

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Brence, M., 2016. Uporaba livarskega peska v sestavi asfaltnih zmesi. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Tušar, M., somentor Žura, M.): 92 str.

Datum arhiviranja: 23-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Brence, M., 2016. Uporaba livarskega peska v sestavi asfaltnih zmesi. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Tušar, M., co-supervisor Žura, M.): 92 pp.

Archiving Date: 23-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**PODIPLOMSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
PROMETNA SMER**

Kandidat:

MIRAN BRENCÉ

**UPORABA LIVARSKEGA PESKA V SESTAVI
ASFALTNIH ZMESI**

Magistrsko delo št.: 289

**THE USE OF FOUNDRY SAND IN THE COMPOSITION
OF THE ASPHALT MIXTURE**

Graduation – Master Thesis No.: 289

Mentor:

doc. dr. Marjan Tušar

Somentor:

izr. prof. dr. Marijan Žura

Ljubljana, 16. 09. 2016

Popravki

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani Miran Brence, vpisna številka 26109384, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Uporaba livarskega peska v sestavi asfaltnih zmesi

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

a) da je pisno zaključno delo podiplomskega študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo podiplomskega študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela podiplomskega študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela podiplomskega študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela podiplomskega študija;

3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu podiplomskega študija in jih v pisnem zaključnem delu podiplomskega študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela podiplomskega študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela podiplomskega študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu podiplomskega študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela podiplomskega študija.

V Mariboru, 12.09.2016

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	665.775.4(497.4)(043)
Avtor:	Miran Brence
Mentor:	dr. Marjan Tušar
Somentor:	Izr. Prof. dr. Marijan Žura
Naslov:	Uporaba livarskega peska v sestavi asfaltnih zmesi
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	92 str., 34 pregl., 50 sl., 6 en.
Ključne besede:	Livarski pesek, bentonit, odpornost na zgoščevanje, asfalt, sekundarna surovina, energija zbijanja

Izvleček

Glavne sestavine proizvedenih asfaltnih zmesi predstavljajo različne frakcije kamenih materialov, kamene moke ter bitumna. V proizvedeni toni asfaltne zmesi predstavlja približno 85% masnega deleža kameni material. Pri uporabi sekundarnih surovin, kot nadomestilu kamenih materialov za proizvodnjo asfaltnih zmesi, se lahko izognemo problemom povezanih s pridobivanjem ustreznih kamenih frakcij oziroma jih bistveno zmanjšamo. V magistrskem delu je prikazana možnost uporabe livarskega peska, kot sekundarne surovine ali nadomestek frakcij kamenega materiala pri proizvodnji asfaltnih zmesi.

Cilj magistrskega dela je preveriti ali z odpadnim livarskim peskom lahko enakovredno nadomestimo kamene frakcije v asfaltni zmesi, oziroma če lahko pride celo do določenega izboljšanja v smislu zmanjšanja porabljene energije pri proizvodnji vročih asfaltnih zmesi, kot tudi pri vgrajevanju. Pri tem pa ne sme priti do poslabšanja bistvenih lastnosti asfaltnih zmesi, kot so na primer: odpornost proti nastanku kolesnic, odpornost na vodo in odpornost na nizke temperature. Zaradi bentonitov vsebovanih v izbranih livarskih peskih je pričakovano lažje zgoščanje asfaltnih zmesi, oziroma možnost zgoščanja asfaltnih zmesi pri nižjih temperaturah od običajnih. Podoben vpliv na zgoščevanje zaradi kristalno vezane vode imajo tudi zeoliti.

Glavni del preiskav magistrskega dela je namenjen ovrednotenju prispevka livarskega peska k lažjem zgoščevanju asfaltnih zmesi. Iz tega izhajam, da pri dodajanju livarskega peska v asfaltne zmesi, ne gre le za dodajanje večje količine sekundarne surovine, temveč tudi za dodaten efekt zgoščevanja pri nižji temperaturi zaradi vsebnosti bentonita, ki je zaradi vezane vode še aktiven. Pri tem pa morajo biti izvedene vse preiskave bistvenih lastnosti asfaltnih zmesi z dodanim livarskim peskom, za preveritev, če dodani livarski pesek vpliva na te lastnosti asfaltnih zmesi.

Z raziskavami smo v magistrski nalogi ugotovili, da dodani livarski pesek bistveno vpliva le na lažjo vgradljivost asfaltnih plasti. Že 4 % dodanega livarskega peska ima na zgoščanje podoben vpliv, kot najpogosteje uporabljeni nizkotemperaturni dodatki (parafinski voski in zeolit). Iz rezultatov pa je razvidno, da so nekatere mehanske lastnosti (stabilnost in togost) nekoliko slabše v asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C v primerjavi z mehanskimi lastnostmi asfaltne zmesi pripravljene pri 150 °C, vendar bi po kriterijih standarda JUS U.E4.014 še zmeraj ustrezale zahtevam. Poudariti velja, da standard JUS od leta 2003 ni več v veljavi,

kriteriji za stabilnost in deformacijo pa niso več zahtevani. Za asfaltne zmesi uporabljene na letališčih pa določa standard SIST EN 13108-1 samo kategorije, zahtevane kategorije za konkretne asfalte pa izbere naročnik. Čeprav mehanske lastnosti, to sta stabilnost in deformacija oziroma njuni mejni vrednosti nista več zahtevani in določeni s standardom pri laboratorijskem preskušanju asfaltnih zmesi za gradnjo cest, smo jih uporabili kot izhodišče za določitev in opredelitev sprememb parametrov dveh osnovnih mehanskih lastnosti – stabilnosti in deformacije. Tako je mogoče enostavneje definirati ali so se mehanske lastnosti spreminjale bistveno z dodajanjem livarskega peska asfaltni zmesi pri različnih temperaturah. Znižanje temperature torej bolj vpliva na stabilnost asfaltnih preskušancev, količina dodanega livarskega peska pa na indirektno natezno trdnost ITSR.

Torej lahko v asfaltno zmes dodamo do 9 % livarskega peska brez bistvenega poslabšanja kakovosti asfaltne plasti.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 665.775.4(497.4)(043)
Author: Miran Brence, B. Sc.
Supervisor: dr. Marjan Tušar
Co-supervisor: Izr. Prof. dr. Marijan Žura
Title: The use of foundry sand in the composition of the asphalt mixture
Type of document: M. Sc. Thesis.
Notes: 92 p., 34 tab., 50 fig., 6 eq.
Key words: Foundry sand, bentonite, resistance to compaction, asphalt, secondary raw material, energy of compaction

Abstract

The main components of asphalt mixtures are fractions of stone aggregates, filler and bitumen. The main component in produced asphalt mixture by mass represents stone fractions with about 85% by weight. When stone materials for the production of asphalt mixtures are replaced with secondary raw materials, then problems associated with acquiring suitable stone fractions can be avoided or at least significantly reduced. The study presents the possibility of use of foundry sand as a secondary raw material that is a substitute fraction of stone material in the production of asphalt mixtures.

The aim of the master thesis is to examine whether the waste moulding sand can be used as substitute for mineral fractions in asphalt mixtures. Additionally it was assumed that there can be even some improvement in terms of reducing the consumed energy for the production and building in of hot mix asphalt mixture. At the same time there must be no decrease in the essential characteristics of the bituminous mixture, such as, for example, resistance to the resistance to rutting, water resistance and resistance to low temperatures. Because bentonites contained in the selected foundry sands it was expected easier compaction of the asphalt layers, or the possibility of compaction of asphalt layers at lower temperatures than normal. Similar effects to ease of compaction due to crystal bound water are known for zeolites.

The main part of the master work is designed to evaluate the contribution of foundry sand to compaction of asphalt mixtures. The goal of addition of foundry sand in asphalt mixtures, is not just adding large quantities of secondary raw materials, but also to prove additional positive effect on compaction at lower temperatures due to the presence of bentonite in which is still some active bound water. All significant tests of the intrinsic properties of asphalt mixtures were carried out to verify if addition of the foundry sand effect on these properties of asphalt mixtures.

It was found out that the addition of foundry sand substantially affect only on the ease of workability of asphalt layers. Only addition of 4% foundry sand has similar effect as the most commonly used low-temperature additives (paraffin waxes and zeolite). From the results

it is evident decrease in some mechanical properties (stability and Marshall stiffness) for asphalt mixtures prepared at 120 °C in comparison with the mechanical properties of the asphalt mixtures prepared at 150 °C. But, according to the criteria of the standard JUS U.E4.014 all asphalt mixtures still meet the requirements. It should be noted that the standard JUS since 2003 is no longer in force and so criteria for the stability and deformation are no longer officially required for roads. In the standard EN 13108-1 are only categories or asphalt mixtures used in airports, required categories for concrete asphalt are determined by contracting authority. Although the mechanical properties of stability and deformation or their limit values are no longer required and determined by the standard for laboratory testing of asphalt mixtures for road construction, they were used to identify and define the change in two basic mechanical properties - stability and deformation. In this way it was possible to easily define if mechanical properties of asphalt mixture changed significantly with the addition of foundry sand at different temperatures. Decrease in production temperature and thus more impact on the stability of asphalt test, on the other hand the amount of added foundry sand effect on the indirect tensile strength ITSR.

So in the asphalt mixture can be added to the 9 % foundry sand, with no substantial effect on the quality of the asphalt layer.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc.dr.Marjanu Tušarju za strokovno pomoč, vodenje in kritične pripombe pri izvedbi in oblikovanju magistrske naloge, somentorju izr.prof.dr. Marijanu Žuri ter vsem članom komisije za strokovno pomoč in pripombe.

Prav tako se zahvaljujem Iztoku Ramljaku in Tomislavu Šafranu iz inštituta Ramtech iz Zagreba, kjer so mi omogočili laboratorijske preskuse ter nudili strokovno pomoč pri izvajanju le-teh.

Zahvaljujem se tudi Zvonetu Britovšku za pomoč pri snovanju ideje moje magistrske teme, kot tudi strokovno podporo in kritiko.

Zahvalil bi se staršema, ki sta me podpirala skozi celoten študij, očetu pa še za vso strokovno pomoč pri nastajanju moje magistrske naloge.

Posebno zahvalo namenjam moji ženi Nini za potrpljenje, razumevanje in stalno podporo na moji življenjski poti.

KAZALO VSEBINE

Popravki	I
Izjave	II
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	V
Zahvala	VII
Okrajšave in simboli	XVII
1 UVOD	1
1.1 Predstavitev problema	1
1.2 Uporabljena metodologija	1
2 ASFALTNE ZMESI	4
2.1 Splošno o asfaltu	4
2.2 Sestava bituminiziranih zmesi	4
2.2.1 Osnovni (vhodni) materiali	6
2.2.2 Dodatki in sekundarne surovine v asfaltnih zmesih	9
2.2.2.1 Dodatki	9
2.2.2.2 Sekundarne surovine	13
3 TEORETIČNE OSNOVE PREISKAV	24
3.1 Vhodni materiali	24
3.1.1 Kameni agregat	24
3.1.1.1 Granulometrijska sestava	24
3.1.2 Kamena moka in livarski pesek	24
3.1.2.1 Določevanje prostorninske mase zrn kamene moke - Postopek s piknometrom	24
3.1.2.2 Določevanje votlin v suho zbiti kameni moki	25
3.1.2.3 Delta preskus prstan-kroglica	25
3.1.3 Bitumen	26
3.1.3.1 Določanje zmečkščiča po metodi prstan kroglica (PK)	26
3.1.3.2 Določevanje penetracije z iglo	26
3.2 Asfaltna zmes	26
3.2.1 Topni delež veziva	26
3.2.2 Ugotavljanje deleža veziva: rotacijski uparjalnik	26
3.2.3 Ugotavljanje največje gostote	27
3.2.4 Ugotavljanje prostorninske gostote bitumenskih preskušancev	27
3.2.5 Ugotavljanje značilnosti votlin v bitumenskih preskušancih	27
3.2.6 Zgoščevanje	28

3.2.7	Ugotavljanje občutljivosti bitumenskih preskušancev na vodo	28
3.2.8	Ugotavljanje posredne natezne trdnosti bitumenskih preskušancev	28
3.2.9	Preskus po Marshallu	29
4	EKSPERIMENTALNI DEL.....	30
4.1	Metode dela.....	30
4.1.1	Kameni agregat	30
4.1.1.1	Granulometrijska sestava	30
4.1.2	Kamena moka in livarski pesek.....	31
4.1.2.1	Določevanje prostorninske mase zrn kamene moke - Postopek s piknometrom.....	31
4.1.2.2	Določevanje votlin v suho zbiti kameni moki.....	32
4.1.2.3	Delta preskus prstan-kroglica	33
4.1.3	Bitumen	35
4.1.3.1	Določanje zmečkščiča po metodi prstan kroglica (PK)	35
4.1.3.2	Določevanje penetracije z iglo	36
4.1.4	Asfaltne zmesi	37
4.1.4.1	Ugotavljanje deleža veziva: Rotacijski uparjalnik.....	37
4.1.4.2	Ugotavljanje največje gostote	38
4.1.4.3	Ugotavljanje prostorninske gostote bitumenskih preskušancev	39
4.1.4.4	Zgoščevanje.....	40
4.1.4.5	Ugotavljanje občutljivosti bitumenskih preskušancev na vodo	41
4.1.4.6	Preskus po Marshallu.....	44
5	REZULTATI PREISKAV	46
5.1	Vhodni materiali	46
5.1.1	Kameni agregati	46
5.1.2	Kamena moka	46
5.1.3	Livarski pesek.....	47
5.1.4	Bitumen	48
5.2	Predhodne sestave asfaltnih zmesi	49
5.2.1	Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska	50
5.2.2	Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska	52
5.2.3	Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska	53
5.2.4	Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska	54
5.2.5	Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % dodanega livarskega peska	56
5.3	Preiskave asfaltnih zmesi	57
5.3.1	Topni delež veziva in lastnosti ekstrahirane bitumna	57

5.3.2	Fizikalne lastnosti	58
5.3.3	Mehanske lastnosti	59
6	DISKUSIJA.....	62
6.1	Granulometrijska sestava asfaltne zmesi	62
6.2	Vhodni materiali	66
6.2.1	Kamena moka in livarski pesek.....	66
6.3	Asfaltna zmes	68
6.3.1	Topni delež veziva	68
6.3.2	Fizikalne lastnosti	72
6.3.3	Mehanske lastnosti	76
6.4	Primerjava rezultatov z drugimi raziskavami	83
7	ZAKLJUČKI	85
8	LITERATURA.....	87

