

Damijan Zore, dipl. inž. grad.
damijan.zore@igmat.eu
Igmata, d. d.,
Zadobrovska cesta 4, 1260 Ljubljana Polje



Strokovni članek
UDK/UDC: 665.775.4

ZGOŠČEVANJE ASFALTNE PLASTI COMPACTION OF THE ASPHALT LAYER

Povzetek

Človek uporablja asfalt (zmes kamnitih zrn, vezanih z bitumnom) že več kot sedem tisoč let in je eden od najpogostejše uporabljenih gradbenih materialov. Proizvodnja vroče asfaltne zmesi (HMA – hot mixed asphalt) je dovršena proizvodnja, ki večinoma zagotavlja ustrezne kakovostne karakteristike. Običajno povsod najdemo pomanjkljivosti in pri asfaltu je ena glavnih ta, da je proizvedena zmes podvržena ohlajevanju, plasti s prenizko temperaturo pa ni več mogoče zgostiti.

Da bi se temu v čim večji možni meri izognili, je treba poznati različne pogoje ter njihove vplive na uspešnost zgoščevanja asfaltne plasti.

Namen tega članka je:

- predstaviti problematiko zgoščevanja asfaltne plasti,
- zvišati nivo razumevanja obnašanja asfaltne plasti med zgoščevanjem,
- prikazati, da se z ustreznim strokovnim pristopom in uvedbo ukrepov lahko doseže bistveno višja učinkovitost zgoščevanja.

Ključne besede: časovno okno zgoščevanja, temperaturna segregacija

Summary

Asphalt (a mixture of stone grains bound with bitumen) has been used by man for over seven thousand years and is one of the most widely used building materials. The production of hot mixed asphalt (HMA) is a sophisticated process that mostly ensures adequate quality characteristics. There are usually shortcomings everywhere, and one of the main shortcomings in asphalt is that the produced mixture undergoes cooling, and the layer with too low temperature can no longer be thickened.

In order to avoid this as much as possible, it is necessary to know the various conditions and their influence on the success of the asphalt layer compaction.

The purpose of this article is to:

- present the problem of the asphalt layer compaction,
- increase the level of understanding of the behaviour of the asphalt layer during compaction,
- demonstrate that with an appropriate professional approach and the introduction of measures, a significantly higher efficiency of compaction can be achieved.

Key words: compaction time window, temperature segregation

1 UVOD

V asfaltne obratu proizvedeno zmes vzorčimo iz kamiona ali pri polžih finiŝerja. Običajno se najprej izvedejo osnovne preiskave vzorčene zmesi, kot so zrnastostna sestava, delež bitumna in delež zračnih votlin. Zahteve so določene v standardu za bituminizirane zmesi [SIST, 2008]. Ko proizvedeno zmes vgradimo, dobimo asfaltno plast. Zahteve za kakovostne karakteristike plasti so navedene v Smernicah in tehničnih pogojih za graditev asfaltnih plasti [RS MZI, 2009]. Poleg debeline, ravnosti in zlepljenosti je zelo pomembna tudi zgoščenost asfaltna plasti. Zgoščevanje je zadnji korak v procesu gradnje asfaltnega vozišča in v osnovi pomeni povečevanje prostorninske gostote zmesi oziroma zmanjševanje vsebnosti zračnih votlin.

Zgoščevanje (pri strojnem vgrajevanju) lahko razdelimo v tri faze:

1. Predzgoščevanje v vgrajevalno desko finiŝerja (doseganje približno 75 % zgoščenosti plasti).
2. Doseganje končne stopnje zgoščenosti plasti z valjarji ali drugimi zgoščevalnimi sredstvi.
3. Zgoščevanje v kasnejšem obdobju, ko je plast izpostavljena na promet. Vpliv prometa do določene mere zmanjša votline v plasti, tudi če je bila plast v fazi gradnje ustrezno zgoščena.

2 PRIMERI SLABE PRAKSE

V zadnjem obdobju se na terenu vse bolj soočamo z neustrezno zgoščenostjo asfaltna plasti. V nadaljevanju so predstavljeni trije primeri, kjer ugotovljene vrednosti zgoščenosti (odvzete iz asfaltnih jeder) niso bile skladne z zahtevami.

2.1. Plato za kamione

Slika 1 (levo) prikazuje rezultate zgoščenosti asfaltna vezne plasti. Pet od šestih odvzetih jeder ne dosega zahteve zgoščenosti (98 %). To pomeni, da je plast slabo zgoščena skoraj po celotnem območju. Vzrok lahko pripišemo neustreznemu pristopu oziroma načinu zgoščevanja, kajti podatki o temperaturi proizvedene zmesi so bili skladni z zahtevo. Slika 1 (desno) prikazuje rezultate zgoščenosti obrabno zaporne plasti. Neustrezna zgoščenost in vsebnost zračnih votlin je ugotovljena na lokalnem območju. Ta lokacija predstavlja precejšnjo verjetnost, da se bo zaradi vpliva težke prometne obremenitve kmalu pojavilo izpadanje zrn ter luščenje plasti asfalta, kar bi lahko kasneje privedlo do nastanka udarne jame. Če bi bila ta površina izpostavljena kanaliziranemu prometu, bi zagotovo prišlo do deformacij v obliki nastanka kolesnic.

2.2. Kolesarska povezava

Slika 2 prikazuje rezultate zgoščenosti nosilne in obrabno zaporne plasti na kolesarski stezi. Vsi rezultati na obeh vzorčenih lokacijah odstopajo od zahtev. Takšna plast je podvržena večji občutljivosti za vremenske vplive, saj je delež vode v njej bistveno večji kot običajno, kar postavlja pod vprašaj njeno trajnost.

2.3. Rekonstrukcija priključka na hitro cesto

Rezultati neustrezne zgoščenosti obrabno zaporne plasti na priključku, ki jih prikazuje slika 3, so posledica več manjših neugodnih dejavnikov:

- izvedba del v nekoliko hladnejšem obdobju (temp. zraka med 5 °C in 10 °C),
- prevoz zmesi iz oddaljenega asfaltna obrata (ca. 60 km),
- tanka plast (40 mm) in
- (kratkotrajni) zastoji finiŝerja.

AC 22 bin PmB 45/80-65 A2					
Zap. št.	Lab. št.	Mesto odvzema Lokacija	Prostorninska gostota (Mg/m ³)	Stopnja zgoščenosti (%)	Delež zračnih votlin % (prost.)
Metoda preiskave SIST EN			12697-6 /20	12697-9 /04	12697-8 /19
1	1243-A-23	Plato (parkirišča)	2,365	97,4	7,5
2	1251-A-23	P10 (krožna cesta)	2,330	96,0	8,9
3	1276-A-23	Plato (dovozna cesta)	2,370	97,7	7,3
4	1276-A-23	Plato (parkirišča)	2,370	97,7	7,3
5	1277-A-23	P27 (krožna cesta)	2,423	99,8	5,2
6	1277-A-23	P33 (krožna cesta)	2,343	96,5	8,4

ZAHTEV ZA SKUPINO TEŽKE IN ZELO TEŽKE PROMETNE OBREMENITVE
TSC 06.300 / 06.410 : 2009 min. **98%** 3 do 9

AC 11 surf PmB 25/55-65 A2 Z3					
Zap. št.	Lab. št.	Mesto odvzema Lokacija	Prostorninska gostota (Mg/m ³)	Stopnja zgoščenosti (%)	Vsebnost zračnih votlin % (prost.)
Metoda preiskave SIST EN			12697-6 /20	12697-9 /04	12697-8 /19
1	1243-A-23	Plato (parkirišča)	2,238	94,8	10,3
2	1276-A-23	Plato (dovozna cesta)	2,374	100,6	4,8

ZAHTEV ZA SKUPINO TEŽKE IN ZELO TEŽKE PROMETNE OBREMENITVE
TSC 06.30 / 06.410 : 2009 min. **98%** 2 do 8,5

Slika 1. Rezultati zgoščenosti (levo vezna plast in desno obrabno zaporna asfaltna plast) [Igmat, 2023].

