nosilno plastjo HMA) skoraj pol manj bitumna. Zmes vsebuje še do 1 % aktivnega polnila, vendar sta cement ali hidrirano apno bistveno cenejša od bitumna.

V primerjavi s klasično obnovo vozišč znaša prihranek finančnih sredstev približno 30 %, v nekaterih primerih tudi do 50 % ([Wirtgen, 2019], [Praprotnik, 2014]). Zaradi bistvenega zmanjšanja transporta materialov to doprinese še do 50 % krajšemu času obnove in vse skupaj do 60 % zmanjšanja emisij CO<sub>2</sub>, kar predstavlja zelo zmanjšan delež ogljičnega odtisa.

V tujini je bilo dokazano, da plast BSM zmore prenašati zelo težko prometno obremenitev in lahko nadomesti nosilno in vezno (asfaltno) plast, vendar je v tem primeru treba uporabiti zmesi kamnitih zrn s podobnimi kakovostnimi karakteristikami, kot se uporabljajo za proizvodnjo HMA. Ustrezna je tudi uporaba asfaltne granulata RA. Seveda morajo biti tudi vse ostale karakteristike zmesi in plasti skladne s TSPI [RS MZI, 2023].

Stopnja zaupanja v konstantnost lastnosti proizvedene zmesi je namreč pri proizvodnji BSM (zaradi uporabe obstoječih materialov, nihanja deleža vlage in drugačne proizvodnje) nižja kot pri proizvodnji asfaltnih zmesi, vendar jo je s strokovnim in ažurnim pristopom možno v veliki meri obvladovati.

## 4 SKLEP

Izvedba testnih polj za razvoj in preizkušanje novih tehnologij v prometni infrastrukturi je običajna praksa, ki omogoča oceno njihove učinkovitosti in trajnosti. V primeru pozitivnih ugotovitev bi BSM lahko nadomestil vezne ali vsaj nosilne asfaltno plasti. To bi prineslo velike finančne, časovne in okoljske koristi, še posebej pri obnovi cest izven naselij, kjer tehnologija nima prostorskih zadržkov oziroma v cestnem telesu ni naprav za odvodnjo in ostale komunalne infrastrukture.

S prispevkom želiva avtorja promovirati BSM-tehnologijo, ki nudi alternativo HMA. Za investitorja tehnologija lahko prinese optimalno kombinacijo denar-čas-kakovost, kar omogoča zmanjšanje stroškov, skrajšanje časa izvedbe projektov in ima primerljivo kakovost ter trajnost. Izvajalci lahko prav tako izkusijo številne prednosti ponujene alternative. Ne le da lahko v istem času opravijo več dela, ampak dosežejo tudi višjo raven učinkovitosti in produktivnosti. Mehanizacija, ki jo imajo nekateri izvajalci že na voljo »doma«, omogoča izvajanje del z manj napora in v krajšem času, kar prinaša (dodaten) prihodek. Z BSM-tehnologijo so dela izvedena hitreje. To pomeni manj zamud v prometu, nižjo stopnjo tveganja za nastanek prometnih nesreč in nižjo vrednost emisij zaradi obnove in zaradi prometa med obnovo.

## 5 ZAHVALA

Zahvala Inštitutu za gradbene materiale Igmat, d. d., za omogočanje izvedbe preiskav in dostop do arhiva podatkov o raziskavah BSM. (Damijan Zore in Robert Rijavec)

Zahvaljujem se moji partnerici Vesni Lotrič, ki mi pomaga in me podpira pri pisanju člankov o BSM-tehnologiji. (Damijan Zore)

## 6 LITERATURA

Abreu, L., Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Palha, D., Fonseca, P. V., Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates, *Construction and Building Materials*, 142, 342–353, 2017.

Austroroads Ltd., Technical Report AP-T343-19, ISBN 978-1-925671-97-1, Project No. TT2046, Publication No. AP-T343-19, Deformation Performance of Foamed Bitumen Stabilised Pavements, 2019.

Collings, D., Jenkins, K., The Long-Term Behaviour of Bitumen Stabilised Materials (BSMs), 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), Drakensberg Sun, 2011.

Collings, D., Jenkins, K., Everton S., Utilising recycled material stabilised with bitumen to rehabilitate a major highway within stringent time constraints, CD Technology / Loudon International, Stellenbosch University, EcoRodovias, 2015.

Dorchies, P. T., Environmental Road of the Future: Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions, 2008

Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 19 strani, <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2008/docs/d2/Dorchies.pdf>, Toronto, 2008.

Gong, Z., Zhang, L., Wu, J., Xiu, Z., Wang, L., Miao, Y., Review of regulation techniques of asphalt pavement high temperature for climate change adaptation, Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 3:9, 1-18, <https://doi.org/10.1186/s43065-022-00054-5>, 2022.