KAZALO SLIK

Slika 1-1:	Shematski prikaz metodologije dela	2
Slika 2-1:	Model sestave asfaltne zmesi	5
Slika 2-2:	Krivulji viskoznosti običajnega in s parafinskim voskom modificiranega bitumna	12
Slika 2-3:	Asfalt v kosih, nalomljen z bagri pri odstranjevanju z vozišča	14
Slika 2-4:	Asfaltni rezkanec.....	14
Slika 2-5:	Na trgu razpoložljivi bitumni modificirani s polimeri.....	16
Slika 2-6:	Delitev metalurških žlinder glede na izvor.....	17
Slika 2-7:	Livarski pesek pod mikroskopom.brez bentonita (126 x povečava)	19
Slika 2-8:	Livarski pesek pod mikroskopom.brez bentonita: a) 30x povečava b) 75x povečava – EFI	19
Slika 2-9:	Livarski pesek pod mikroskopom z betonitom: a) 30x povečava b) 75x povečava –EFI	20
Slika 4-1:	Sejalnik z vstavki sit	30
Slika 4-2:	Presevki (ostanki) livarskega peska na različnih vstavkih sit po sejanju	31
Slika 4-3:	Določanje prostorninske mase livarskega peska: a) piknometri napolnjeni z livarskim peskom, b) piknometri napolnjeni z livarskim peskom in destilirano vodo	32
Slika 4-4:	Aparat za zgoščevanje po Rigdenu	32
Slika 4-5:	Priprava vzorca zmesi bitumna in mešanice kamena moka Očura/livarski pesek za določanje delta prstan-kroglica	34
Slika 4-6:	Določanje PK bitumna B50/70: a) med postopkom, b) konec postopka.....	36
Slika 4-7:	Določevanje penetracije z iglo bitumna B50/70	37
Slika 4-8:	Rotacijski uparjalnik za pridobivanje ekstrahiranega bitumna	38
Slika 4-9:	Vakuumska posoda za določanje največje gostote asfaltne zmesi.....	38
Slika 4-10:	Temperiranje vzorca asfaltne zmesi v vodni kopeli pri 25 °C	39
Slika 4-11:	Ugotavljanje prostorninske gostote asfaltnega preskušanca – Tehtanje vzorca pod vodo	40
Slika 4-12:	Marshallovo nabijalo.....	41
Slika 4-13:	Izpis rezultatov zgoščevanja na zaslonu računalnika.....	41
Slika 4-14:	Stiskalnica za določanje indirektna natezne trdnosti s pripadajočimi čeljustmi in programsko opremo ter vodna kopel za obdelavo mokrih vzorcev pri 40 °C.....	42
Slika 4-15:	Priprava a) suhega in b) mokrega vzorca asfaltne zmesi.....	42
Slika 4-16:	Suhi (a) in mokri (b) vzorci asfaltne zmesi po določanju indirektna natezne trdnosti	43

Slika 4-17:	Izpis rezultatov in krivulj indirektnih nateznih trdnosti na zaslonu računalnika za suh (a) in moker (b) vzorec.....	43
Slika 4-18:	Določanje preskusa po Marshall-u	44
Slika 4-19:	Izpis rezultatov stabilnosti, deformacije, tangencialne deformacije in togosti na zaslonu računalnika za dva različna vzorca asfaltne zmesi	45
Slika 6-1:	Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska	62
Slika 6-2:	Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska	63
Slika 6-3:	Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska	64
Slika 6-4:	Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska	65
Slika 6-5:	Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % dodanega livarskega peska	66
Slika 6-6:	Vsebnost votlin po Rigdenu kamene moke Očura v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v kameno moko Očura	67
Slika 6-7:	Delta prstan-kroglica kamene moke Očura v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v kameno moko Očura	68
Slika 6-8:	Delež topnega veziva v asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska.....	69
Slika 6-9:	Točka zmečkaišča - PK ekstrahiranega bitumna v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v asfaltni zmesi	70
Slika 6-10:	Penetracija ekstrahiranega bitumna v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v asfaltni zmesi	71
Slika 6-11:	Največja gostota asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska	72
Slika 6-12:	Gostota asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska	73
Slika 6-13:	Vsebnost votlin v bitumenskih preskušancih asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska	74
Slika 6-14:	Zapolnjenost votlin z bitumnom - VFB asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska	75
Slika 6-15:	Odpornost na zgoščevanje asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska.....	77
Slika 6-16:	Indirektna natezna trdnost mokrih in suhih asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi	78

- Slika 6-17: Občutljivost asfaltnih preskušancev na vodo asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska 79
- Slika 6-18: Stabilnost asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska 80
- Slika 6-19: Deformacija asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska 81
- Slika 6-20: Tangencialna deformacija asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska 82
- Slika 6-21: Togost asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska 83

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1-1	Pregled izvedenih laboratorijskih preiskav za asfaltno zmes AC 8 surf B50/70 A4	2
Preglednica 2-1:	Nazivne velikosti frakcij kamnitih zrn d/D	8
Preglednica 2-2:	Klasifikacija standardnih cestogradbenih bitumnov in nekatere njihove lastnosti	8
Preglednica 2-3:	Klasifikacija s polimeri modificiranih bitumnov in nekatere njihove lastnosti	9
Preglednica 2-4:	Uporaba in priporočila za doziranje parafinskega voska [61]	11
Preglednica 5-1:	Granulometrija in prostorninske mase frakcij 0/4 in 4/8 mm kamenega agregata Očura	46
Preglednica 5-2:	Granulometrija in prostorninska masa kamene moke Očura	46
Preglednica 5-3:	Vsebnost votlin v suho zgoščenem polnilu (Votline po Rigdeniu), standardna deviacija in Delta prstan kroglica kamene moke Očura	47
Preglednica 5-4:	Granulometrija in prostorninska masa livarskega peska	47
Preglednica 5-5:	Prostorninska masa livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska	48
Preglednica 5-6:	Vsebnost votlin po Rigdeniu livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska	48
Preglednica 5-7:	Delta prstan kroglica livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska	48
Preglednica 5-8:	Delta prstan kroglica livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska	49
Preglednica 5-9:	Vhodne količine kamenega materiala Očura in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska	51
Preglednica 5-10:	Granulometrijska sestava asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	51
Preglednica 5-11:	Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	51
Preglednica 5-12:	Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % livarskega peska	52
Preglednica 5-13:	Granulometrijska sestava asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	52
Preglednica 5-14:	Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	53
Preglednica 5-15:	Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % livarskega peska	53

Preglednica 5-16: Granulometrijska sestava asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	54
Preglednica 5-17: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	54
Preglednica 5-18: Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % livarskega peska	55
Preglednica 5-19: Granulometrijska sestava asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	55
Preglednica 5-20: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	56
Preglednica 5-21: Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % livarskega peska	56
Preglednica 5-22: Granulometrijska sestava asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	57
Preglednica 5-23: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1	57
Preglednica 5-24: Topni delež veziva v asfaltnih zmesih brez livarskega peska ter z dodatkom 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C	58
Preglednica 5-25: Lastnosti ekstrahiranega bitumna iz asfaltnih zmesih brez livarskega peska ter 3 %, 6 %, 9 % in 12 % dodanega livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C	58
Preglednica 5-26: Prostorninska gostota asfaltnih preskušancev, največja gostota asfaltnih zmesi, vsebnost votlin, prostorska vsebnost bitumna v asfaltni zmesi – VMA, vsebnost votlin v mineralnem agregatu, delež mineralnega agregata, zapolnjenost votlin z bitumnom – VFB in gostota kamene zmesi v asfaltnih zmesih brez livarskega peska ter dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C	59
Preglednica 5-27: Odpornost na zgoščevanje asfaltnih zmesi brez dodanega livarskega peska in dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C	60
Preglednica 5-28: Natezna trdnost, sila izmerjena pri zlomu vzorcev brez in po delovanju vode ter občutljivost na vodo podana kot razmerje med nateznima trdnostima asfaltnih zmesi brez dodanega livarskega peska ter dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C	60
Preglednica 5-29: Stabilnost, deformacija, tangencialna deformacija in togost asfaltnih preskušancev asfaltnih zmesi brez livarskega peska, dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C	61

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

PmB	s polimeri modificiran bitumen
AC	»Asphalt concrete« Bitumenski beton
<i>Pen, P</i>	penetracija - enota penetracije, ki je 0,1 mm (1 mm/10)
T_{PK}	temperatura zmehčišča v °C
T_{Fraass}	temperatura pretrgališča v °C
ρ_{ka}	prostorninska masa kamene zmesi v Mg/m ³
ρ_{km}	prostorninska masa kamene moke v Mg/m ³
$\Delta_{R\&B}$	delta preskus bitumna s prstan kroglico v °C
ρ_{az}	največja gostota asfaltne zmesi v Mg/m ³
ρ_{ap}	prostorninska gostota bitumenskih preskušancev
$V_{V/A}$	votline v bitumenskih preskušancih v V.-%
$V_{B/A}$	prostorska vsebnost bitumna v asfaltni zmesi v V.-%
VMA	vsebnost votlin v mineralnem materialu v V.-%
VFB	zapolnjenost votlin z bitumnom v V.-%
ρ_{kz}	gostota kamene zmesi v Mg/m ³
ITS _R	občutljivost bitumenskih preskušancev na vodo v %
ITS	posredna natezna trdnost bitumenskih preskušancev v kPa

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

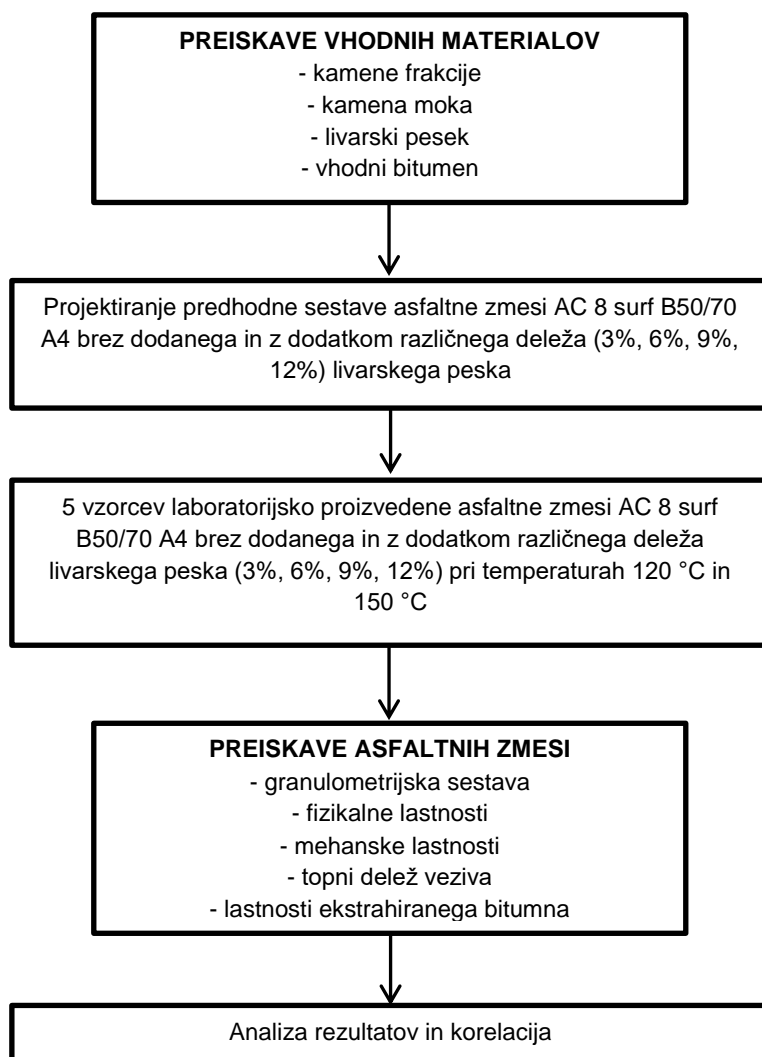
Glavne sestavine proizvedenih asfaltnih zmesi predstavljajo različne frakcije kamenih materialov, kamene moke ter bitumna. V proizvedeni toni asfaltne zmesi predstavlja približno 85 % masnega deleža kameni material. Kameni material dobimo iz kamnolomov, kjer ga zdrobimo v primerne frakcije za proizvodnjo asfaltnih zmesi ter ga pripeljemo do asfaltnih baz. Že za samo drobljenje ene tone kamenega materiala je potrebno 1000 kJ do 4250 kJ energije, precejšen delež energije se porablja tudi pri sejanju kamenih materialov kot tudi za prevoz. S tem prihaja do obremenjevanja okolja v obliki prašnih delcev in toplogrednih plinov. Pri uporabi sekundarnih surovin, kot nadomestilu kamenih materialov za proizvodnjo asfaltnih zmesi, se lahko izognemo problemom povezanih s pridobivanjem ustreznih kamenih frakcij oziroma jih bistveno zmanjšamo. V magistrskem delu je prikazana možnost uporabe livarskega peska, kot sekundarne surovine ali nadomestek frakcij kamenega materiala pri proizvodnji asfaltnih zmesi.

Pri litju enkratne forme uporabimo model, ki ga postavimo v dvodelno ravnino, ki je običajno sestavljena iz livarskega peska. Livarski pesek na kremenčevi osnovi z dodatkom gline za dovolj veliko trdnost se sprime in prevzame obliko modela. Iz posušene peščene forme nato odstranimo model in formo napolnimo preko livnega kanala s talino. Forma mora imeti še oddušnik preko katerega uhaja zrak. Po strditvi se peščena forma razbije in dobimo odlitek, ki ga je potrebno še ustrezno obdelati. Pesek se še nekajkrat reciklira za isti namen, nato postane odpadek.

Zaradi bentonitov vsebovanih v izbranih livarskih peskih pričakujemo lažje zgoščanje asfaltnih zmesi, oziroma možnost zgoščanja asfaltnih zmesi pri nižjih temperaturah od običajnih. Glavni del naloge bo ovrednotenje prispevka livarskega peska k lažjem zgoščanju asfaltnih plasti. Pri dodajanju livarskega peska torej ne gre samo za dodajanje večje količine sekundarne surovine, temveč tudi za efekt zgoščanja pri nižji temperaturi zaradi vsebnosti bentonita, ki je še aktiven.

1.2 Uporabljena metodologija

V magistrski nalogi smo uporabili program preiskav, ki je prikazan na sliki 1-1 ter izvedli preiskave vhodnih materialov (kameni agregat, kamena moka, livarski pesek in bitumen) in asfaltnih zmesi proizvedenih pri 150 in 120 °C brez in z dodanim livarskim peskom (3, 6, 9 in 12 %), ki so prikazane v preglednici 1-1.



Slika 1-1: Shematski prikaz metodologije dela

Preglednica 1-1 Pregled izvedenih laboratorijskih preiskav za asfaltno zmes AC 8 surf B50/70 A4

Temperatura priprave asfaltne zmesi				Pri 120°C					pri 150°C				
Delež livarskega peska v asfaltni zmesi (% m/m)				0%	3%	6%	9%	12%	0%	3%	6%	9%	12%
Vrsta preiskave	Standard	Lastnost	Enota	Število vzorcev									
Kameni agregat													
Granulometrijska sestava	SIST EN 933-1: 2012	Presejek	(m.- %)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bitumen													
Določanje zmečkščiča-PK	SIST EN 1427:2007	T _{PK}	°C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Določevanje penetracije z iglo	SIST EN 1426:2007	Pen	mm/10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Se nadaljuje ...

2 ASFALTNE ZMESI

2.1 Splošno o asfaltu

Gradnja cest je pretežno izkustvena znanost, ki se je skozi ero razvijala s človeštvom ter seveda njegovimi potrebami in posledično zahtevami. Te so na vedno večji delež neposrednega in posrednega prispevka uporabnikov cest za njihovo gradnjo in vzdrževanje vedno večje. Uporabniki cest pričakujejo in zahtevajo zagotovitev pogojev za varno, udobno in gospodarno vožnjo ter seveda tudi trajnost zgrajenih cest. Merila, ki so skozi razvoj cest obveljala, so za oceno zahtevanih značilnosti predvsem: torna sposobnost, ravnost in nosilnost. Zato je bistvena naloga vsakega graditelja ali načrtovalca cest, da ugotovi zahtevam uporabnika v čim večji meri, pri tem pa mora upoštevati določene zakonitosti, ki veljajo za vse vrste cest, razlikujejo pa se samo v stopnji zahtevnosti. Problematiko, ki se pojavlja, je mogoče reševati s klasičnimi znanji ter vezano na nenehen razvoj in iskanje izboljšav tudi z novimi spoznanji. Vendar je v obeh primerih bistvena strokovna analiza in ugotovitev dejanskih vplivov, ki pa lahko izhajajo iz stopnje prometne obremenitve vozišča, klimatskih pogojev, značilnosti podlage in predvidenih materialov [1].