AC 16 base B 50/70 A4					
Zap. št.	Lab. št.	Mesto odvzema Lokacija	Prostorninska gostota (Mg/m ³)	Stopnja zgoščenosti (%)	Vsebnost zračnih votlin % (prost.)
Metoda preiskave SIST EN			12697-6 /20	12697-9 /04	12697-8 /19
1	1265-A-23	Pododsek 11	2,303	95,8	10,1
2	1267-A-23	Pododsek 3	2,334	96,2	9,0

ZAHTEV ZA SKUPINO LAHKE IN ZELO LAHKE PROMETNE OBREMENITVE
TSC 06.300 / 06.410 : 2009 min. **97%** 2 do 8,5
skrajna mejna vrednost **10,5**

AC 8 surf B 50/70 A4					
Zap. št.	Lab. št.	Mesto odvzema Lokacija	Prostorninska gostota (Mg/m ³)	Stopnja zgoščenosti (%)	Vsebnost zračnih votlin % (prost.)
Metoda preiskave SIST EN			12697-6 /20	12697-9 /04	12697-8 /19
1	1265-A-23	Pododsek 11	2,229	91,8	10,9
2	1267-A-23	Pododsek 3	2,266	93,3	9,4

ZAHTEV ZA SKUPINO HODNIKOV ZA PEŠCE, KOLESARSKIH STEŽ ipd.
TSC 06.300 / 06.410 : 2009 min. **96%** 1 do 6,5
skrajna mejna vrednost: **8,5**

Slika 2. Rezultati zgoščenosti plasti (levo nosilna plast, desno obrabno zaporna asfaltna plast) [Igmat, 2023].

Skoraj vsa asfaltna jedra so bila vzorčena na izrazito slabo zgoščenih območjih. Omenjene lokacije so bile predhodno ugotovljene z meritvami izotopske sonde.

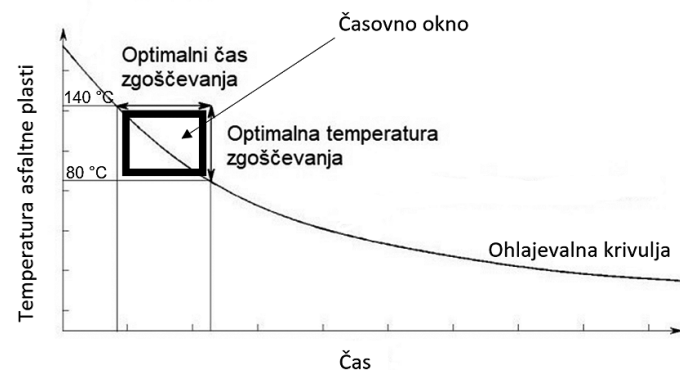
SMA 11 PmB 45/80-65 A1, A2					
Zap. št.	Lab. št.	Mesto odvzema Lokacija	Prostorninska gostota (Mg/m ³)	Stopnja zgoščenosti (%)	Vsebnost zračnih votlin (% (prostl))
Metoda preiskave SIST EN			12697-6 /20	12697-9 /04	12697-8 /19
1	1226-A-22	krak E, P4 sredina	2,456	99,6	3,3
2	1237-A-22	xy jug, P8 D	2,359	95,7	7,2
3	1306-A-22	xy jug, P6 L	2,345	95,1	7,7
4	1306-A-22	xy zahod, P7 DD	2,313	93,8	9,0
5	391-A-23	krak D P5 sredina	2,414	97,9	5,0

ZAHTEV ZA SKUPINO IZREDNO TEŽKE, ZELO TEŽKE IN TEŽKE PROMETNE OBREMITIVNE
TSC 06.300 / 06.410 : 2009 min. **97 %** 1,5 do **7,5**

Slika 3. Rezultati zgoščenosti obrabno zaporne asfaltne plasti na priključku [Ilgmat, 2023].

3 OHLAJEVALNA KRIVULJA ASFALTNE PLASTI IN ČASOVNO OKNO ZGOŠČEVANJA

Glede na temperaturo zmesi in temperaturne pogoje okolja se da določiti ohlajevalno krivuljo plasti, ki je prikazana na sliki 4. Zgoščevanje plasti je treba izvajati v t. i. časovnem oknu glede na ohlajevalno krivuljo. Stalno spreminjajoča se temperatura je glavni dejavnik, zaradi katerega je težko napovedati, kdaj začeti z zgoščevanjem in kdaj mora biti zgoščevanje končano.



Slika 4. Ohlajevalna krivulja plasti in časovno okno.

V preglednici 1 so navedene priporočene vrednosti temperature asfaltne zmesi pri vgradnji in najnižje dovoljene temperature

Tip bitumna	Priporočena temperatura pri vgradnji (°C)	Najnižja temperatura zmesi za finišejem (°C)
B 70/100	145	120
B 50/70	155	130
PmB	Po navodilih proizvajalca PmB	

Preglednica 1. Priporočena temperatura zmesi pri vgradnji in najnižja temperatura zmesi za finišejem [RS MZI, 2009].

ture zmesi za finišejem. Te vrednosti bi morale biti vedno dosežene po celotni širini plasti za finišejem, kar je osnovni pogoj, da bomo z valjarji lahko zgostili plast. Neenakomerne temperature plasti vodijo do različnih stopenj zgoščenosti.

3.1. Izračun časovnega okna s programom PaveCool

Programsko orodje PaveCool [MnDOT, 2024] je bilo razvito za pomoč izvajalcem del in nadzornim organom pri sprejemanju odločitev glede izvajanja del v hladnejšem obdobju. Uporabnik vnese uro, datum, vrsto zmesi in podlage, hitrost vetra, temperaturo asfaltne zmesi, temperaturo podlage, temperaturo zraka, količino oblačnosti in debelino plasti. Model toplotnega toka se uporablja za izračun, v kolikšnem času se temperatura plasti zniža do kritične vrednosti 80 °C. Če uporabnik meni, da je na voljo premalo časa za zgoščevanje, lahko ta čas podaljša (na primer: povečanje debeline plasti ali temperature zmesi bo povečalo časovno okno).

V preglednici 2 so navedeni izračunani časi zgoščevanja (časovno okno) različnih debelin plasti pri različnih pogojih. Za izračun sta uporabljeni dve različni temperaturi plasti za finišejem. Vrednost 140 °C je običajna (primerna) temperatura plasti za začetek zgoščevanja in 100 °C, ki je še zadnja možnost, da plast lahko ustrezno zgostimo.