Grover, A., What is the cure time for asphalt?, Asphalt, The magazin of the asphalt institute, <http://asphaltmagazine.com/cure-time-for-asphalt>, 2023.

Igmat, Inštitut za gradbene materiale, d. d., arhiv inštituta, 2023.

Infinity Galaxy, spletna stran podjetja - <https://infinitygalaxy.org/bitumen-price-today>, 2024.

Loudon International, spletna stran podjetja - <https://loudoninternational.co.za>, Cape Town, 2024.

Lesueur, D., Clech H., Brosseaud A., Foamed Bitumen: Foamability and Foam Stability, Road Materials and Pavement Design, 1-29, 2004.

Mavi, R. K. Gengatharen D., Mavi N. K., Nughes, R., Campbell, A., Yates, R., Sustainability in construction projects, Sustainability, 13, 1932, 1-24, <https://doi.org/10.3390/su13041932>, 2021.

MnDOT, program PaveCool, spletna stran - <https://www.dot.state.mn.us/app/pavecool>, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, 2024.

Muthen, K. M., Foamed Asphalt Mixes Mix Design Procedure, Contract Report CR-98/077, Programme : Road Engineering, Programme Manager: B M J A Verhaeghe, Sabita, 1999.

Pinkelman, T., Improving flood resilience on rural roads with foamed asphalt, Asphalt magazine, spletna stran Asphalt Institute, <http://asphaltmagazine.com/improving-flood-resilience-on-rural-roads-with-foamed-asphalt>, 2022.

RS MZI, Tehnična specifikacija za ponovno uporabo materialov v cestogradnji TSC 06.800:2001, Ministrstvo za infrastrukturo Republike Slovenije, 2001.

RS MZI, Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti, TSC 06.300 / 06.410 : 2009, Ministrstvo za infrastrukturo Republike Slovenije, 2009.

RS MZI, Tehnična specifikacija za prometno infrastrukturo, Stabilizirane nosilne plasti voziščne konstrukcije, izvedene po hladnem postopku TSPI-PGV.06.325:2023, Ministrstvo za infrastrukturo Republike Slovenije, 2023.

Petkovšek, A., Maček, M., Zmrzljinska odpornost vozišč v luči toplotne in hidravlične prevodnosti materialov v coni zmrzovanja, 14. Kolokvij o asfaltih in bitumnih, Bled, 2013.

Praprotnik, K., Zeleno javno naročanje: primer izbire ukrepa za obnovo vozišča, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta, <http://www.cek.ef.uni-lj.si/magister/praprotnik1328-B.pdf>, 2014.

Picardo, A., Soltero, V. M., Peralta, E., Life Cycle Assessment of Sustainable Road Networks: Current State and Future Directions, Buildings 13, 2648, 1-22, <https://doi.org/10.3390/buildings13102648>, 2023.

Rošer, R., Temperaturna segregacija pri vgradnji asfaltnih zmesi, 18. Kolokvij o Asfaltih, bitumnih in voziščih, Bled, 2021.

SURS, spletna stran urada - <https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/11545>, Statistični urad Republike Slovenije, 2024.

SIST, SIST 1038-1:2008, Bituminizirane zmesi – Specifikacije materialov – 1. del: Bitumenski beton – Zahteve – Pravila za uporabo SIST EN 13108-1, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2008.

SIST, SIST EN 12697-12:2018, Bitumenske zmesi - Preskusne metode - 12. del: Ugotavljanje občutljivosti bitumenskih preskušancev na vodo, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2018.

SIST, SIST EN 12697-22:2020, Bitumenske zmesi - Preskusne metode - 22. del: Preskus nastajanja kolesnic, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2020a.

SIST, SIST EN 12697-46:2020 Bitumenske zmesi - Preskusne metode - 46. del: Odpornost proti razpokam pri nizkih temperaturah z enosnimi nateznimi preskusom, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2020b.

TG2, Technical Guideline, Bitumen Stabilised Materials, Third Edition, Sabita, 2020.

Thom, N., Dawson, A., Sustainable road design: Promoting recycling and non-conventional materials, Sustainability, 11, 6106, 1-12, <https://doi.org/10.3390/su11216106>, 2019.

Udomsap, A., Hallinger, P., A bibliometric review of research on sustainable construction, Journal of Cleaner Production 254, 120073, 2020.

Wirtgen, Sustainable cold recycling technology, Wirtgen GmbH, 2019.

Wirtgen, Wirtgen cold recycling technology, 2012.

Zhao, H., Ren, J., Chen, Z., Luan, H. Yi, J., Freeze and thaw field investigation of foamed asphalt cold recycling mixture in cold region, Case Studies in Construction Materials, 15, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002254>, 2021.

Zore, D., Obnova vozišč z BSM-tehnologijo, Gradbeni vestnik, 72, 175-179, 2023.