Asfalt lahko definiramo kot v naravi nastalo ali pa tehnično proizvedeno (t.j. naravno ali umetno) zmes bitumenskega veziva in kamnitih zrn, kot tudi morebitnih dodatkov za zagotovitev uporabnosti pri graditvi cest. Bitumen je pri predelavi ustreznega zemeljskega olja pridobljena težko hlapljiva temnobarvna zmes različnih organskih substanc, katerih elastoviskozno obnašanje se s temperaturo spreminja. Delež bitumna v sestavi asfaltne zmesi je sorazmerno majhen, vendar kljub temu je njegov vpliv bistven za lastnosti vozišč. Raziskati ter proučiti vse skrivnosti njegove sestave predstavlja močan izziv za znanstvenike. Njegova natančna sestava ni poznana, kemijsko se lahko ločijo le osnovne skupine spojin, kot so nasičeni ogljikovodiki, aromati, smole in asfalteni. Različna področja njegove uporabe pogojujejo ustrezne fizikalne lastnosti. Ker pa naravne lastnosti bitumna ne ustrezajo več zahtevam moderne cestogradnje, so bitumen pričeli modificirati z različnimi dodatki, predvsem polimeri in mu na ta način razširili področje uporabe in podaljšali trajnost [2].

V sestavi asfaltnih zmesi predstavlja zmes zrn trdna inertna zrna. Delež zmesi zrn se v sestavi asfaltnih zmesi giblje med 92 in 96 odstotki glede na maso oziroma med 80 in 85 odstotki glede na prostornino. Osnovna naloga ali funkcija kamnitih zmesi zrn v asfaltni zmesi je prenos prometne obremenitve z obrabne na vezno oziroma nosilno plast voziščne konstrukcije. Vgrajena asfaltna zmes je stalno izpostavljena mehanskim in atmosferskim ter posredno kemijskim vplivom, zato je obnašanje asfaltne zmesi pod prometno obremenitvijo v veliki meri odvisno od kakovosti zmesi zrn. Mehanski vplivi so posledica pritiskov, udarcev in trenja pnevmatik, atmosferski vplivi (kot so dež, sneg, led, zmrzal in oksidacijski procesi) pa imajo predvsem velik vpliv na mineraloške značilnosti zmesi zrn. Iz navedenega izhaja, da so za zmesi zrn, ki so namenjena za uporabo v vezanih nosilnih in obrabnih plasteh voziščnih konstrukcij, opredeljene osnovne tehnične zahteve za kakovost ter ustrezni postopki za preskuse, ki so skupni za naravne, umetne in reciklirane zmesi zrn [3].

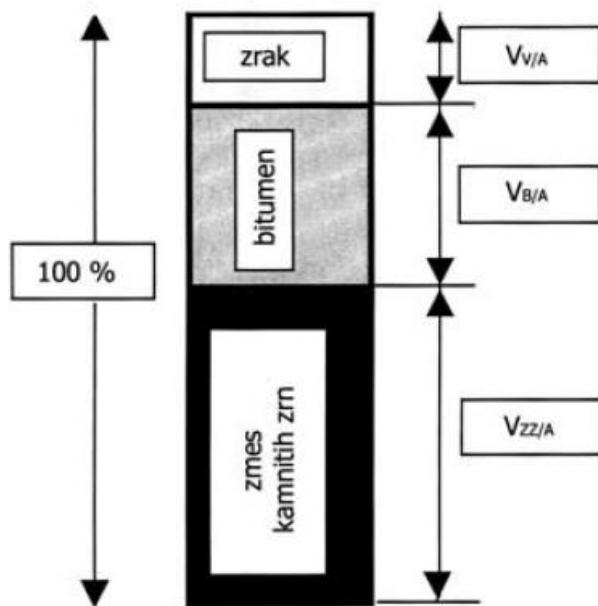
2.2 Sestava bituminiziranih zmesi

V bistvu človek uporablja asfaltne zmesi že nekaj tisočletij. Vendar je od naravnih sestav, ki so bile razmeroma malo uporabljane za vozišča, razvoj pripeljal do današnje stopnje strokovnega načrtovanja predvsem zahtevnejših zmesi.

Asfaltno zmes je treba obravnavati kot trifazni sistem, in sicer (Slika 2-1):

- trdna komponenta je zmes kamnitih zrn,
- tekoča komponenta je vezivo (bitumen) in
- plinasta komponenta pa so votline (zrak).

Deleži posameznih komponent pa so v sestavi asfaltnih zmesi lahko različni. Zato je pri presoji deležev potrebno upoštevati značilnosti komponent, ki pogojujejo različna razmerja med njimi [1].



Slika 2-1: Model sestave asfaltne zmesi [5]

Zato projektiranje asfaltnih zmesi pomeni izbiro materialov in njihovega razmerja v sestavi, ki je potrebna za optimalno zagotovitev zahtevanih lastnosti glede na vrsto asfaltne zmesi. Pri tem pa je treba upoštevati zakonitosti načrtovanja sestave in parametre, ki na asfaltne zmesi učinkujejo v času njihove dobe trajanja [3].

Osnovne značilnosti optimalne asfaltne zmesi so:

- primeren delež veziva za zagotovitev obstojnosti oziroma trajnosti asfaltne plasti,
- zadovoljiva stabilnost oziroma nosilnost asfaltne zmesi za predvideno prometno obremenitev,
- primerna vsebnost votlin v zgoščeni asfaltni zmesi,
- zadovoljiva vgradljivost in onemogočeno razgrinjanje asfaltne zmesi brez segregacije,
- zadovoljive torne lastnosti.

Za določitev s standardi pogojene sestave obstaja več primernih postopkov. V Sloveniji je uveljavljen postopek, ki temelji na teoriji votlin in je opredeljen v tehnični specifikaciji za ceste TSC 06.730 [24]. Najbolj razširjen in pri nas uveljavljen postopek projektiranja asfaltne zmesi je postopek po Marshallu. S tem postopkom se ugotovi delež veziva pri želeni gostoti, ki zagotavlja minimalno stabilnost [3].

Postopek projektiranja asfaltne zmesi po Marshallu sestoji iz šestih osnovnih korakov:

- izbire kamnitega materiala,
- izbire veziva,
- priprave vzorcev (vključno z zgoščevanjem),
- določitve stabilnosti in togosti,
- izračuna gostote in vsebnosti votlin in
- izbire optimalnega deleža veziva.

V sklop razširjenega projektiranja sestave je lahko vključen tudi postopek prostorskega načrtovanja sestave asfaltne zmesi, katerega avtorja sta Ramljak in Pejnović [19], [20], [21].

Postopek priprave zelene (začetne) sestave asfaltne zmesi, opredeljen v TSC 06.730 [24], zajema naslednje aktivnosti:

- zbiranje informacij o prometni in klimatski obremenitvi ter položaju asfaltne plasti v voziščni konstrukciji,
- vzorčenje materialov, namenjenih za izdelavo asfaltne zmesi: zmesi kamnitih zrn, bitumna, polnila in dodatkov,
- določitev lastnosti vzorčenih materialov s standardnimi preskusi,
- izračun sestave ustrezne zmesi kamnitih zrn,
- pripravo asfaltne zmesi z različnimi deleži bitumna ter izdelavo preskušancev,
- določitev prostorske gostote asfaltnih preskušancev in največje gostote asfaltne zmesi ter izračun vsebnosti votlin v preskušancih in stopnje zapolnjenosti votlin v zmesi kamnitih zrn z bitumnom,
- določitev napetostno-deformacijskih lastnosti asfaltne zmesi po postopku po Marshallu pri 60 °C (stabilnost, deformacija, tangencialna deformacija in togost) [3].

Za določitev parametrov sestave obrabnozaporene asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4, na kateri sem izvajal vsa preskušanja, ki so predmet moje magistrske naloge sem uporabil postopek prostorskega načrtovanja sestave asfaltne zmesi. Omenjen postopek je zelo natančen pri projektiranju asfaltnih zmesi, ker vključuje veliko število izmerljivih komponent, ki imajo določen vpliv na fizikalno obnašanje asfaltnih zmesi. Zato je vsaka komponenta v modelu obravnavana kot delež v skupnem prostoru (koncentracija prostora).

Model prostora vsebuje tri podsisteme:

- skelet kamnitih zrn
- bitumensko malto
- votline [1].

2.2.1 Osnovni (vhodni) materiali

Vsi osnovni (vhodni) materiali, ki so predvideni za projektiranje asfaltnih zmesi po vročem postopku, morajo biti preverjeni z ustreznimi predhodnimi preskusi ter s tem dokazana njihova uporabnost. Prav tako mora njihova uporabnost biti dokazana z izjavami o lastnostih. Osnovni materiali v asfaltne zmesi so pretežno kamnita zrna in predstavljajo v sestavi asfaltne zmesi glavnega nosilca odpornosti proti deformacijam ter bitumen kot vezivo. Kamnita zrna pa so lahko proizvedena iz kamnin sedimentnega ali eruptivnega porekla. Njihova uporaba pa je podrobno opredeljena v tehničnih predpisih. Za asfaltne zmesi so primerni kamena moka, pesek in frakcije, ki ustrezajo pogojem navedenim v SIST EN 13043

[29], SIST 1043 [30] ter SIST 1038-1[26], [27], SIST 1038-5 [31], [32], SIST 1038-6 [33], [34] in SIST 1038-7 [35], [36], [3].

S podatki proizvajalca je potrebno preveriti skladnost lastnosti dobavljene zmesi kamnitih zrn z vidika zrnivosti, oblike zrn, količine slabih zrn, žilavosti, vodovpojnosti, obvitosti zrn z bitumnom, zmrzlinke obstojnosti ustreznih frakcij in porekla kamnine. Tako je v okviru projektiranja sestave asfaltna zmesi potrebno določiti naslednje kakovostne karakteristike zmesi kamnitih zrn:

- zrnivost kamene moke,
- votline po Rigdenu,
- zrnivost zmesi kamnitih zrn (frakcij),
- vpijanje vode in
- navidezno gostoto (navidezno prostorninsko maso) frakcij in kamene moke [3].

Kamena moka

Sestavni del zmesi kamnitih zrn predstavlja kamena moka. V bistvu je kamena moka zmes kamnitih zrn, manjših od 0,71 mm. V kameni moki vsebovano polnilo (po SIST EN 13043 [29] do 0,063 mm) ima skupaj z vezivom (bitumnom) funkcijo zapolnjevanja votlin v asfaltni zmesi [3].

Pesek

Tudi pesek spada med kamniti material in ga glede na velikost razvrščamo v:

- fini pesek 0/2 mm ali
- grobi pesek 0/4 mm.

V zmesi kamnitih zrn v asfaltni zmesi se lahko uporabi naravni in/ali drobljeni pesek, ki ga pridobimo z drobljenjem kamnitega materiala [3].

Drobljenec ali prodec

Zmesi kamnitih zrn za asfaltna zmesi lahko vsebujejo kamnita zrna, pridobljena z drobljenjem (drobljenec) ali naravna kamnita zrna (prodec).

Kamnita zrna drobljenca ali prodca morajo biti za pripravo asfaltnih zmesi praviloma razvrščena v frakcije (Preglednica 2-1) [3].

Preglednica 2-1: Nazivne velikosti frakcij kamnitih zrn d/D [2]

Osnovne frakcije (mm)	Vmesne frakcije (mm)
0/4	0/1 0/2 2/4
4/8	
8/16	8/11 11/16
16/32	16/22 22/32
32/63	32/45 32/56 45/63

Bitumen

Bitumen v asfaltni zmesi predstavlja viskoelastično komponento in povezuje kamnita zrna med seboj. Zavzema sorazmerno majhen delež v asfaltni zmesi. Standardne cestogradbene bitumne, ki so primerni za uporabo v asfaltnih zmesih razvrščamo po vrednosti penetracije v tipe bitumna, kar prikazuje preglednica 2-2 [3].

Preglednica 2-2: Klasifikacija standardnih cestogradbenih bitumnov in nekatere njihove lastnosti [37]

Lastnost	Tip bitumna							
	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetracija pri 25°C (1/10 mm)	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
Zmehčišče (°C)	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43
Index penetracije	-1,5 do +0,7							
Pretrgališče po Fraass-u (°C)	/	≤ -5	≤ -5	≤ -7	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15

Vrsta bitumenskega veziva v asfaltni zmesi je odvisna predvsem od:

- zahtevanih lastnosti vgrajene asfaltni zmesi
- obremenitev, ki jim bo asfaltna zmes v času eksploatacije izpostavljena (prometne obremenitve, klimatske obremenitve ...) in
- značilnosti ceste (potek trase, širina vozišča ...).

Kot dejansko vezivo v asfaltnih zmesih pa ne učinkuje samo dodano bitumensko vezivo, ampak le-to skupaj z drobnimi zrni (velikosti do 0,5 mm), ki plavajo v vezivu in skupaj tvorijo t.i. bitumensko malto. Ta drobna kamnita zrna utrujujoče učinkujejo na bitumensko vezivo in odvisno od njihove specifične površine, povečujejo njegovo viskoznost. Pri tem pa seveda gre omeniti, da se lahko določene značilnosti bitumenskega veziva tudi poslabšajo (npr. obstojnost na mraz in adhezijo) [1].

Za izboljšanje lastnosti bitumna se uporabljajo dodatki, obstojni na temperaturo (elastomeri, plastomeri). V ustreznih obratih je tako potrebno pripraviti homogeno fizikalno zmes ali produkt kemijske reakcije bitumna in dodatka. S polimeri modificirani bitumni (PmB), ki so

primerni za asfaltne zmesi, so prav tako razvrščeni v osnovne tipe, ki so prikazani v preglednici 2-3.

Preglednica 2-3: Klasifikacija s polimeri modificiranih bitumnov in nekatere njihove lastnosti [38], [39]

Lastnost	Tip bitumna				
	PmB10/40-60	PmB25/55-65	PmB45/80-50	PmB45/80-65	PmB90/150-45
Penetracija pri 25°C (1/10 mm)	10-40	25-55	45-80	45-80	90-150
Zmehčišče (°C)	≥60	≥65	≥50	≥65	≥45
Pretrgališče po Fraass-u (°C)	≤ -7	≤ -12	≤ -15	≤ -18	≤ -18

Kakovost navedenih bitumenskih veziv za asfaltne zmesi je opredeljena v SIST EN 12591 [37], SIST EN 14023 [38] in SIST 1035 [39]. V sklopu izdelave predhodne sestave asfaltnih zmesi je potrebno preizkusiti naslednje lastnosti bitumna:

- penetracija
- zmehčišče
- indeks penetracije
- gostota [3].

2.2.2 Dodatki in sekundarne surovine v asfaltnih zmesih

2.2.2.1 Dodatki

Adhezijske sile bitumenskih veziv so posledica vsebovanih polarnih spojin. Ker je njihova značilnost kislost, je praviloma oprijemljivost bitumenskega veziva z bazičnimi kamninami (apnenec, bazalt) boljša kot s kislimi (granit, porfir). Lahko pa nastopi kritično stanje, če je prisotna voda, ki pa ima večjo afiniteto s kamnino.