Primer: vgrajevanje nosilne asfaltne plasti AC 22 base B 50/70 A3 v debelini 70 mm in obrabno zaporne plasti AC 11 surf B 50/70 A3 v debelini 40 mm v dveh različnih temperaturnih obdobjih.

Vroče obdobje: temperatura zraka 30 °C, temperatura podlage 40 °C, hitrost vetra 5 km/h.

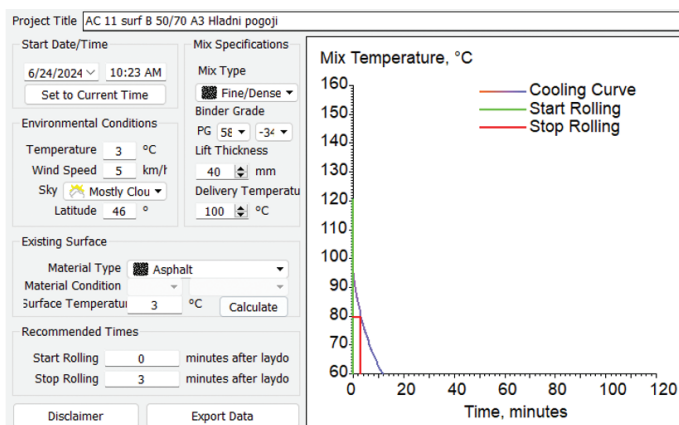
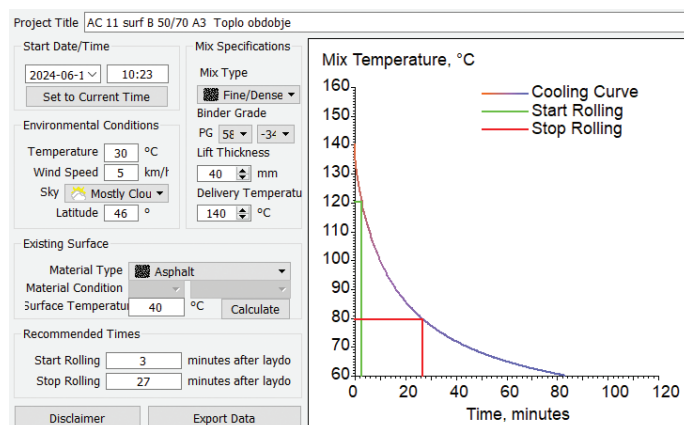
Hladno obdobje: temperatura zraka 3 °C, temperatura podlage 3 °C, hitrost vetra 5 km/h.

Temperatura plasti za finišejem (°C)	AC 22 base B 50/70 A3 70 mm		AC 11 surf B 50/70 A3 40 mm	
	Vroče obdobje	Hladno obdobje	Vroče obdobje	Hladno obdobje
140	58 min	41 min	27 min	13 min
100	17 min	11 min	8 min	3 min

Preglednica 2. Časi, v katerih je treba doseči končno stopnjo zgoščenosti plasti [MnDOT, 2024].

Glede na različne pogoje, ki vplivajo na ohlajevanje plasti, je (skrajni) čas za doseganje končne zgoščenosti plasti obrabno zaporne plasti (AC 11 surf B 50/70 A3) lahko 27 minut ali samo 3 minute.

Spodaj sta prikaza vnesenih podatkov v program PaveCool in izračun vrednosti časov zgoščevanja za obrabno zaporno plast v najbolj ugodnih pogojih (slika 5, levo) in najbolj neugodnih pogojih (slika 5, desno).



Slika 5. Rezultati izračuna s programom PavCool za obrabno plast v najbolj ugodnih pogojih (levo) in najbolj neugodnih pogojih (desno) [MnDOT, 2024].

4 VZROKI ZA NEUSTREZNO ZGOŠČENO ASFALTNO PLAST

Neustrezno zgoščene lokacije so običajno območja ob jaških, prečnih in vzdolžnih spojih, uvozi, izvozi, robni pasovi, mulde, koritnice ..., kjer je vgrajevanje in zgoščevanje še posebej oteženo. Kar se tiče večjih površin, kjer se izvaja strojno vgrajevanje, so običajno neustrezno zgoščena le manjša lokalna območja, vendar ugotavljamo, da je vse več primerov, ko se neustrezna zgoščenost pojavi po večjem ali celo celotnem območju vgrajevanja.

Za doseganje ustrezne zgoščenosti plasti morajo biti izpolnjeni trije ključni pogoji:

- ustrezna temperatura plasti,
- ustrezno zgoščevanje (oz. usposobljen kader in primerna mehanizacija),
- ustrezna togost podlage.

Plast bo ustrezno zgoščena po celotnem območju vgrajevanja samo v primeru, če bodo po celotnem območju izpolnjeni vsi trije pogoji.

Sveže proizvedena zmes ima večinoma ustrezno temperaturo, vendar pa so problematični čas in način transporta ter dina-

mika vgrajevanja. Pogosto smo priča veliki izgubi temperature zmesi, še preden se plast sploh začne zgoščevati.

V fazi zgoščevanja se vse pogostejše srečujemo s slabo usposobljenim kadrom, kar v kombinaciji s prenizko temperaturo plasti vodi do zelo slabega končnega izdelka. V redkih primerih neuspeh pri doseganju ustrezne zgoščenosti izhaja tudi iz uporabe neustrezne mehanizacije.

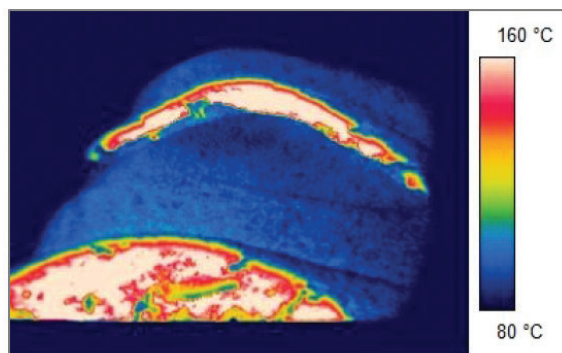
Na cestnih odsekih ali parkiriščih je plast zelo redko neustrezno zgoščena zaradi slabe togosti podlage. Tovrstno težavo pogostejše srečujemo na kolesarskih stezah in hodnikih za pešce, kjer prenizka togost podlage ne zagotavlja zadostne opore zgoščevalnemu sredstvu za uspešno zgostitev asfaltne plasti.

4.1. Temperaturna segregacija

Zmes se začne ohlajati takoj, ko je natovorjena na tovorno vozilo. Ohlajanje se nadaljuje med transportom, vgrajevanjem, zgoščevanjem in po zgoščevanju. Med transportom se zmes na površini zelo hitro ohladi, kar povzroči nastanek skorje z bistveno nižjo temperaturo kot v jedru oziroma sredici. Dlje časa ko traja prevoz, debelejša in hladnejša je skorja, zato je treba zmes vedno čimprej vgraditi in zgostiti. Slika 6 prikazuje asfaltno zmes na tovornjaku v trenutku zvrčanja v vsebnik finišeja. Razlika temperature skorje in sredice je jasno vidna.