Napetost na mejni površini je posledica neravnovesja robnih molekul pri vsakem telesu. Medtem, ko so molekule v notranjosti telesa zaradi učinkovanja molekularnih sil (kohezije) v vseh smereh v ravnotežju, je pri molekulah na robnih površinah ena komponenta sile usmerjena samo navznoter. Ta pa pogojuje na mejni površini določeno napetost.

Znižanje takšne napetosti na mejni površini bitumna ima za posledico boljše obvijanje kamnitih zrn. Iz tega razloga dodajamo bitumenskim vezivom ustrezna sredstva-dodatke (dope) za boljši oprijem s kamnino. Sicer pa je to mogoče zagotoviti tudi z drugačnimi ukrepi, npr.:

- s segrevanjem bitumenskega veziva se zmanjša njegova viskoznost, kar omogoča večje približevanje molekul, ki izboljša oprijem zaradi adhezije in
- s segrevanjem zmesi kamnitih zrn pa lahko odstranimo vodo z zrn.

Pri tem pa je potrebno upoštevati, da globoka hrapavost površine kamnitih zrn zaradi vključene vode in zraka lahko oteži obvitje z bitumenskim vezivom, se pa zaradi povečane površine pokaže kot koristna.

Zato je v določenih asfaltnih zmesih potrebno zagotoviti čim debelejši film bitumenskega veziva na kamnitih zrnih (npr. pri drobirju z bitumenskim mastiksom in drenažnem asfaltu). Zaradi tega uporabimo kot dodatek mineralna ali druga primerna vlakna, ki stabilizirajo ustrezen film veziva na zrnih [1].

Če torej povzamemo, je za izboljšanje lastnosti asfaltnih zmesi ali sestavin možno uporabiti naslednje dodatke:

- dope za izboljšanje obvitosti kamnitih zrn z bitumnom,
- stabilizatorje bitumna, ki so nosilci veziva predvsem v asfaltnih zmesih z velikim deležem bitumna ali z majhnim deležem peska in polnila ter
- sredstva za regeneracijo bitumenskega veziva.

Seveda je potrebno opozoriti, da morajo biti za uporabo dodatkov zagotovljena natančna navodila proizvajalca.

V splošnem je pri sodobnih izdelkih vse večja tendenca v smeri zmanjšanja porabe energije, zmanjšanje emisije toplogrednih plinov in drugih strupenih snovi ter čimvečje zmožnosti recikliranja obstoječih materialov. Ob tem želimo, da se ne poslabša uporabnost izdelka. Pri asfaltnih zmesih nam vse našete zahteve izpolnjujejo nizko temperaturni dodatki. Najpogosteje uporabljeni dodatki so zeoliti in voski. Zeoliti so hidrirani aluminijevi silikati, ki pri temperaturah 85 °C do 180 °C sproščajo vezano vodo. Po dodajanju zeolita v vročo asfaltno zmes se kontrolirano tvori bitumenska pena, ki izboljšuje vgradljivost asfaltnih zmesi in omogoča izboljšano vgradljivost že pri 88 °C [12], [13].

Voski so pri sobni temperaturi alkeneske nedeformabilne trdne snovi, ki se med 70 °C do 140 °C stalijo v tekočine topne v bitumnu. Pri faznem prehodu voski vmešani v bitumen znižajo viskoznost zmesi ter omogočajo izboljšano vgradljivost asfaltnih zmesi že pri 88 °C. V asfaltnih se uporabljajo dve vrsti voskov: montanski ter parafinski.

V Sloveniji so že poskusno proizvajali in vgrajevali zeolite (Aspha-min® na asfaltni bazi SCT v Smodinovcu) ter parafinske voske (Sasobit® na asfaltnih bazah CP Ljubljana, SCT, CPK in Primorje d.d.), ni pa še prišlo do redne proizvodnje tovrstnih asfaltnih zmesi [12].

Parafinski vosek

Najpogosteje uporabljeni dodatki so zeoliti in sintetični parafini. Posebej parafini zelo izboljšujejo kakovost izdelkov, zato so tudi najpogosteje uporabljeni. Parafinski vosek je najpogosteje uporabljen nizko temperaturni dodatek bitumnu (je sintetični parafin proizvajalca Sasol Wax z imenom Sasobit®). Parafinski vosek je popolnoma topen v bitumnu pri temperaturah, ki so višje od 140 °C in ima tališče okoli 100 °C ter znatno zniža viskoznost bitumnu. Kot osnovni bitumen je priporočljivo uporabljati trše vrste bitumnov ali s polimeri modificirane bitumne. Pri temperaturah pod tališčem pa parafinski vosek poveča odpornost asfaltnih zmesi proti trajnemu preoblikovanju. Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, pa je potrjeno, da parafinski vosek ne vpliva na lastnosti osnovnega bitumna pri temperaturah steklastega prehoda in s tem ne vpliva na pokanje asfaltnih plasti pri nizkih temperaturah [12].

Preizkušena kakovost parafinskega voska omogoča:

- boljše lastnosti za vse asfalte,
- optimalno zgoščenost asfaltnih plasti,
- hitrejšo prepustitev prometa po vgradnji,

- izboljššan oprijem veziva na kamniti agregat in
- asfaltne plasti s posebno visokimi zahtevami glede nosilnosti, odpornosti na goriva in kemikalije.

Topla asfaltna zmes z dodatkom parafinskega voska ima naslednje lastnosti:

- velik potencial – ekološki in trajnosten,
- ni poslabšanja lastnosti ali kakovosti,
- varstvo pri delu in varstvo okolja,
- znižanje emisij CO₂,
- manj hlapov in aerosolov,
- manjša poraba energije,
- počasnejše staranje veziva in
- varovanje strojev in virov.

V odvisnosti od količine dodanega parafinskega voska in uporabljenega veziva se bolj ali manj spremenijo na primer točka zmečkščja po PK, penetracija z iglo ali tudi viskoznost veziva.

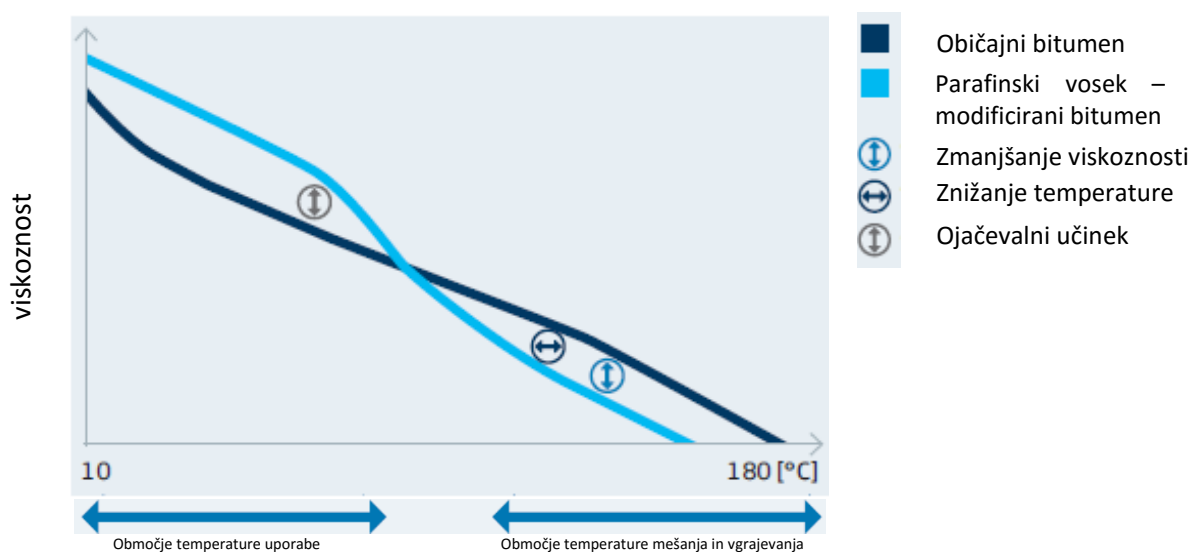
Potrebna količina dodajanja parafinskega voska se določi z laboratorijskimi poskusi (Preglednica 5-2).

Preglednica 2-4: Uporaba in priporočila za doziranje parafinskega voska [61]

Uporaba	Parafinski vosek- Priporočilo za doziranje v masnih % glede na vsebnost veziva							Primeri
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	
Pomoč pri vgradnji								Trdo vezivo Z gumo modificirano vezivo Modificirano vezivo z veliko vsebnostjo polimerov Asfaltne zmesi, ki se težje zgoščajo
Znižanje temperature								Varovanje virov, zaščita okolja Zmanjšanje emisij CO ₂ Prizanašanje strojni opremi Znižanje hlapov/aerosolov Varnost pri delu Zmanjšanje staranja veziva
Varnost postopka/ Minimiranje rizika								Asfaltiranje v slabem vremenu Tanki sloji zanesljivo doseganje zahtevanih stopenj zbitosti Podaljšana življenjska doba Ročna vgradnja
Nosilnost								Hitrejša prepustitev prometu Optimiranje dimenzioniranja Izboljšanje odpornosti na deformacije
Visoko nosilni asfalti								Industrijske in logistične površine Kontejnerski terminali , letališča Zelo obremenjene ceste Avtobusna postajališča Dirkalne steze

Vpliv parafinskega voska na viskoznost bitumna

S parafinskim voskom se lahko temperature proizvodnje in vgradne znižajo do 30 °C, saj je parafinski vosek nad 115 °C povsem topen v bitumnu in znatno zmanjšuje njegovo viskoznost. Zaradi zmanjšane viskoznosti se lahko pri določenih temperaturah asfalt bolje vgrajuje. S tem parafinski vosek povečuje varnost procesa in pomembno zmanjšuje riziko napak pri vgradnji. Šele pod 90 °C tvori parafinski vosek med ohlajevanjem utrjevalno delujočo mrežno strukturo v bitumnu (pogosto navajano tališče pri 100 do 105 °C se nanaša na čisti parafinski vosek). Pri določeni količini dodanega parafinskega voska se signifikantno poveča odpornost na vpliv visokih temperatur, pri tem pa ni negativnih vplivov na odpornost na vpliv nizkih temperatur (Slika 2-2).



Slika 2-2: Krivulji viskoznosti običajnega in s parafinskim voskom modificiranega bitumna

Parafinski vosek ni uvrščen med nevarne snovi po trenutno veljavni evropski zakonodaji. Zato se lahko parafinski vosek uporablja brez dodatnih varnostnih ukrepov.

Kompozitni prah (Kerrock)

Kompozitni prah PMMA/ATH nastaja kot odpadni produkt pri proizvodnji izdelkov iz PMMA/ATH kompozitnega materiala (Kerrock plošče). Osnovno izhodišče raziskave, ki je bila izvedena na Kemijskem inštitutu, je uporaba tega prahu kot materiala pri izdelavi asfaltnih mešanic. Kompozitni prah se lahko uporablja na dva načina in sicer:

- prah PMMA/ATH kot dodatek k polnilu (kamni moki) v asfaltnih zmesih in
- prah PMMA/ATH kot dodatek k bitumnu v asfaltni zmesi [17].

S kompozitnim prahom PMMA/ATH (Kerovit®-om) modificiran asfalt izboljšuje trajnost vozišča.

S kompozitnim prahom PMMA/ATH (Kerovit®-om) modificiran asfalt pomaga pri preprečevanju vzrokov za propadanja asfaltnih plasti, kot so nastanek kolesnic, luščenje bitumenskega filma, nizkotemperaturne razpoke in razpoke zaradi utrujenosti materiala.

Ponavljajoče težke obremenitve povzročijo trajne deformacije na voziščnih površinah, ki se odražajo kot nevarne kolesnice v glavnem v voznem pasu ali na križiščih.

S kompozitnim prahom PMMA/ATH (Kerovit®-om) modificiran asfalt omogoča uporabo bitumnov, ki so manj krhki, a so zaradi dodatkov asfaltne plasti odporni proti tvorbi kolesnic. Izboljšuje obvitost z bitumnom tudi po več ciklih zmrzovanja in tavanja.

Vgrajevalci asfaltov, ki vsebuje kompozitni prah Kerovit®, dosegajo boljšo kakovost asfaltnih plasti in ob tem nimajo nobenih dodatnih težav v primeru slabših vremenskih razmer, prav tako se lahko hitreje vgrajuje in se ne lepi na opremo (lopate, valjarji).

S stroškovnega vidika opreme na asfaltni bazi kot proizvodnji asfaltnih zmesi, za vmešavanje kompozitnega prahu v bitumen ni potrebna nobena posebej draga oprema ali prilagoditev strojnega dela asfaltne baze.

V primerjavi z drugimi dodatki je kompozitni prah PMMA/ATH enakovreden dodatek za povečanje odpornosti asfalta proti tvorjenju kolesnic in razpok, torej enakovreden s polimeri modificiranim asfaltom.

Proizvodnja izboljšane asfalta prinaša dodatno vrednost za izvajalce, uporabnike in lastnike objektov, ter je pogosto primerjalna prednost pri pridobivanju projektov [62].

2.2.2.2 Sekundarne surovine

V fazah drobljenja, frakcioniranja in pridobivanja kamenega materiala na mesto uporabe, se uporabljajo velike količine energije, obenem pa prihaja do dodatnega obremenjevanja okolja v obliki prašnih delcev in toplogrednih plinov. Pri uporabi sekundarnih surovin kot nadomestilu kamenih materialov se lahko izognemo nekaterim problemom, ki so povezani s pridobivanjem ustreznih kamenih materialov. Če ima sekundarna surovina status odpadka, pa se pri njeni uporabi izognemo tudi strošku odlaganja na deponije.

Sekundarne surovine, ki nadomeščajo kamene materiale v asfaltu, morajo biti mehansko in kemijsko stabilne in nestrupene tako pri visokih temperaturah v proizvodnji in pri vgradnji, kot tudi pri najnižjih zimskih temperaturah. Za redno proizvodnjo morajo biti njihove lastnosti, zlasti zrnavost, delež nečistoč in oblika zrn, v zadostni meri enakomerne [5], [7], [16].

Asfaltni granulati (odpadni asfalt in asfaltni rezkanec)

Pri odstranitvi obstoječih asfaltnih plasti se lahko pridobiva asfaltni granulati za ponovno uporabo (recikliranje) in sicer na dva načina: z drobljenjem asfaltne utrditve ali pa z rezkanjem. Z drobljenjem asfaltne utrditve pridobimo asfalt v kosih (Slika 2-3), ki pa so nalomljeni z bagri pri odstranjevanju z vozišča ali pa ostanek večje nevgrajene količine svežega asfalta. Takšen asfalt je neuporaben in ga imenujemo odpadni asfalt, ki ga je pa potrebno obdelati na zeleno granulacijo za nadaljnjo uporabo. Z rezkanjem asfaltne površine pa dobimo asfaltni rezkanec (Slika 2-4), ki ga s posebnimi stroji (rezkalniki) v določeni debelini odrezkamo iz vozišča.



Slika 2-3: Asfalt v kosih, nalomljen z bagri pri odstranjevanju z vozišča [65]



Slika 2-4: Asfaltni rezkanec [66]

Od asfalta v kosih se razlikuje po tem, da se ga lahko uporabi brez dodatne mehanske obdelave, saj so dimenzije zrn do maksimalno 100 mm. Uporabi se ga lahko tudi kot nasipni material. Gradbeni odpadki prenehajo biti odpadki po njihovi predelavi v gradbene proizvode. Zelo pomembno pri nadaljnji uporabi odpadnega asfalta je sortiranje na mestu nastanka pri odstranjevanju odpadnega asfalta z vozišča. Namreč pri lomljenju in nakladanju asfalta na kamion se običajno poleg odpadnega asfalta odstrani tudi določeno količino tamponskega materiala, odpadnega betona (robniki) ipd. Lomi se plasti v celotni debelini, ta pa je lahko sestavljena iz več vrst asfaltnih zmesi. Asfaltne plasti lahko vsebujejo različna kamnita zrna (karbonatna ali silikatna), tudi lahko imajo različne tipe bitumna, kar pa brez laboratorijskega preskušanja ne moremo določiti. Ugotovimo lahko, da je zelo pomembno odpadni asfalt sortirati že na mestu nastanka, tako s stališča nadaljnje uporabe kot tudi s stališča odkupne cene [3].

Predelava odpadnega asfalta v asfaltni granulat poteka z drobljenjem in sejanjem po enakem postopku, kot bogatenje mineralnih surovin. Asfalt v kosih je potrebno v prvi fazi zlomiti na kose, ki niso večji od 500 do 800 mm. Največjo dimenzijo posameznega kosa določa ustje drobilnika. Tako pripravljen asfalt ima enake karakteristike kot rezkan asfalt, zato je nadaljnji postopek predelave popolnoma enak [3].

Pepel z rešetke ali grobi pepel

Grobi pepel ali pepel z rešetke, pada v zgorevalnem delu (rešetka) kurilne naprave. V grobem pepelu in pepelu z rešetke se poleg trdnih ostankov zgorevanja nahajajo tudi mineralne nečistoče goriv, kot so pesek, prst ali kamen. To vrsto sekundarne surovine lahko najdemo oziroma pridobimo v Sloveniji na primer v Toplarni Celje, kjer poteka termična obdelava odpadkov, ki so predhodno obdelani v napravi za mehansko in biološko obdelavo.. Gre za to, da se komunalni odpadki, ki predhodno niso zbrani ločeno, ampak pomešani z različnimi vrstami odpadkov, tako obdelajo, da se loči lahka frakcija (predstavljajo jo papir, karton, plastika, folije, tekstil in les), le-to pa se nato pripelje do tovarne, kjer se jo uporabi za pokrivanje energetskih potreb (toplota in električna energija). Cilj delovanja takšne kurilne naprave oziroma tovarne je predvsem zmanjšati vplive na okolje. Bistveno pri tem je, da se zmanjša količina odloženih odpadkov, pri tem pa se izkorišča energija, vezana v gorljivi frakciji odpadkov. V takšnem procesu (konkretno v Toplarni Celje) vstopa na letni ravni okoli 20.000 ton predhodno mehansko in biološko obdelanih odpadkov in 5000 ton blata (mulja) iz čistilne naprave (Celje), izstopa pa približno 2200 ton pepela in žindre izpod rešetke ter letečega pepela. Pepel z rešetke predstavlja nenevaren odpadek, medtem ko slednji-leteči pepel pa predstavlja nevaren odpadek.

V proizvodnji asfaltnih zmesi je zanimiv in uporaben predvsem pepel z rešetke, saj kot nenevaren odpadek predstavlja sekundarno surovino, ki jo je mogoče uporabiti v proizvodnji asfaltnih zmesi ter tako nadomestiti manjši delež trdne oziroma kamnite frakcije v sestavi asfaltnih zmesi.

Prezem ogorkov in žindre izpod rešetke s klasifikacijsko številko odpadka 19 01 12 (nenevaren odpadek) se vrši z namenskimi zaprtimi kontejnerji, katere prevzame pooblaščen prevzemnik odpadkov. Odpadek se odloži na odlagališču kot nenevaren odpadek. Glede na opravljene analize odpadka ni potrebna kakršna koli stabilizacija pred deponiranjem, zato se pepel odlaga direktno na deponijo.

V okviru študija uporabnosti pepela z rešetke iz Toplarne Celje (TC) smo se odločili, da bomo poskusno uporabili ta pepel kot sestavino asfaltnih zmesi. V Toplarni Celje pri sežigu lahkih frakcij komunalnih odpadkov in blata iz čistilne naprave nastajata dve vrsti pepelov in sicer pepel z rešetke (eng. Bottom Ash BA), ki je kategoriziran kot nenevarni odpadek in leteči pepel (Fly Ash FA), ki je kategoriziran kot nevaren odpadek. Ocenjuje se, da bo ob normalnem obratovanju v TC letno nastalo do 4000t BA in do 500t FA. V interesu upravljalca Toplarne Celje je, da se poiščejo možne aplikacije za oba odpadka in se s tem zmanjša količina materiala, ki ja je potrebno trajno odlagati na ustrezni deponiji. Pri preverjanju materiala za nadomeščanje kamenega materiala v asfaltni zmesi, moramo najprej preveriti preproste volumske in mehanske lastnosti materiala [5], [16].

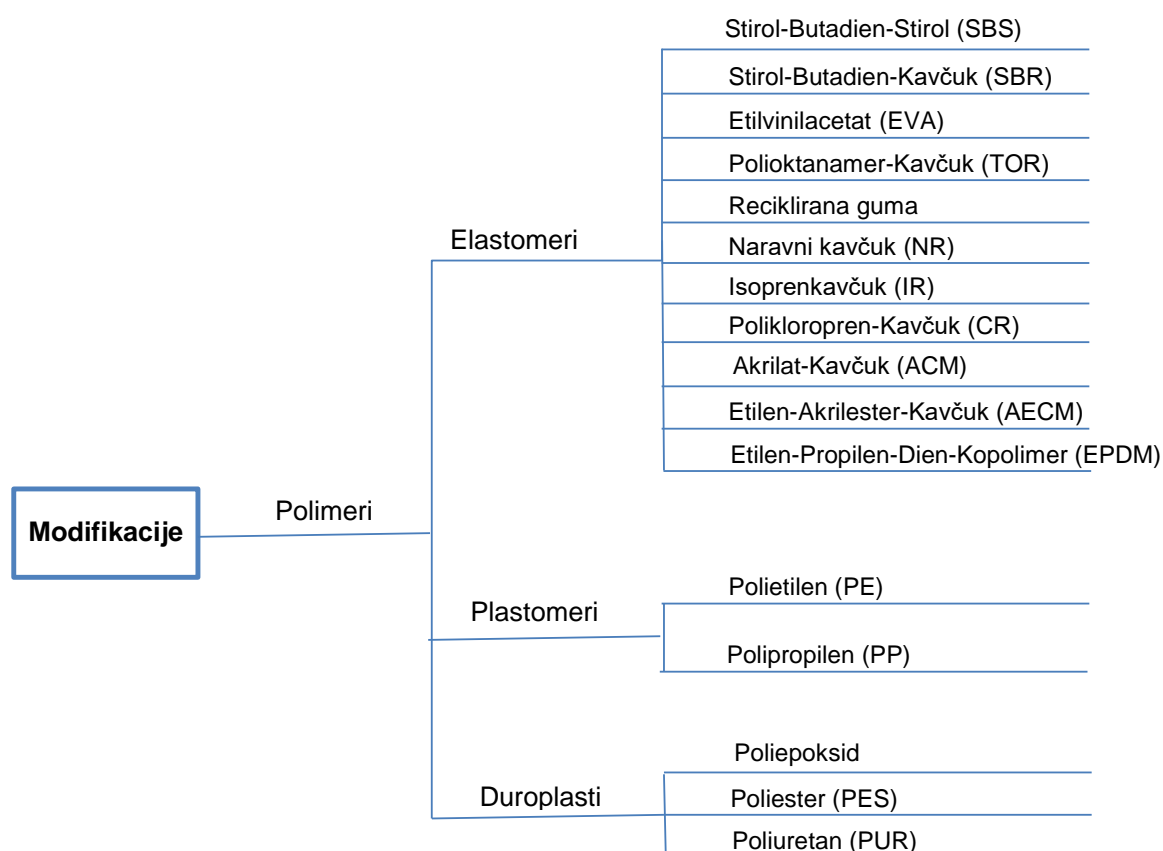
Z laboratorijskimi preiskavami smo ugotovili, da je pepel z rešetke Toplarne Celje uporaben kot dodatek k polnilu asfaltne zmesi. V laboratoriju smo pripravili predhodno sestavo za asfaltno obrabno-zaporno plast AC 8 surf B50/70 A4 s približno 2% BA pepela, ki izpolnjuje zahteve slovenskih standardov [5], [16]. Potrebno pa se je zavedati, da bomo šele z izvedbo testne proizvodnje asfaltnih zmesi in vgradnje asfaltne plasti, ki vsebuje BA pepel lahko popolnoma preverili ustreznost te sekundarne surovine. Glede na predvideno trajnost asfaltnih plasti, bomo z opazovanjem obnašanja materiala vgrajenega na testnem polju šele v nekaj letih lahko dokončno ovrednotili primernost uporabe BA pepela v asfaltnih zmesih [5], [7], [16].

Odpadne gume

Velik okoljski problem predstavljajo izrabljene oziroma odpadne avtomobilске gume, tako v Sloveniji, kot tudi drugod po svetu. Manjši delež teh odpadnih gum se predela ali pa uporabi kot kurivo npr. v cementni industriji, vendar pa jih veliko konča na črnih odlagališčih v naravi. Iz podatka evropskega združenja za recikliranje gum (ETRA-The european tire recycling asociaation) je razvidno, da nepredelanih pnevmatik (gum) ostane kar 23 %. V Sloveniji se v zadnjih letih predela približno po 21.000 ton avtomobilskih pnevmatik na leto. Tako je eden izmed okolju prijaznih postopkov drobljenje gum v delce, ki jih uporabimo za modifikacijo bitumna, s katerim proizvajamo bituminizirane zmesi (asfaltne zmesi), katerim se na ta način izboljšajo številne lastnosti. Iz tega izhajamo, da lahko predelane odpadne pnevmatike (gume) uporabimo tudi kot sekundarne surovine pri proizvodnji asfaltnih zmesi. To pomeni okolju prijazno rešitev za velike količine zbranih odpadnih gum po svetu, kot tudi razvoj tehnologije proizvodnje gumiranih asfaltov v obrabno zapornih asfaltnih plasteh ter izboljšanje lastnosti z dodano gumo proizvedenih asfaltnih zmesi [59].

V proizvodnji asfaltnih zmesi, se uporabljeni bitumni, kot vhodna surovina v sestavi asfaltnih zmesi modificirajo z različnimi polimeri (Slika 2-5) , da bi s tem dosegli [9]:

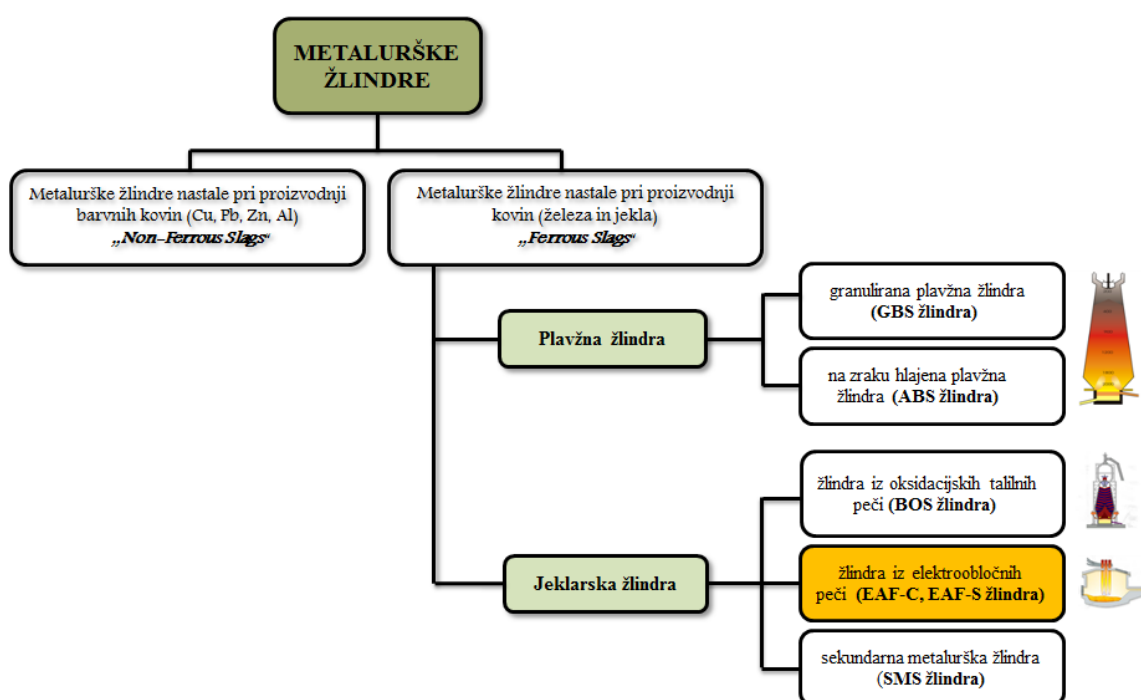
- boljšo obstojnost na visoke temperature,
- boljši oprijem (obvitost) bitumna z zrni kamene frakcije,
- boljšo kohezijo,
- večjo odpornost na nizke temperature,
- boljšo odpornost proti utrujanju materiala.



Slika 2-5: Na trgu razpoložljivi bitumni modificirani s polimeri [9]

Žindra

Črna žindra je material, ki je s stališča uporabe eden med najpomembnejšimi odpadki v gradbeništvu. Zato črno žindro uvrščamo med industrijske odpadke v gradbeništvu, katere potreba po uporabi narašča. Industrijski odpadki nastajajo v proizvodnih procesih industrije in če znamo izkoristiti vsa naša znanja in vedenja o ravnanju z njimi, njihovi predelavi in možnostih ponovne uporabe, lahko beseda odpadke izgubi negativno konotacijo in postane uporaben vir surovin. Iz tega vidika lahko tudi črno žindro uvrstimo med sekundarne surovine in jo uporabimo kot alternativni vhodni material pri sestavi asfaltnih zmesi, oziroma kot nadomestek deleža vhodnega materiala (zmesi kamenih zrn) pri proizvodnji vročih asfaltnih zmesi.



Slika 2-6: Delitev metalurških žindrer glede na izvor [19]

V odvisnosti od procesa v elektroobločni peči nastajata dve vrsti žindrer, ki se med seboj ločita po kemijskih, mineraloških in fizikalnih lastnostih (Slika 2-6). Količinsko največ je EAF-C žindre («Electric Arc Furnace Slag from Carbon Steel production»), to je žindre, ki nastaja pri proizvodnji ogljikovih nelegiranih jekel. Gledano s stališča kakovosti, uporabnosti in razpoložljive tehnologije je ta v gradbeništvu najbolj perspektivna, laično pa je imenovana »črna jeklarska žindra«.

Kakovost kamnitega materiala iz črne žindre je odvisna od:

- ravnanja z žindro po izlitju pod elektroobločno pečjo, ki mora vključevati ustrezno obdelavo in začasno deponiranje, da se material ustrezno stabilizira ter
- proces predelave, ki vključuje dve fazi drobljenja, odstranjevanje železa in separiranje v frakcije kamnitega materiala.

Postopek pridobivanja kamnega materiala iz žindre je zelo podoben postopku pridobivanja kamnitega materiala iz naravnih kamnin, kjer sta potrebni dve fazi drobljenja, razlika je le v tem, da gre žindra dodatno skozi proces magnetne separacije, kjer se v dveh stopnjah izloči železo. Drobljeni material se nato na standardnih sitih preseje v nazivne frakcije različnih

velikosti. Kameni material iz črne jeklarske žindre je material naravnega izvora, pripravljen v industrijskem procesu, pod vplivom toplotnih in/ali drugačnih sprememb, zato po veljavni terminologiji sodi med umetne kamene materiale.