(a)

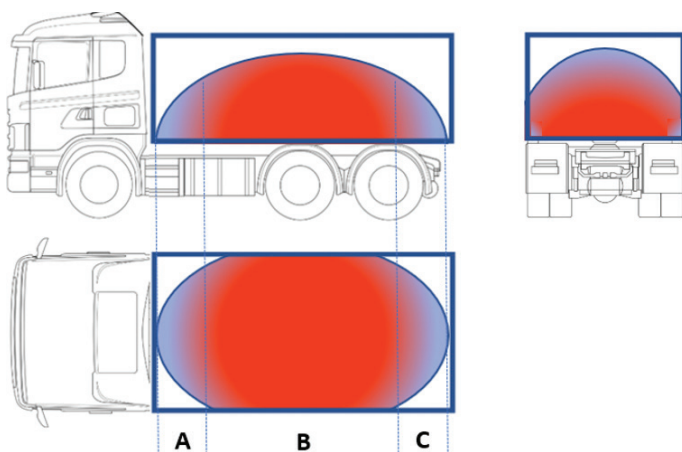


(b)

Slika 6. Asfaltna zmes na tovornjaku v trenutku zvrčanja v vsebnik finišeja (levo navadna fotografija, desno termografska fotografija [Rošar, 2020].

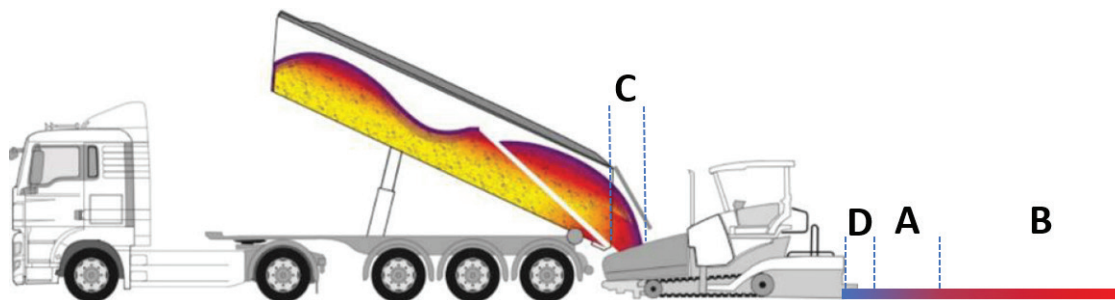
Glede na obliko kupa (na tovornjaku) se običajno pojavijo območja z različno stopnjo temperaturne segregacije.

- Nizka stopnja segregacije je v območju B (slika 7), približno na sredini kesona z največjim deležem sredice, ki uspešno zadrži temperaturo proizvedene zmesi. Kup mora imeti čimbolj polkroglasto obliko, kajti v tem primeru je površina kupa najmanjša.
- Visoka stopnja segregacije je na območjih A in C (slika 7), kjer je delež sredice bistveno manjši, kar povzroči večjo izgubo (znižanje) temperature oziroma bolj ohlajeno zmes. To področje ima tudi večji delež površine, kar še dodatno vpliva na izgubo temperature.



Slika 7. Asfaltna zmes na tovornjaku (območja A, B in C).

Ob začetku raztovarjanja (dvigovanja kesona) se vsebnik finišeja najprej napolni z zmesjo z območja C, kar predstavlja hladnejšo zmes. V nadaljevanju sledi zmes z območja B z najvišjo (ohranjeno) temperaturo. Na koncu raztovarjanja (spraznitvi kesona) se vsebnik napolni z zmesjo z območja A (zopet hladnejša zmes) in po menjavi tovornjakov spet sledi zmes z območja C. Tako je v času menjave tovornjakov zmes v vsebniku finišeja združena z območji A in C, kar predstavlja večjo količino bistveno hladnejše zmesi.



Slika 8. Prikaz različnih temperaturnih območij med vgrajevanjem asfaltna zmesi [Fliegl, 2018].

V času menjave tovornjakov se običajno finišeer ustavi in ves ta čas območje D (slika 8) valjarjem ni dostopno oziroma ga ni mogoče zgoščevati. Na tej lokaciji je zaradi omenjene menjave tovornjakov vgrajena najhladnejša zmes (iz območja kesona A),

ki se zaradi zastoja še dodatno ohlaja. Območje D je tako podvrženo trem neugodnim vplivom, zato ima plast v tem območju najnižjo temperaturo in je najslabše zgoščena.

Območje A (slika 8) je plast z nekoliko nižjo temperaturo (zmes z območja kesona A). Časovno okno zgoščevanja na tem območju je nekoliko zmanjšano, vendar operator na stroju oziroma valjar to območje lahko ustrezno zgosti.

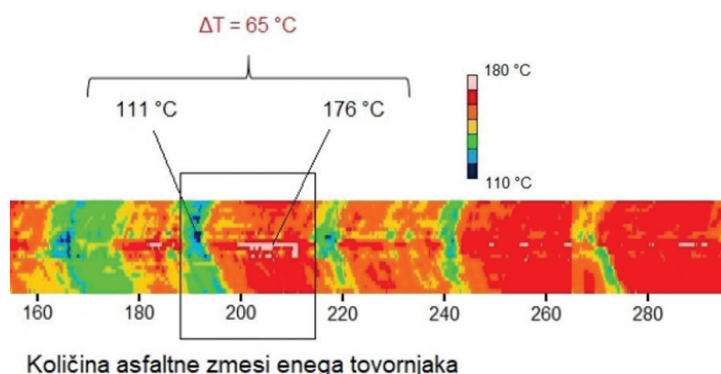
Območje B predstavlja plast z najvišjo (ohranjeno) temperaturo, kjer so pogoji za zgoščevanje idealni in je običajno zgoščenost plasti skladna z zahtevo.

Magistrska naloga iz leta 2020 [Rošar, 2020] obravnava meritve temperature površine asfaltna zmesi na kamionu s termovizijsko kamero in meritve temperature asfaltna plasti za finišeerjem s termoskenerjem. Predstavljen je primer izvedbe asfaltnih del (poleti 2019) v času najbolj ugodnih temperaturnih pogojev. Temperatura zraka je bila nad 30 °C ter podlage med 40 °C in 50 °C. Transportna razdalja zmesi je znašala 21 km, čas vožnje 18 minut in vsi tovornjaki so imeli ponjave.

Izmerjena povprečna temperatura površine zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 na kamionu (na gradbišču) je znašala 104 °C, kar predstavlja presenetljivo visoko stopnjo temperaturne segregacije, kajti v sredici je imela zmes več kot 170 °C. Debelina vgrajevanja plasti je znašala 40 mm. Slika 9 prikazuje rezultate temperaturnega polja za finišeerjem in termoskener na finišeerju.

Kljub zelo ugodnim vremenskim razmeram so se ob menjavah tovornjakov (na medsebojni razdalji od 20 do 30 m) pojavljala območja z visoko stopnjo temperaturne segregacije (razlika do 65 °C). Za lokacijo s temperaturo plasti 176 °C je bilo (glede na izračun s programom PaveCool) za zgoščevanje na voljo 46 minut. Za lokacijo s temperaturo plasti 111 °C pa le 13 minut.

Če bi se dela izvajala v hladnejšem obdobju (temperatura zraka in podlage 5 °C), bi bilo treba plast na lokaciji z 111 °C zgostiti v 6 minutah, kar predstavlja veliko verjetnost za neustrezno zgoščeno območje, kajti valjar (mase vsaj 7 ton) bi moral v tem času opraviti vsaj štiri prehode z vibracijo.



Slika 9. Rezultati meritev temperaturnega polja za finišejem (leva slika) in termoskener na finišeju (desna slika) [Rošer, 2020].

4.2. Čas ustavitve finišeja

Poleg temperaturno segregiranih območij ob menjavah tovrnjakov, ki so se pojavila zaradi hladnejše zmesi na tovrnjakih (iz območji A in C), je termoskener zaznal tudi znižanje temperature plasti ob vsaki ustavitvi finišeja [Rošer, 2020]. Ob ustavitvi za 2 minuti je zabeležil izgubo temperature za 10 °C. Ob čakanju na dostavo asfaltne zmesi (ali drugih razlogov) je bilo znižanje temperatur še večje. Zastoj finišeja za 11 minut in 8 sekund, je povzročil znižanje temperature plasti za finišejem za 37,6 °C.

V nadaljevanju je predstavljen primer dveh neugodnih vplivov hkrati. Temperaturna segregacija, ki je večinoma prisotna ob menjavi vsakega tovrnjaka (ugotovljena temperatura plasti 111 °C) in nato še zastoj finišeja za 11 minut (padec temperature za ca. 37 °C). V takšnem primeru znaša temperatura plasti približno 74 °C (111 °C - 37 °C), kar je manj od 80 °C, in to pomeni, da se plast takoj za finišejem sploh ne da več zgostiti.

4.3. Ravnoesje štirih faz asfaltiranja

V obdobju načrtovanja izvedbe del je treba teoretično določiti in dejansko zagotoviti ravnoesje štirih faz asfaltiranja. Proizvodnja, prevoz, vgrajevanje in zgoščevanje. Uspešno ravnoesje zagotavlja neprekinjeno vgrajevanje, pri čemer naj ne bi bilo visokih razlik temperatur plasti za vgrajevalnim strojem. S tem je zagotovljen osnovni pogoj za uspešno zgoščevanje in ravnoesje plasti.

Če bo asfaltni obrat vsako uro proizvedel 100 ton zmesi, je treba glede na razdaljo in značilnosti prometa zagotoviti dovolj prevoznih sredstev, da bo vsako uro na gradbišče prispelo 100 ton zmesi. Finišer mora glede na debelino in širino vgrajevanja zmes vgrajevati z ustrezno hitrostjo, da bo na uro vgrajenih 100 ton. Za zgoščevanje pa mora biti na voljo dovolj ustreznih valjarjev, da bodo na uro zgostili 100 ton zmesi oziroma plasti (glej preglednico 5). Ravnoesje je treba zagotavljati ves čas vgrajevanja. Ko pride do spremembe v eni fazi, je treba korigirati tudi ostale faze, v nasprotnem primeru pride do zastojev in drastičnih izgub temperature zmesi in/ali plasti.

4.4. Zamujeno časovno okno zgoščevanja

Stalna dilema operaterja (ali operaterke) na valjarju je naslednja:

- če prekmalu začnem zgoščevati, obstaja precejšnja verjetnost za nastanek razpok in neravnin,
- če prepozno začnem zgoščevati, se bo plast preveč ohladila in je ne bo možno zgostiti.

Vzrok za neustrezno zgoščeno asfaltno plast pogosto izhaja iz zamud pri zgoščevanju oziroma zgoščevanja pri prenizki temperaturi. Izvajalci del pogosto nekoliko kasneje pričnejo zgoščevati, da bi se izognili razpokam, ki lahko nastanejo zaradi prevroče zmesi, kar je pravilno v primeru debelejših plasti in vročih pogojev. Vendar pa pri tanjši plasti in hladnejših razmerah pride do nenadnega padca temperature plasti, kar skrajša časovno okno zgoščevanja in vodi do neustrezne zgoščenosti. Operater na stroju mora poznati vplive temperaturnih pogojev in biti pozoren na obnašanje zgoščevane plasti ter glede na izkušnje (ažurno) prilagajati dinamiko ali/intenziteto zgoščevanja.

5 ZGOŠČEVANJE ASFALTNE PLASTI

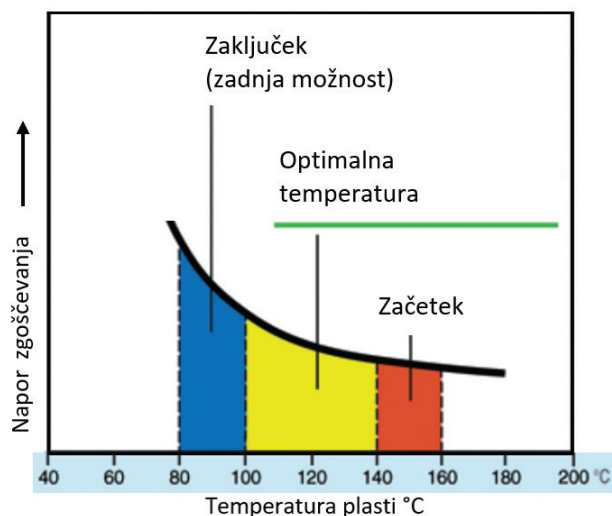
Ustrezno zgoščena asfaltna plast zagotavlja odpornost plasti proti obremenitvam prometa, preprečuje vdor vode in zraka ter je trajnejša. Neustrezno zgoščena plast lahko povzroči zmanjšanje življenjske dobe tudi za 50 % in več [Bode, 2012].

Veliko je dejavnikov, ki vplivajo na uspešnost zgoščevanja, vendar sta za uspešno zgostitev plasti pomembna le dva pogoja. Temperatura plasti, pri kateri se zmes lahko zgošča, in dovolj toga podlaga, ki zagotavlja, da se večina zgoščevalne energije prenese v asfaltno plast in ne v spodnje plasti.

Slika 10 prikazuje, kako se glede na različno temperaturo plasti spreminja napor zgoščevanja oziroma obnašanje zgoščevane plasti.

5.1. Zgoščevanje (pre)vroče plasti

Temperatura plasti med 140 °C in 160 °C je za zgoščevanje (pre)visoka, kar pomeni, da ima bitumen zelo nizko viskoznost. Notranje trenje je zelo nizko, in to omogoča najmanjši napor zgoščevanja, zato lahko pride do čezmerne zgostitve plasti. V ekstremnem primeru (odvisno tudi od lastnosti zmesi) se bitumen iztisne na površino in pojavijo se črni madeži bitumna. Plasti s tako visoko temperaturo ne smemo intenzivno zgoščevati, lahko se izvede en ali dva prehoda brez vibracije (predzgoščevanje). Če je bila s finišejem dosežena



Slika 10. Vpliv temperature plasti na napor zgoščevanja [Bomag, 2009].

visoka stopnja predzgostitve, je s tem zmanjšana verjetnost za nastanek večjega ugreza valja, narivanja zmesi ali razpok. Priporočljivo je zgoščevati z lažjim valjarjem. Če se pojavi narivanje zmesi pred bandažo valja, je treba valjanje za nekaj časa prekiniti, drugače bo prišlo do razpok ali tako imenovane pomarančne površine.

V primeru več prehodov po isti liniji ali ostrih zavojev se običajno pojavi precejšen ugrez valja z bočnim izrivanjem zmesi. Valjar lahko tako močno zareže v svežo (prevročno) plast, da sled ostane tudi po koncu glajenja, kar je nedopustna napaka zgoščevanja.