V splošnem velja, da so lastnosti kamenega materiala iz jeklarske žindre primerljive z lastnostmi najbolj kakovostnih naravnih materialov, za nekatere posebne primere uporabe pa izkazuje kameni material iz črne jeklarske žindre v primerjavi z naravnim celo boljše lastnosti. V fizikalnih, kemijskih in mineraloških lastnosti med jeklarskimi žindrami lahko prihaja do malenkostnih razlik, ki pa so v glavnem odvisne od: variacije proizvedenega procesa v peči, načina manipulacije s tekočo žindro in postopka staranja, načina predelave v kameni material [19].

Livarski pesek

Livarna je proizvodni obrat, ki proizvaja kovinske odlitke, z vlivanjem staljene kovine v preoblikovane kalupe.

Livarski presek je visoko kvaliteten kremenčev pesek, ki je stranski produkt pri proizvodnji kovinskih odlitkov. Kakovost livarskega peska zavisi v veliki meri od načina - tipa vlivanja odlitkov ter od proizvodnega sektorja iz katerega izvira.

Livarne nabavljajo visoko kvaliteten kremenčev pesek za modeliranje kalupov v katere vlivajo različne kovinske odlitke v njihovem proizvodnem procesu. Uporablja se kot sestavni material za izdelavo kalupov. Takšen pesek je višje kvalitete kot tipičen naravni pesek, pridobljen iz naravnega vira (kamnoloma, separacije). Takšnemu pesku po navadi dodajo manjše količine bentonitne gline, da izboljšajo njegove vezne lastnosti. Ko se v izdelan model-kalup vlije taljena kovina-odlitek, se kalup razbije ter tako izloči samo kovinski odlitek. Ostanek kalupa-pesek se lahko na takšen način uporabi večkrat. Sčasoma, pa se takšen recikliran pesek razgradi do te mere, da ga ni več mogoče ponovno uporabiti. Tako se iz proizvodnega procesa umakne kot stranski produkt, za nadaljnjo proizvodnjo pa se iz novega peska ponovno sestavijo novi kalupi in cikel proizvodnje odlitkov iz taljenih kovin se ponovi [11].

Livarski pesek se proizvaja v petih različnih livarskih kategorijah-razredih. Železne livarne (»gray iron«-sivo jeklo, »ductile iron« in železo) proizvedejo največ peska. Livarne z aluminijem, bronom, bakrom, medenino in bronom proizvedejo preostanek.

Vrste livarskega peska

Poznamo dve vrsti livarskega peska, in sicer:

- »zeleni pesek«, ki ga uporabljamo za modeliranje kalupov in vsebuje bentonitno glino kot vezno sredstvo in
- »kemično vezan pesek«, ki vsebuje polimere kot vezivo ter veže zrna peska skupaj. Kemična sestava peska je odvisna od obdelave v livarni, predvsem v smislu, na katero kovino se obdelava peska nanaša.

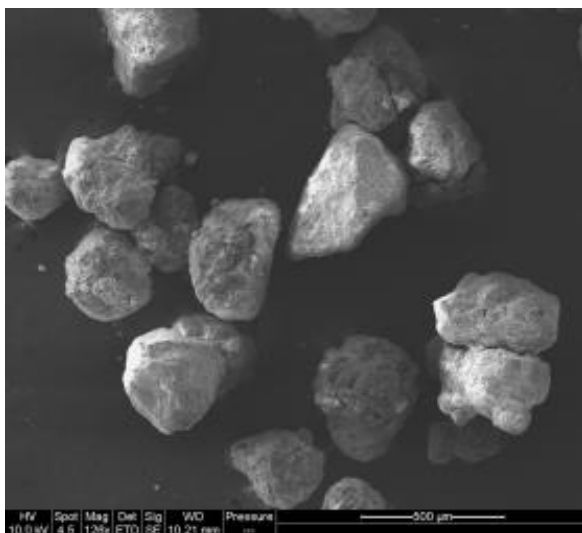
Zeleni pesek sestavlja 85-95 % silicijevega dioksida, 0-12 % gline (bentonita), 2-10 % ogljikovih aditivov in 2-5 % vode. Zeleni pesek je najpogosteje uporabljen material v livarnah, kajti odporen je na zelo visoke temperature, vsebnost gline pa povezuje zrna peska med seboj. Vsebnost vode v pesku pa mu dodaja plastičnost. Količina dodane gline-bentonita je odvisna od načina in postopka obdelave. Ogljikovi aditivi v pesku pa preprečujejo prežganost

lite površine peska-kalupa pri visokih temperaturah, ko le-ta pride v stik z tekočo kovino-odlitkom. V zelenih livarskih peskih pa tudi zasledimo kemične spojine, kot so MgO, K₂O in TiO₂.

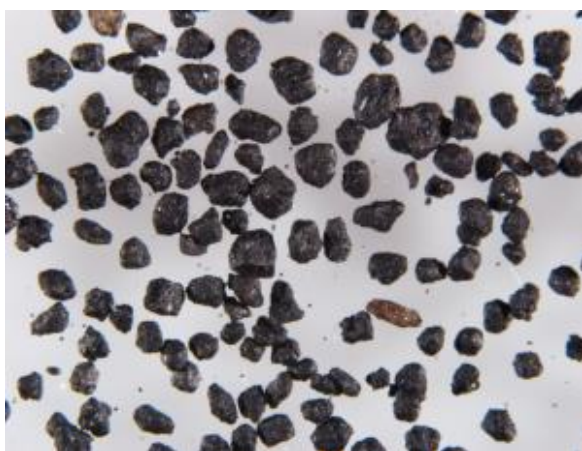
Kemično vezan pesek sestavlja 93-99 % silicijeva dioksida ter 1-3 % kemičnega veziva. Kremenčev pesek temeljito pomešamo s kemijskimi sredstvi, ki reagirajo tako, da sprožijo reakcijo, ki strdi maso. V livarski industriji se uporablja več različnih kemijskih dodatkov. Najpogostejša uporabljena kemijska sredstva so fenolni uretani, epoksi smole in natrijevi silikati [11].

V magistrski nalogi smo za postopek preskušanja ter ugotavljanja vpliva vezane vode v bentonitni glini v livarskem pesku uporabili tako imenovani »zeleni pesek«, ki vsebuje bentonitno glino.

Na slikah 2-7 in 2-8 je prikazan izgled livarskega peska brez dodatkov pod mikroskopom v povečavah 126x, 75x in 30x, medtem ko je livarski pesek z bentonitom prikazan na sliki 2-9.



Slika 2-7: Livarski pesek pod mikroskopom.brez bentonita (126 x povečava)

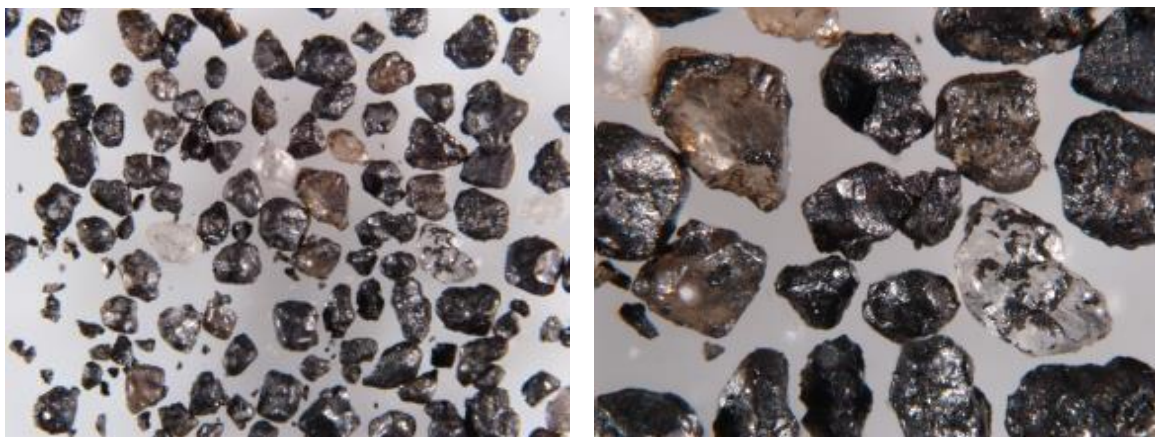


a)



b)

Slika 2-8: Livarski pesek pod mikroskopom.brez bentonita: a) 30x povečava b) 75x povečava – EFI



a)

b)

Slika 2-9: Livarski pesek pod mikroskopom z betonitom: a) 30x povečava b) 75x povečava – EFI

Sam bentonit je alumosilikatna glina, sestavljena iz koloidnih in plastičnih glin, pretežno iz minerala montmorilonita (do 70 % celotne sestave), ki spada v skupino smektita. Poleg montmorilonita se v bentonitu nahajajo tudi glineni delci, biotit, kaolinit, ilit, piroksen, cirkon in kristalni kvarc. Naziv bentonit je dobil po kraju Fort Benton iz zvezne države Wyoming, kjer je prvič najden. Glina ima široko uporabnost, zato je tudi dobila naziv »glina tisočerih uporabnosti«.

Kemijska formula betonita je: $(Mg, Al)_2[(OH)_2Si_2O_{10}](Na, Ca)_x nH_2O$

Bentonit v naravi nastane s spremembami piroklastičnih sten, najpogosteje vitroklastičnih tufov ali kristalno-klastičnih-vitroklastičnih lapilnih tufov. Sprememba vulkanskega pepela v bentonit je mogoča pretežno v vodi (v morski vodi, verjetno alkalskih jezerih, mogoča pa je tudi v sveži vodi). Tako lahko rečemo, da je bentonit nastal s hidrotermalnim procesom. Proces nastajanja bentonita in izguba skupne mase je v veliki meri odvisna od protolita. Tako za andezitne materiale izguba mase znaša 12-12 %, za riolitne materiale pa je izguba mase večja od 50 % od začetnega stanja. Bentonit nastal iz vulkanskega pepela tvori ležišča slojev enake debeline (od nekaj milimetrov pa tudi do 15 metrov).

Vrste bentonita

Z industrijskega vidika pa bentonite uvrščamo v dva glavna razreda, in sicer:

1. Natrijev bentonit:

- se uporablja v livarstvu,
- se dobro veže s peskom,
- se uporablja kot zmes za tesnjenje vrtin-izkopov,
- za proizvodnjo tesnilnih mešanic in
- se uporablja tudi v medicini, kozmetiki ...

2. Kalcijev bentonit:

- adsorbira ione v raztopinah,
- z izmenjavo ionov lahko preide v Na-bentonit z dodajanjem natrijeve soli,
- je najstarejše sredstvo za čiščenje,
- zaradi lastnosti adsorpcije veže nase olja in maščobe,
- lastnosti, kot so: viskoznost in suspenzija v prehodu v Na-bentonit ostanejo iste in
- uporablja se tudi kot pesek za mačja stranišča ...

Ime sta dobila po prevladujočih kemijskih elementih v njihovi kemijski sestavi.

Lastnosti bentonita

Bentonit je na otip masten, blede zelene barve, če pa je površinsko izpostavljen, pa je lahko tudi rumene, rdeče ali sive barve.

Za bentonit so značilne nekatere lastnosti, kot so:

- v stiku z vodo se obnaša tiksotropno oziroma se spremeni v gel
- lahko absorbira 12 do 15 kratno količino vode, v primerjavi z njegovo suho maso
- dobre koloidne lastnosti
- ima zelo visoko izmenjavo kapacitete kationov [60].

Livarski pesek v vročih asfaltnih zmesih

Asfalt je najbolj razširjen ter uporabljen material za gradnjo cest v Ameriki, Evropi in drugod po svetu. Podatki kažejo, da je v svetu več kot 90% vseh vozniških površin zgrajenih iz asfalta, proizvedenega po vročem postopku, torej iz vroče proizvedenih asfaltnih mešanic, vgrajenih v vozne površine cest.

Livarski pesek je uspešno uporabljen v proizvodnji vročih asfaltnih zmesi kot sekundarna surovina oziroma kot nadomestek deleža finih frakcij v mešanici kamenih frakcij asfaltne mešanice. Študije kažejo, da je mogoče nadomestiti med 8 do 25 % fine frakcije v kameni mešanici asfaltnih zmesi. Tako je livarski pesek alternativna in nadomestna surovina za proizvodnjo vročih asfaltnih mešanic v manjšem deležu kamene sestave.

V državi US Wisconsin proizvedejo 15 milijonov ton asfaltne zmesi letno in od tega je samo v korporaciji Wisconsin Builder Association proizvedenih 3 do 4 milijone ton vročih asfaltnih zmesi letno. Preostanek je proizveden in uporabljen za druge naročnike oziroma odjemalce. Delež kamenih materialov zavzema med 94 do 96 odstotkov mase v sestavi asfaltnih zmesi. In v odvisnosti od projektirane sestave asfaltnih zmesi predstavlja velikostni razred deleža livarskih peskov v asfaltnih zmesih med 15 in 30 % celokupne mase kamenega materiala. Tako je v omenjenem primeru samo za državne potrebe uporabljenih vročih asfaltnih zmesi z dodanim livarskim peskom, potencialni masni delež odpadnega livarskega peska med 600.000 in 700.000 tonami letno. Študija je bila osredotočena na izbor odpadnega livarskega peska (»waste foundry sand«) proizvedenega v državi Wisconsin ter na meritve mehansko-fizikalnih lastnosti, ki so pomembne in kritične pri uporabi vročih asfaltnih zmesi. Izbira, uporaba in določitev količin odpadnih livarskih peskov v vročih asfaltnih zmesih, pa zavisi tudi od zahtev ter določil lokalnih in nacionalnih standardov za vsako državo ali področje posebej [14].

Proizvodnja vročih asfaltnih zmesi zahteva, da so vhodni materiali ter s tem tudi uporabljen livarski pesek:

- kvalitetni in imajo dobre mehansko-fizikalne lastnosti,
- da so okolju prijazni ter neškodljivi,
- da je njihova proizvodnja nadzorovana in spremljana kvaliteta in
- da je ekonomsko upravičen in primerljiv s podobnimi materiali, ki se uporabljajo za isti namen.

Livarski peski večinoma predstavljajo finejšo frakcijo materiala, odvisno od načina proizvodnje in namena uporabe v livarnah.

Pomembno pri proizvodnji livarskega peska je laboratorijsko preskušanje le-tega ter ugotavljanje skladnosti z zahtevami vhodnih materialov za proizvodnje asfaltnih zmesi.

Zato je potrebno spremljati granulometrijsko sestavo pri proizvodnji livarskih peskov, kot tudi druge lastnosti, kot je npr. delež glinenih delcev v njih (posebno pri zelenem livarskem pesku, ki vsebuje bentonitno glino), saj je odstotek deleža glinenih delcev v kamenih frakcijah omejen oziroma predpisan z zahtevami standardov.

Iz tega razloga je potrebno sprotno spremljanje lastnosti livarskega peska, saj je posledično od tega odvisen masni odstotek uporabljenega livarskega peska v proizvodnji vročih asfaltnih zmesi.

Po raziskavah na univerzi University of Wisconsin at Madison je bilo ugotovljeno, da je metoda »ekvivalent peska« za ugotavljanje organskih primesi v livarskem pesku manj primerna od metode »metilen modro«, ki se prav-tako uporablja za določanje organskih primesi v livarskem pesku [4].