V primeru debelejšje plasti, in če ni bočne opore (robnik), bo na robu plasti prišlo do precejšnjega izrivanja zmesi, kar si nikakor ne želimo.

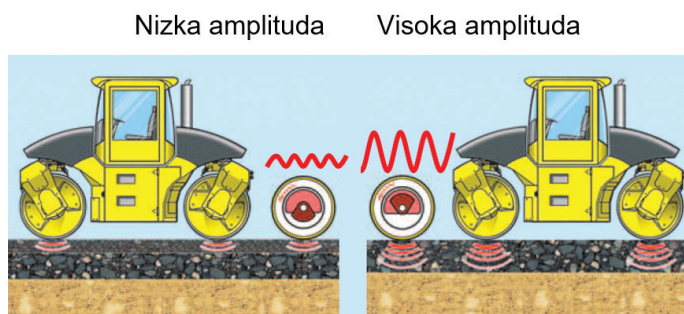
Na vroči površini se mora valjar ves čas gibati, ob (daljšem) zastoju se lahko pojavi vdolbina (odtis) valja, kar predstavlja neravnino.

5.2. Ustrezna temperatura plasti za zgoščevanje

Najbolj primerna temperatura plasti za zgoščevanje je med 100 °C in 140 °C. Viskoznost bitumna oziroma ustrezno notranje trenje omogoča kamnitim zrnjem v asfaltni zmesi, da med seboj lažje zdrsiyo in se namestijo v čim bolj zgoščeno strukturo plasti. Če je bila s finišejem dosežena visoka stopnja predzgostitve, z valjarji hitreje in lažje dosežemo ustrezno zgoščenost. V tej fazi se izvaja glavno zgoščevanje, to pomeni, da je treba izvesti ustrezno število prehodov glede na debelino plasti ter maso valjarja, kar je navedeno v preglednici 3. Če vgrajujemo tanjšo plast (in še v hladnejšem obdobju), se plast zelo hitro hladi. Običajno v tem primeru fazo predzgoščevanja preskočimo in takoj začnemo glavno zgoščevanje. Zmes z visokim deležem drobirja (kot je SMA) se težje zgošča kot zmesi s kontinuirno linijo zrnivosti (kot so AC surf, bin in base) ali zmes, ki vsebuje tudi zaobljena zrna. Pomembna je ustrezna izbira valjarja glede na debelino plasti. Ne sme biti prelahak ali pretežak.

Debelina asfaltne plasti (cm)	Število prehodov z vibracijo (masa tandem valjarja)		
	4 tone	7 ton	10 ton
2	2 – 4	1 – 2 N	1 – 2 N
4	4 – 6	2 – 4 N	2 – 4 N
6	4 – 8	4 – 6 N	2 – 4 N
10	6 – 8	4 – 8 NV	4 – 6 NV
14		6 – 8 V	4 – 6 V
Vrsta vibracije: N – nizka amplituda V – visoka amplituda			
Temperatura plasti > 100 °C.			

Preglednica 3. Tipično število prehodov valjarja [Bomag, 2009].



Slika 11. Zgoščevanje asfaltne plasti z nizko ali visoko amplitudo [Bomag, 2009].

Za optimalno zgoščevanje so najbolj primerni valjarji z dvema amplitudama in dvema frekvenca. Debelejše plasti se zgoščajo z večjo amplitudo in nižjo frekvenco, tanjše plasti z nižjo amplitudo in večjo frekvenco. Obstajata vsaj dve vrsti vibracije – vertikalna in oscilacijska. Oscilacijska je bolj primerna za premostitvene objekte, mestna središča in zagotavlja bolj ravno površino oziroma ne povzroča mikorebraste površine, kar se včasih zgodi pri uporabi vertikalne vibracije.

5.3. Zgoščevanje (pre)hladne plasti

Temperatura plasti med 80 °C in 100 °C je nizka, vendar še omogoča zgoščevanje. Običajno se pojavi ob temperaturni segregaciji ali krajšem zastoju finišeerja. Notranje trenje zmesi je bistveno povečano, zato je za zgostitev potrebno več energije. To pomeni večjo intenziteto zgoščevanja, več prehodov ali/in večjo maso valjarja. Časovno okno zgoščevanja se bliža koncu, zato je treba prehode z valjarjem izvesti čimprej. V tej fazi je treba zaključiti zgoščevanje. V primeru, da plast za finišejem ne dosega dovolj visoke temperature (kar ni redek pojav), tudi najboljši valjar in najbolj usposobljen operater na stroju ne moreta zgostiti plasti.

Ko pade temperatura plasti pod 80 °C, plast ni več primerna za zgoščevanje. Izvaja se glajenje oziroma zaglajevanje robov (sledov) valjarja. Bitumen preide iz funkcije maziva v svojo primarno funkcijo veziva in togost plasti se bistveno poveča. Ob

nadaljnem zgoščevanju se lahko pojavita drobljenje zrn in rahljanje povezane strukture plasti.

5.4. Hitrost valjarja

Glede na fazo zgoščevanja (predzgoščevanje, glavno zgoščevanje ali glajenje) se spreminja hitrost valjanja (preglednica 4), kajti nižja hitrost dosega boljšo zgostitev plasti in obratno, zato je hitrost valjanja zelo pomembna.

Priporočene povprečne hitrosti valjanja (km/h)		
Pred zgoščevanje	4 – 6	Statično, tandem
Glavno zgoščevanje	3 – 5	Z vibracijo, tandem
Glajenje	6 – 8	Statično, tandem
Glavno zgoščevanje	4 – 8	Valjar s pnevmatikami
Kasnejše valjanje	10 – 12	Valjar s pnevmatikami

Preglednica 4. Priporočene hitrosti valjanja [Bomag, 2009].

5.5. Število in masa valjarjev

Ovisno od debeline plasti in hitrosti napredovanja del (ravnovesje štirih faz asfaltiranja) je treba določiti optimalno vrsto in število valjarjev glede na zmožnost zgoščevanja, kar prikazuje preglednica 5.

Masa valjarja (ton)	Zmožnost zgoščevanja valjarja (ton/h) glede na debelino plasti		
	2 – 4 cm	6 – 8 cm	10 – 14 cm
1,5 – 2,5	10 – 40	25 – 60	40 – 100
3,0 – 4,5	20 – 60	40 – 90	10 – 160
7 – 9	40 – 100	70 – 160	120 – 220
10 – 14	70 – 120	100 – 200	180 – 280

Preglednica 5. Zmožnost zgoščevanja valjarja (ton/h) [Bomag, 2009].

Med zgoščevanjem je potrebna oskrba valjarja z vodo, kar prekinje dinamiko zgoščevanja. V tem času ga mora nadomestiti predhodno določen valjar, ki nam pride prav tudi v primeru morebitne okvare. Stari asfalterski rek pravi En valjar ni noben valjar. V primeru večjega števila valjarjev mora odgovorna oseba določiti razporeditev in vloge valjarjev ter sosledje zamenjav (zaradi oskrbe z vodo), kar je treba spoštovati ves čas zgoščevanja. Vir za oskrbo z vodo mora biti čim bližje in zagotavljati ustrezen pretok, da je čas oskrbe čim krajši. Oskrba z gorivom se izvaja pred izvedbo del ali po njej.

6 DEJAVNIKI IN POGOJI, KI VPLIVAJO NA ZGOŠČEVANJE ASFALTNE PLASTI

V nadaljevanju so navedeni dejavniki in pogoji, ki kakorkoli (posredno ali neposredno) vplivajo na izgubo temperature zmesi

oziroma uspešnost zgoščevanja asfaltne plasti. Razumevanje vplivov je pomemben korak za doseganje zelenega cilja.

6.1. Organizacija izvedbe del (predhodno načrtovanje)

6.1.1. Osebj

Nivo usposobljenosti osebja igra pomembno vlogo. V začetku sezone je treba opraviti interno in eksterno izobraževanje oziroma izvajanje prenosa znanja s starejše na mlajšo generacijo.

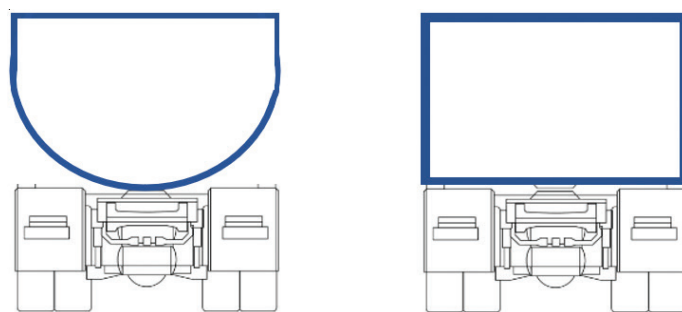
6.1.2. Proizvodnji obrat

Izbrati je treba najbližji primeren obrat, kajti čas transporta zmesi do gradbišča mora biti čim krajši. Imeti mora ustrezno kapaciteto (t/h) in nivo skladnosti obratovanja (NSO). Vsak dan je ob začetku proizvodnje, zaradi hladnih mehanskih sklopov obrata, temperatura zmesi na prvem tovornjaku nekoliko nižja. Zato je smiselno, da se na gradbišču najprej vgradi zmes iz drugega ali tretjega tovornjaka, šele nato pa zmes iz prvega.

6.1.3. Prevozna sredstva

Glede na različna prevozna sredstva, vrste kesonov in ponjav je tudi izguba temperature zmesi bistveno različna. Najbolj primeren je tovornjak s čim večjo nosilnostjo, natovorjen z maksimalno dovoljeno količino zmesi. V takšnem primeru je sredica največja in izguba temperature zmesi najmanjša. Seveda so gradbišča različna in dostopnost večjih vozil je velikokrat omejena.

Glede oblike (prereza) kesona je bolj primeren keson s polkrožno obliko, kajti v vogalih kvadratnega kesona se zmes hitreje ohlaja.



Slika 12. Polkrožni in kvadratni prerez kesona.

Običajni keson, ki se uporablja tudi za prevoz ostalih tovarov, je najbolj podvržen toplotnim izgubam. Če je keson izoliran, so toplotne izgube občutno manjše. Keson s potisno tehnologijo dokazano zmanjša stopnjo temperaturne segregacije.

Pri raztovarjanju (push-off) se na površini hladnejša zmes (skorja) bistveno bolj enakomerno razporedi med vročo zmes kot pri klasičnem zvrčanju v vsebnik finišeja. Tako je vpliv temperaturne segregacije občutno zmanjšan.

Toplotni zabojnik je nujen pri ročni izvedbi del tako kot keson z loputo za kontrolirano doziranje zmesi v samokolnico.



Slika 13. Keson s potisno tehnologijo (push-off) [Fliegl, 2018].

Na kesonu je t. i. ponjava, ki ščiti zmes pred ohlajevanjem, dežjem in drugimi vplivi. Če ponjava tesni in je pod ponjavo ujet vroč zrak, to bistveno prispeva k zmanjšanju temperaturne segregacije zmesi. Takšni ponjavi pravimo zaprta ponjava. Če ponjava ne tesni, so v vmesnem prostoru zračni tokovi, ki hladijo zmes. Takšni ponjavi rečemo odprta ponjava.

6.1.4. Ravnoesje štirih faz asfaltiranja

Glej poglavje 4.3.

6.2. Temperaturni pogoji

Štiri temperature, ki vplivajo na uspešnost zgoščevanja asfaltne plasti:

- 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).

Različni temperaturni pogoji in temperaturna obdobja zahtevajo različne ukrepe, pristop ter dinamiko zgoščevanja. Ti pogoji so največkrat usodni, kajti izvajalci skoraj vedno dela opravljajo z enako dinamiko ne glede na specifične temperaturne pogoje.

6.3. Debelina plasti

Debelina asfaltne plasti lahko znaša od 20 mm do 140 mm. V primeru vgrajevanja tanjše plasti (od 20 mm do ca. 40 mm) se plast zelo hitro hladi, sploh če se dela izvajajo v hladnem obdobju na hladno podlago. Takšno plast je treba čim prej zgostiti. Pri srednji debelini imamo nekoliko več časa. Pri večji debelini plasti (nad ca. 80 mm) je ohlajevanje plasti bistveno počasnejše in moramo paziti, da ni na začetku zgoščevanje preveč intenzivno. Glede na debelino plasti je treba prilagoditi dinamiko in intenziteto zgoščevanja. Lahko se zgodi, da vgrajujemo debelejšo plast, vendar je temperatura plasti takoj za finišejem bistveno nižja od pričakovane oziroma zahtevane. V takem primeru je treba plast takoj in intenzivno zgoščevati.

6.4. Hitrost vgrajevanja in nastavitve vgrajevalne plošče

Hitrost napredovanja vgrajevalnega stroja (finišeja) lahko znaša od skoraj 0 m/min do približno 5 m/min. Običajna hitrost vgrajevanja je med 2 in 3,5 m/min. Vgrajevanje mora potekati čim bolj kontinuirno s konstantno hitrostjo. Pri manjši hitrosti se dosega višja stopnja predzgostitve plasti z zgoščevalno

ploščo in obratno. Ko se finiše ustavi, valjarjem območje neposredno za vgrajevalno ploščo ni dostopno in ga ta čas ne moremo zgoščevati, zato se stroj (v primeru vgrajevanja tanjše plasti) v delovnem potezu (hodu) ne bi smel nikoli ustaviti. Bolje je nekoliko zmanjšati hitrost vgrajevanja (na primer s 3 m/min na 1 m/min) kot pa se popolnoma ustaviti. Glede na debelino plasti in širino vgrajevanja je treba prilagoditi hitrost vgrajevanja, tako da je poraba zmesi skladna s preostalimi fazami asfaltiranja.

Vgrajevalna plošča ima možnost nastavitve hoda nožev in intenziteto vibracije. Pri tanjši plasti je treba nastaviti manjši hod nožev pri debelejših večji. Vibracija naj bo nastavljena na približno 80 % zmogljivosti. V primeru izvedbe izravnalne plasti, kjer se debelina plasti približuje 0 mm, je treba zmanjšati ali celo izklopiti vibracijo vgrajevalne plošče.

6.5. Energija zgoščevanja

V poglavju 5 so navedeni vsi podatki o zgoščevanju:

- kako se obnaša in zgošča plast glede na trenutno temperaturo,
- s kakšnim valjarjem, s kolikšno hitrostjo in koliko prehodov je treba opraviti,
- koliko valjarjev potrebujemo glede na hitrost izvedbe del.