Javed in sodelavci [15] so raziskovali možnosti uporabe odpadnih livarskih peskov iz različnih livarn v US Indiani v vročih asfaltnih zmesih. Večina zelenih odpadnih livarskih peskov je bilo uporabljenih pri litju surovega železa, ostali odpadni peski pa so v procesu modeliranja kemijsko vezani. Delež livarskega peska v vročih asfaltnih zmesih, uporabljenega kot nadomestek deleža finega kamenega materiala, je bil ugotovljen še kot ustrezen v dodanih količinah do 15 % kot zamenjava s konvencionalnim finim agregatom.

Zaključki, kot rezultati izvedenih preiskav so bili naslednji:

- Če uporabimo do 15 % odpadnega livarskega peska in ga zmešamo z običajnim kamenim materialom, se lastnosti asfaltne zmesi ne razlikujejo bistveno od lastnosti, če bi zamešali asfaltno zmes samo z običajnim kamenim materialom. Uporaba odpadnega livarskega peska, katerega delež je večji od 15 % v asfaltni zmesi, pa se odraža v nizki deformaciji in visoki vrednosti zračnih votlin, kar vodi do krhkosti asfaltne zmesi in posledično prezgodnjim razpokam.
- Povečanje hrapavosti z mešanjem povečane vsebnosti odpadnega livarskega peska (»Waste Foundry sand«) je neznatno v primerjavi z odmikom od gradacije.
- Z nekaj izjemami je odpadni livarski pesek iz različnih livarn v Indiani zelo podobne gradacije, velikosti in teksture.
- Grude v odpadnem livarskem pesku lahko predstavljajo problem, ki zahtevajo pred uporabo posebno obdelavo ali pranje.
- Odpadni livarski pesek je primeren za omejeno uporabo oziroma mešanje z klasičnimi kamenimi materiali v asfaltnih zmesih [15].

Tudi Federal Highway Administration je raziskoval uporabo livarskega peska v vročih asfaltnih zmesih in poroča, da se je v US leta 2004 vgradilo tovrstne vroče asfaltne zmesi (»asphalt concrete«) v več kot 2 milijona cest, računajoč preko 94 % vseh cest. Reciklirani livarski pesek je uspešno uporabljen kot delno nadomestilo za kamene materiale v vroči asfaltni zmesi v državi Pensilvanija, Michigan in Tennessee. Pensilvanija DOT (»department of transport«) uporablja 8 do 10 % livarskega peska v asfaltnih zmesih. Nek asfaltni proizvajalec v državi Michigan nadomešča konvencionalne agregate v asfaltni zmesi z 10 do 20 % recikliranega livarskega peska. V Tennesseeju poročajo, da se asfaltne zmesi z 10 %

livarskega peska zgoščujejo bolje kot vroče asfaltni zmesi, ki vsebuje opran rečni pesek. Proizvajalec asfaltnih zmesi v Ontariju, Canada uporablja livarski pesek že od leta 1994. »Superpave performance« test Wisconsin najde pozitivne potenciale pri uporabi recikliranega livarskega peska. V glavnem je stabilnost zmesi z recikliranim livarskim peskom višja kot pri vročih asfaltnih zmesih brez uporabljenega dodanega livarskega peska, oziroma proizvedenih samo z navadnim kamenim materialom (peskom). Odpornost na vlago je višja in nekatere zmesi kažejo celo povečanje odpornosti na nastanek kolesnic [18].

Izbira livarskega peska za magistrsko nalogo

Proizvodnja vročih asfaltnih zmesi v svetu in tudi v Sloveniji poteka z okolju prijaznimi smernicami. Težnja vsake proizvodnje, tako tudi proizvodnje vročih asfaltnih zmesi je čim manjša obremenitev okolja s škodljivimi emisijami, uporaba čistih ter okolju neškodljivih materialov s čim manjšimi proizvodnimi stroški. Z uporabo livarskega peska v proizvodnji asfaltnih zmesih bi dosegli naslednje cilje:

- livarski pesek, ki ima status odpadka, spremeni status v sekundarno surovino, ter tako razbremeni okolje, ki bi ga obremenjeval kot odpadek na deponiji.
- kot sekundarna surovina nadomesti odstotek vhodne kamene frakcije v sestavi asfaltni zmesi ter s tem zmanjša strošek vhodne surovine (kamenega materiala).
- zaradi vsebnosti bentonitne gline, ki ima vezano še aktivno vodo, lahko proizvodnja vročih asfaltnih zmesi poteka pri nižji temperaturi mešanja in s tem se zmanjša poraba energije za segrevanje vhodnih materialov v bobnu asfaltni baze.
- zaradi istega efekta, se vroča asfaltna zmes lahko vgrajuje pri nižji temperaturi kot običajno, kajti zmanjša se odpornost proti zgoščevanju asfaltni zmesi, pri tem pa se tudi porabi manj energije zbivanja ter s tem zmanjša obremenjevanje okolja.

Zato smo se v magistrski nalogi odločili uporabiti »zeleni livarski pesek«, torej livarski pesek z dodanim bentonitom, da bi z laboratorijskimi preiskavami dokazali ali pa ovrgli zgoraj našete prednosti uporabe livarskega peska v vroči asfaltni zmesi.

3 TEORETIČNE OSNOVE PREISKAV

3.1 Vhodni materiali

3.1.1 Kameni agregat

3.1.1.1 Granulometrijska sestava

Z preiskavo vzorca zmesi zrn kamenega materiala po SIST EN 933-1 [25], ugotovimo njegovo točno sestavo in ustreznost. Pomembna pri celotnem postopku pridobivanja je enakomernost sestave zmesi kamenih zrn. Pri premikanju, nakladanju, skladiščenju, razkladanju in razgrinjanju zmesi kamenih zrn zmeraj obstaja možnost segregacije. Pomemben je odvzem vzorca zmesi kamenih zrn, zato se odvzem vzorca iz večje količine zmesi zrn izvrši s t.i. četverjenjem. Za določitev deleža posameznih razredov zrn v zmesi zrn se uporabljata dva postopa in sicer:

- areometriranje za drobna zrna (velikosti do 0,063mm),
- suho in mokro sejanje za večja zrna.

Postopek preiskave z aremetriranjem (po Casagrandeju) temelji na različni hitrosti tonjenja zrn različnega premera v tekočini po Stokesovem zakonu. Velikost presejnega zrna pri določanju sestave zmesi zrn s sejanjem je opredeljena kot dolžina stranice (kvadratne) tiste odprtine sita, skozi katero zrno ravno še gre. Najmanjša potrebna količina zmesi zrn za sejanje je odvisna od velikosti zrna v zmesi.

Pri suhem sejanju mora biti zmes kamenih zrn predhodno primerno posušena, uporabi se termostat, ki zmes kamenih zrn segreje do 100 °C do konstantne teže, nato se ohladi do sobne temperature pred samim sejanjem. Sejanje se izvaja s stresalnikom.

Sestavo zmesi zrn pri katerih pa se lahko drobna zrna med sušenjem zlepijo med seboj, pa določimo z mokrim sejanjem. Vzorec zmesi zrn spiramo z vodo na sitih in jo lovimo. Z izparevanjem te vode ugotovimo delež zrn velikosti 0,063 mm v zmesi. Ta delež zrn pa se lahko določimo tudi iz razlike mas zrn pred in po izpiranju.

Krivuljo sestave zmesi zrn določimo tako, da ostanke na posameznih sitih stehtamo in zaporedno seštejemo po velikosti sit do najmanjšega navzgor. Presejna krivulja je vsotna krivulja presejkov t.j. razredov zmesi zrn. Praviloma jo prikažemo tudi grafično v ustreznem diagramu [25].

3.1.2 Kamena moka in livarski pesek

3.1.2.1 Določevanje prostorninske mase zrn kamene moke - Postopek s piknometrom

Metoda s piknometrom je zelo poznana metoda za določanje prostornine nepravilno oblikovanih vzorcev.

Prostorninsko maso zrn kamene moke določamo skladno s standardom SIST EN 1097-7 [40]. Preskus določanja največje gostote s piknometrom je sestavljen in dveh delov:

- priprave testnega vzorca in
- določanja največje gostote po enačbi 3.1:

$$\rho_f = \left(1 - \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_1}} \right) \quad (3.1)$$

Kjer je: ρ_f -gostota polnila pri 25°C v (Mg/m³), m_0 -masa praznega piknometra z glavo piknometra (g), m_1 -masa piknometra+masa polnila (g), m_2 -masa piknometra z glavo piknometra+masa polnila+voda (g), V-volumen piknometra (ml), ρ_1 -gostota vode pri 25 °C (Mg/m³).

Rezultat največje gostote polnila podamo kot srednjo vrednost treh določanj zaokroženo na 0,01 Mg/m³.

3.1.2.2 Določevanje votlin v suho zbiti kamni moki

Standard SIST EN 1097-4 [41] podaja postopek za določevanje votlin v suho zbiti kamni moki z aparatom za zgoščevanje po Rigdeniu.

Preskus določanja vsebnosti votlin v suho zbitem polnilu je sestavljen iz:

- priprave testnega vzorca,
- določanja največje gostote in
- določanja vsebnosti votlin po enačbi 3.2.

$$V = \left(1 - \frac{4 \cdot 10^3 \cdot m_2}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho_f \cdot h} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

Kjer je: V-vsebnost votlin (%), m_2 -masa zgoščenega polnila (g), α -notranji premer valja padajočega bloka, ρ_f -največja gostota polnila (Mg/m³), h-višina zgoščenega polnila (mm).

Rezultat preskusa se poda kot srednja vrednost treh določanj vsebnosti votlin zaokrožen na 1%.

3.1.2.3 Delta preskus prstan-kroglica

Delta preskus prstan-kroglica se določa v skladu s standardom SIST EN 13179-1 [42]. In opisuje postopek za določitev utrditvenega učinka polnila, ko je ta pomešan z bitumnom. Ugotavlja se povečanje zmehčišča v zmesi bitumen/polnilo s sestavo 37,5 volumskih delov polnila in 62,5 volumskih delov bitumna ter razliko z zmehčiščem čistega bitumna, ki je uporabljen v tej zmesi.

Sam postopek Delta prstan-kroglica je sestavljen iz petih delov:

- priprave testnega vzorca polnila,
- določanje največje gostote polnila,
- priprave posameznega vzorca,
- določanja PK bitumna ter zmesi bitumna in polnila,
- določanje delta prstan-kroglica $\Delta_{R\&B}$

Delta prstan-kroglica $\Delta_{R\&B}$ izračunamo kot razliko med srednjima vrednostma točke zmečkščiča ($PK_{polnilo+bitumen} - PK_{bitumen}$).

3.1.3 Bitumen

3.1.3.1 Določanje zmečkščiča po metodi prstan kroglica (PK)

Lastnosti bitumna pri visokih temperaturah ovrednotimo po metodi prstan-kroglica (PK), ki jo določa standard SIST EN 1427 [43] in z njo določimo njegovo zmečkščiče, ki predstavlja zgornjo mejo elastične viskoznosti bitumna. S preskusom določimo temperaturo, pri kateri bitumen doseže neko specifično konsistenco. Temperatura se v literaturi označuje s $T_{R\&B}$ (Ring and Ball) oziroma s T_{PK} .

Za določitev temperature zmečkščiča se uporablja avtomatska ali ročna naprava PK, pri čemer ročne niso več v pogosti uporabi, saj je težko zadeti ustrezen prirastek temperature na minuto, kot to zahteva standard, zato se v večini primerov uporabljajo avtomatske naprave, ki so enostavnejše za uporabo in tudi bolj točne.

3.1.3.2 Določevanje penetracije z iglo

Ena najosnovnejših preiskav bitumna je določitev globine prodiranja igle pri 25 °C (Pen), do katere se ugrezne standardizirana igla pod standardizirano težo v bitumen, ki je temperiran na 25 °C. Teža igle je 100 g, čas obtežbe igle pa 5 sekund. Metodo določevanja penetracije z iglo določa standard SIST EN 1426 [44].

Rezultati se podajajo v enotah penetracije, pri čemer predstavlja ena enota 0,1 mm (1 mm/10) in odraža globino, do katere se igla vtisne. Penetracija 75 pomeni, da se je igla pri petih poizkusih v povprečju vtisnila za 7,5 mm v preiskovani bitumen. Interpretacija rezultatov je preprosta – večja kot je penetracija, mehkejši je bitumen pri sobni temperaturi.

3.2 Asfaltne zmesi

3.2.1 Topni delež veziva

Postopek določanja topnega deleža veziva opredeljuje standard SIST EN 12697-1 [45], kjer so opisani postopki za kontrolo kakovosti pri proizvodnji asfaltnih zmesi in kontrolo skladnosti s produktnimi zahtevami. Skupno je opisanih 7 postopkov, v katerih je zajeta:

- ekstrakcija veziva s spiranjem z vročim ali hladnim topilom,
- ponovna pridobitev zmesi kamnitih zrn iz raztopljenega veziva,
- določitev deleža veziva s postopkom razlike ali ponovna pridobitev veziva in
- izračun deleža topnega veziva.

3.2.2 Ugotavljanje deleža veziva: rotacijski uparjalnik

Standard SIST EN 12697-3 [46] opisuje postopek, kako se vezivo loči od vzorca s topilom in ponovno pridobi z vakuumsko destilacijo s pomočjo rotacijskega uparjalnika.

3.2.3 Ugotavljanje največje gostote

Preskus, ki se izvaja skladno s standardom SIST EN 12697-5 [47] zajema tri postopke za ugotavljanje največje gostote asfalta (brez zračnih votlin): prostorninski, vzgonski in računski postopek. Preskušamo lahko svežo ali pa že vgrajeno asfaltno zmes. V slednjem primeru se vzorci razgradijo v laboratoriju. Pri prostorninskem in vzgonskem postopku pa se gostota določi iz suhe mase vzorca in iz njegove prostornine brez votlin. Pri prostorninskem postopku pa se prostornina določi s težo izpodrinjene tekočine v piknometru. Pri vzgonskem postopku se prostornina vzorca določi iz njegove suhe mase in iz mase pod vodo. Pri računskem postopku pa se gostota izračuna iz sestave in posameznih gostot sestavin materialov v zmesi.

3.2.4 Ugotavljanje prostorninske gostote bitumenskih preskušancev

Preskus zajema štiri postopke ugotavljanja prostorninske gostote zgoščenih asfaltnih zmesi, ki so bile proizvedene v laboratoriju ali odvzete iz že vgrajene asfaltne plasti. Glede na ocenjeno vsebnost zračnih votlin in od dostopnosti por v preskušancih je odvisna izbira primerne postopka. Določi se prostorninska gostota neporušenega zgoščenega preskušanca iz njegove mase in prostornine, kot predpisuje standard SIST EN 12697-6 [48]. Masa preskušanca se določi s tehtanjem suhega preskušanca na zraku, medtem ko se prostornina preskušanca določi s tehtanjem na zraku in v vodi. Za preskušance z zelo zaprto površino je primeren suhi postopek v vodi brez predhodne obdelave, kjer se določi masa preskušanca s tehtanjem. Za preskušance z odprto ali grobo površino, pa je primeren postopek, kjer se preskušanec najprej obvljuje, da se prepreči dostop vode v pore preskušanca, preden se ga potopi v vodo. Pri zadnjem, četrtem postopku, pa se prostornina preskušanca izračuna iz izmerjenih dimenzij in je primeren za preskušance pravilnih geometrijskih oblik in enakomerne površine.

3.2.5 Ugotavljanje značilnosti votlin v bitumenskih preskušancih

Določanje vsebnosti zračnih por ali votlin v zgoščenem asfaltnem preskušancu iz največje gostote zmesi ter iz prostorninske gostote preskušanca se izračuna po enačbi 3.3, ki jo določa standard SIST EN 12697-8 [49].

$$V_{BP} = \frac{\rho_{AZ} - \rho_{AP}}{\rho_{AZ}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Kjer je: V_{BP} – zračne votline v bitumenskem preskušancu v % (V/V), ρ_{AZ} – največja gostota asfaltne zmesi (Mg/m^3), ρ_{AP} – prostorninska gostota asfaltne preskušanca (Mg/m^3).