Operater na stroju mora pridobiti čim več podatkov o zgoščevani plasti, da bo lahko v pravem trenutku zgoščeval s pravo amplitudo in hitrostjo. Podatki se pridobijo z opazovanjem obnašanja asfaltne plasti in/ali z ustrezno opremo oziroma sistemom zaznavanja.

6.6. Sistemi zaznavanja lastnosti asfaltne plasti med zgoščevanjem

V Sloveniji imamo kar nekaj valjarjev novejša generacije, ki zaznavajo togost in temperaturo plasti ter samodejno uravnavajo potrebno energijo zgoščevanja. Programska oprema zbira in vrednoti podatke ter prilagaja efektivno amplitudo vibracije.

Na voljo je tudi sistem za ugotavljanje temperature in togosti plasti ter zaznavanja števila prehodov valjarjev, ki se ga da naknadno vgraditi v valjarje.

Omenjena sistema sta operaterju pri stroju v veliko pomoč. Za zgostitev plasti se porabi manj energije in plast je hitreje ter bolj ustrezno zgoščena. Če operater ni usposobljen za uporabo tovrstnih sistemov, prednosti niso izkoriščene in ni pričakovane učinka.

6.7. Mehanizacija, ki pripomore k zmanjšanju temperaturne segregacije

Pri nas nekateri izvajalci uporabljajo podajalnik asfaltne zmesi (slika 15 desno), ki bi moral biti obvezen pri vseh večjih izvedbah del:

- količina zmesi v zalogovnikih je občutno večja, tako je potreba po zaustavitvi finišeja zaradi porabe zmesi manjša in vgradnja poteka bolj kontinuirno,
- v omenjenih zalogovnikih se vroča in hladnejša zmes bolj učinkovito premešata in tako je temperaturna segregacija za finišejem bistveno zmanjšana,

- tovorna vozila nimajo stika s finišerjem, tako je preprečen trk kamiona v finišer in s tem premik vgrajevalne plošče, kar običajno povzroči neravnino.

Obstaja tudi poseben podajalnik, imenovan shuttle buggy, ki ga v Sloveniji še nimamo.

volj visoka togost, da se pri zgoščevanju asfaltne plasti večina zgoščevalne energije prenese v asfaltno plast in ne v spodnje plasti.



Slika 14. Podajalnik shuttle buggy [Rošar, 2020].

Ta podajalnik ima v osrednjem zabojniku mešalno-dozirni polž, ki zelo uspešno homogenizira asfaltno zmes in s tem do največje možne mere zmanjša temperaturno segregacijo.

6.8. Lastnosti podlage

Lastnosti podlage so odvisne od kraja vgrajevanja in prometne obremenitve. Razlika je, če vgrajujemo in zgoščamo zmes na pločniku, cesti, avtocesti, v naselju, na mostu ali viaduktu. Spodnje zahteve so navedene v Tehnični specifikaciji za nevezane nosilne plasti in nevezane obrabne plasti iz zmesi kamnitih zrn, ki uradno še niso veljavne, kajti TSPI je trenutno v javni obravnavi.

- $E_{vs2} \geq 150$ MPa in $E_{vd} \geq 70$ MPa (IT, ZT, T prometna obremenitev),
- $E_{vs2} \geq 120$ MPa in $E_{vd} \geq 55$ MPa (S prometna obremenitev),
- $E_{vs2} \geq 100$ MPa in $E_{vd} \geq 45$ MPa (L, ZL prometna obremenitev).

Navedene zahteve zagotavljajo, da bo nevezana plast (pod asfaltno plastjo) zmožna uspešno prenašati obremenitve prometa. Če so omenjene zahteve dosežene, je to več kot do-

7 UKREPI ZA IZBOLJŠANJE

- Ker je temperatura asfaltne plasti eden ključnih kazalnikov kakovosti pri vgrajevanju, je pomembno, da se ta lastnost stalno spremlja po celotni površini plasti za finišerjem. Podobno kot kaže praksa v tujini, bi morali tudi pri nas vpeljati meritve temperaturne segregacije za finišerjem, kar bi prispevalo k boljšemu poznavanju tovrstnega problema in spodbudilo uporabo rešitev za njeno zmanjšanje. Veljavna tehnična regulativa sploh ne predvideva ugotavljanja in vrednotenja temperaturne segregacije, zato jo je treba dopolniti.
- Globalno, po celi državi, se mora zagotoviti dobava asfaltne zmesi na gradbišče s čim krajšim transportnim časom. Vsa podjetja bi morala podpisati skupno pogodbo o dobavi asfaltne zmesi z najkrajšim transportnim časom. Ta korak bi bistveno prispeval k zmanjšanju ali celo odpravi temperaturne segregacije. Zaradi krajše transportne razdalje se zmanjšajo število prevoznih sredstev, ogljični odtis, obremenjenost cest ...

„Zaprte“ ponjave



Tovornjaki s potisno tehnologijo



Podajalniki



Slika 15. Ukrepi za preprečevanje temperaturne segregacije [Rošar, 2020].

Dokler se ta ukrep ne realizira, je za oddaljena gradbišča nujna uporaba zaprte ponjave, kesona s potisno tehnologijo in podajalnika, saj ti dokazano zmanjšujejo stopnjo temperaturne segregacije.

- Ravnotežje štirih faz asfaltiranja je treba načrtovati in po najboljših močeh izvesti tako, da ima finiše stalno svežo dobavo zmesi in se cel delovni potez ne ustavlja, s čimer se izboljša tudi ravnost plasti.
- Kar se tiče zgoščevanja asfaltne plasti, je marsikaj odvisno od znanja, marljivosti in skrbnosti vodje izvedbe asfalterskih del, delovodje in operaterja na stroju. Operater na valjarju s sistemom za zaznavanje lastnosti plasti mora ta sistem razumeti in obvladati. Običajno se mora zanesti na svoje oči, občutek in izkušnje, da v časovnem oknu ali še prej zgosti plast.

Na žalost je tudi v asfalterstvu tako kot povsod v življenju. Obstajajo sposobni operaterji na valjarjih, ki obvladajo zadeve, in obstajajo vozniki valjarjev, ki pri vožnji komaj sledijo liniji roba asfalta.

8 SKLEP

Dokler ne bo doseženo večje spoštovanje do temperature asfalta in večja strokovnost pri zgoščevanju, se bomo še naprej soočali z neustrezno zgoščenimi asfaltnimi plastmi. To povzroča pogostejše obnove in zapore cest, kar vodi v nezadovoljstvo uporabnikov, višje stroške in večje obremenitve okolja.

9 LITERATURA

Bode, T. A., An Analysis of the Impacts of Temperature Segregation on Hot Mix Asphalt. Magistrsko delo, Lincoln, Nebraska, University of Nebraska-Lincoln, Faculty of The Graduate College, 90 str., 2012.

Bomag, Fayat group; Basic Principles of Asphalt Compaction, GmbH, Hellerwald, D-56154 Boppard, 2009.

Fliegl, Bau- und Kommunaltechnik GmbH. Asphalt construction surveys. Avoid

premature road damage with modern technology right from the asphalt installation stage, str. 108, 2018.

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

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

Rošer, R., Temperaturna segregacija pri vgradnji asfaltnih zmesi, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=130239&lang=slv>, 2020.

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

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.