Zapolnjenost votlin kamenega agregata z bitumnom – VFB se izračuna po enačbi 3.4 iz vsebnosti topnega veziva, vsebnosti votlin v kamenem agregatu, prostorninske gostote asfaltnih preskušancev in gostote veziva (bitumna).

$$VFB = \left(\left(B \cdot \frac{\rho_{AP}}{\rho_B} \right) / VMA \right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

Kjer je: VFB – delež zapolnjenosti votlin kamenega agregata z bitumnom (% (v/v)), B – delež topnega veziva v asfaltnem vzorcu (%(m/m)), ρ_{AP} – prostorninska gostota asfaltnega preskušanca (Mg/m^3), ρ_B – gostota veziva-bitumna (Mg/m^3) in VMA – vsebnost votlin v kamenem agregatu (%(v/v)), ki se izračuna po enačbi 3.5.

$$VMA = V_{BP} + B \cdot \rho_{AP} / \rho_B \quad (3.5)$$

Kjer je: VMA – vsebnost votlin kamenem agregatu (%(v/v)), V_{BP} – vsebnost votlin v bitumenskem preskušancu (%(v/v)), B – vsebnost topnega veziva (%(m/m)), ρ_{AP} – prostorninska gostota asfaltnega preskušanca (Mg/m^3) in ρ_B – gostota veziva-bitumna (Mg/m^3).

3.2.6 Zgoščevanje

Z metodo po standardu SIST EN 12697-10 [50] se določa sposobnost zgoščanja asfaltnih zmesi z razmerjem med njihovo gostoto ali vsebnostjo votlin ter za zgoščanje uporabljenim delom. Uporabljajo se trije postopki zgoščanja: udarno, vrtljivo in vibracijsko zgoščanje (pri določeni temperaturi). Glede na vloženo energijo zgoščanja se meri višina istega preskušanca ali pa na več preskušancih, ki so bili zgoščeni z različno energijo. Iz enačbe odvisnosti gostote od zgoščevalnega dela se nato izračuna količnik zgoštljivosti.

3.2.7 Ugotavljanje občutljivosti bitumenskih preskušancev na vodo

Standard SIST EN 12697-12 [51] opisuje postopek za določanje učinka skladiščenja v vodi na indirektno natezno trdnost valjastih asfaltnih preskušancev in vsebuje tri metode: A, B in C.

Pri metodi A se skupina »suhih« preskušancev hrani na ravni podlagi pri sobni temperaturi, druga skupina »mokrih« preskušancev pa se hrani nasičena z vodo po vakuumiranju v vodi pri povišani temperaturi 40 °C 3 dni. Po kondicioniranju se določi indirektno natezno trdnost preskušancev po SIST EN 12697-23 [52], ki je opisana v poglavju 3.2.8. Tako se dobi končni rezultat, ki je razmerje srednjih vrednosti posrednih nateznih trdnosti skupine »mokrih« in skupine »suhih« preskušancev.

Pri metodi B se pa se »suha« skupina preskušancev hrani pri 18 °C in 50 % vlažnosti, skupina »mokrih« preskušancev pa 7 dni v vodi pri 18 °C. Po kondicioniranju se določi tlačna trdnost preskušancev. Končni rezultat je razmerje srednjih vrednosti posrednih nateznih trdnosti skupine »mokrih« in skupine »suhih« preskušancev.

Pri metodi C se zmeša 1 uro star vzorec mehke asfaltne zmesi in 1,5 l vode v stekleni čaši. Količina odpadlega materiala se izmeri s filtriranjem. Vrednost zlepljenja je količina suhega agregata in bitumna na filterskem papirju.

3.2.8 Ugotavljanje posredne natezne trdnosti bitumenskih preskušancev

Standard SIST EN 12697-23 [52] opisuje postopek indirektno (posredne ali razcepne) natezne trdnosti valjastih preskušancev asfaltnih zmesi, ki se uporablja tudi za določitev občutljivosti na vodo po SIST EN 12697-12 [51].

Preskušanci so lahko vrtine iz vozišča po EN 12697-27 [53] ali v laboratoriju pripravljene valjaste preskušance premera 100 mm, 150 mm ali 160 mm. Preskušance je potrebno skladiščiti pri temperaturi 5 °C najmanj 4 ure, preden se jih obremeni s konstantno hitrostjo stiskanja 50 mm v minuti do porušitve. Posredno natezno trdnost se izračuna za vsak preskušanec iz največje sile in mer preskušanca. Rezultat predstavlja srednjo vrednost trdnosti najmanj treh preskušancev. Ob porušitvi je potrebno zabeležiti tudi tip porušitve, ki pa je lahko: čista natezna porušitev, deformacija ali kombinacija obeh (vrsta zloma preskušanca).

3.2.9 Preskus po Marshallu

S tem postopkom, ki ga določa standard SIST EN 12697-34 [56] določamo stabilnost, tečenje (deformacijo) in količnik togosti za valjaste asfaltne preskušance, proizvedene po EN 12697-30 [55]. Preskušance se po predhodnem temperiranju (40 minut v vodni kopeli s temperaturo 60 °C) obremenjuje v stiskalnici s konstantno hitrostjo stiskanja 50 mm/min do porušitve. Tako zabeležena največja sila pri porušitvi je označena kot stabilnost preskušanca po Marshallu, izmerjena deformacija preskušanca pri tej sili pa kot tečenje (deformacija) po Marshallu.

4 EKSPERIMENTALNI DEL

4.1 Metode dela

4.1.1 Kameni agregat

4.1.1.1 Granulometrijska sestava

Za pripravo predhodne sestave asfaltne zmesi AC 8 surf B 50/70 A4 brez dodanega in z dodatkom različnega deleža livarskega peska, smo potrebovali granulometrijske sestave frakcij kamenega materiala Očura, kot tudi livarskega peska in kamene moke Očura, ki smo jih določili po metodi, ki jo določa standard SIST EN 933-1 [25].

Določiti je bilo treba granulometrijske krivulje uporabljenih kamenih frakcij z največjim zrnom 0/2 mm, 2/4 mm in 4/8 mm, granulometrijsko krivuljo frakcije 0/2 mm livarskega peska ter granulometrijsko krivuljo 0/2 mm kamene moke.

Za določitev poteka granulometrijske krivulje smo uporabil vstavek sit 0,063 mm, 0,25 mm, 0,71 mm, 2,0 mm, 4,0 mm, 8,0 mm in 11,2 mm.

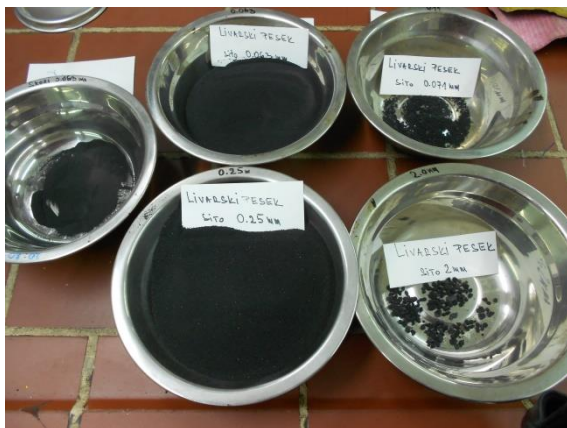
Za vsako frakcijo kamenega materiala smo odtehtali suh vzorec materiala približne mase 1200 g in ga stresli v sejalnik oziroma v vstavek sit premera 300 mm (Slika 4-1). Čas sejanja smo nastavili na 30 min in izbrali enakomerno vibriranje ter srednjo moč vibriranja.

Po končanem sejanju smo presevke iz posameznih sit stehali. Primer presevkov livarskega peska prikazuje slika 4-2.

Rezultati granulometrijske sestave vhodnih kamenih materialov so podani v preglednicah 5-1 (kameni agregat), 5-2 (kamena moka) in 5-4 (livarski pesek).



Slika 4-1: Sejalnik z vstavki sit



Slika 4-2: Presevki (ostanki) livarskega peska na različnih vstavkih sit po sejanju

4.1.2 Kamena moka in livarski pesek

4.1.2.1 Določevanje prostorninske mase zrn kamene moke - Postopek s piknometrom

Pri določanju prostorninske mase kamene moke Očura, livarskega peska in mešanic kamene moke z različnimi deleži livarskega peska po standardu SIST EN 1097-7 [40] smo potrebovali:

- sušilnik,
- desikator,
- piknometer z volumnom 50 ml (glava piknometra s kapilaro je na spodnji strani konkavna),
- termometer s točnostjo 0,1 °C,
- tehtnico s točnostjo 0,001 g,
- vodna kopel, s točnostjo $25 \pm 0,1$ °C,
- vakuumsko sušilno posodo in vakuumsko črpalko za doseganje podtlaka $3,0 \pm 0,3$ kPa.

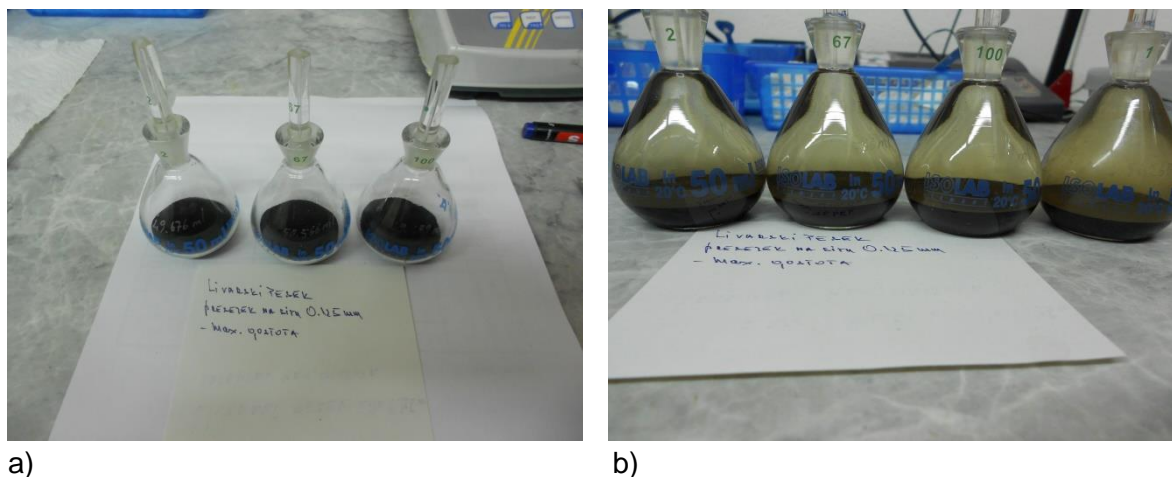
Priprava vzorcev

Testni vzorec kamene moke (minimalno 50 g) smo sušili do konstantne teže pri 110 ± 5 °C in ga nato ohlajali v desikatorju najmanj 90 minut. Testni vzorec polnila smo presejali na situ 0,125 mm.

Določanje prostorninske mase

Stehali smo suh in čist piknometer z glavo piknometra (m_0) in ga napolnili z 10 ± 1 g kamene moke kot prikazuje slika 4-3 a) . Napolnjen piknometer smo ponovno stehali in dobili maso m_1 . Dodali smo ustrezno količino vode, tako da je kamena moka bila popolnoma prekrita z vodo, vstavili glavo piknometra v piknometer in ga postavili v vakuumski sušilnik za cca. 5 minut na $3,0 \pm 0,3$ kPa podtlaka. Po pretečenem času smo vzpostavili normalen zračni tlak, odstranili glavo piknometra in ga napolnili z vodo do vrha. Piknometer brez glave smo postavili v vodno kopel, tako da je bil vrat piknometra 2-3 mm nad vodno gladino. Piknometer smo temperirali pri $25 \pm 0,1$ °C cca. 60 minut. Po 60 minutah smo v piknometer vstavili glavo piknometra (Slika 4-3 b) kar je povzročilo, da je odvečna voda odtekla skozi kapilaro. Piknometer smo osušili in stehali (m_2).

Prostorninsko maso kamene moke smo izračunali po enačbi 3.1.



Slika 4-3: Določanje prostorninske mase livarskega peska: a) piknometri napolnjeni z livarskim peskom, b) piknometri napolnjeni z livarskim peskom in destilirano vodo

4.1.2.2 Določevanje votlin v suho zbiti kameni moki

Votline v suho zbiti kameni moki smo določili tudi livarskemu pesku in mešanica kamene moke z različnim deležem livarskega peska, ki smo jih uporabili v sestavi laboratorijsko proizvedenih asfaltnih zmesih AC 8 surf B50/70 A4.

Mešanice kamene moke in livarskega peska smo pripravili točno v razmerjih »livarski pesek:kamena moka«, ki smo jih izračunali iz sestave mešanice kamenega materiala za asfaltno zmes za različne deleže dodanega livarskega peska.

Votline smo določili z aparatom za zgoščevanje po Rigdenu (Slika 4-4) skladno s standardom SIST EN 1097-4 [41].



Slika 4-4: Aparat za zgoščevanje po Rigdenu

Za izveden preskus smo uporabili naslednjo opremo:

- ventilacijski sušilnik z nastavljivo in kontrolirano temperaturo ($110 \pm 5^{\circ}\text{C}$),
- eksikator z odgovarjajočim sušilnim sredstvom,
- lopatica ali spatula,
- aparat za zgoščevanje po Rigdenu,
- tehtnica z natančnostjo 0,01g,

- filter papir mase ($20 \pm 5 \text{ g/m}^2$) in premera ($25 \pm 1 \text{ mm}$) in
- sito z odprtino $0,125 \text{ mm}$ in odgovarjajoči podstavek.

Minimalno 150 g vzorca smo sušili do konstantne mase v sušilniku pri temperaturi $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ in ga nato ohlajali v eksikatorju približno 90 min , nato pa suh vzorec presejali skozi sito $0,125 \text{ mm}$ in presevek shranili. Določili smo prostorninsko gostoto vzorca kot je opisano v poglavju 4.1.2.1.

V prazen valj padajočega bloka smo vstavili filter papir in bat ter nastavili na ničelno višino. Bat smo odstranili in stehali padajoči blok s filter papirjem. Zabeležili smo maso (m_0) na $0,01 \text{ g}$ natančno, filter papir pa odstranili.

Zatehtali smo $10 \pm 1 \text{ g}$ vzorca in ga dali v valj padajočega bloka. Z rahlim in previdnim potrkavanjem na podlago, smo razprostrli polnilo v valju, vanj položili filter papir in vstavili bat. Nato smo padajoči blok z valjem, papirjem in batom vstavil v vodila aparature. Padajoči blok smo dvignili do zgornje točke in spustili, da je prosto padel na osnovno ploščo. Postopek smo ponovili 100-krat z razmikom 1 sekunde . Na merilni skali, ki je na batu smo odčitali višino zgoščenega polnila (h) na $0,01 \text{ mm}$ natančno. Nato smo padajoči blok sneli iz vodilnih palic, odstranili bat in stehali padajoči blok s polnilom in filter papirjem, maso pa zabeležili (m_1) na $0,01 \text{ g}$ natančno.

Maso zgoščenega polnila (m_2) smo izračunali po enačbi:

$$m_2 = (m_1 - m_0) \quad (4.1)$$

Izvedli smo tri paralelne preskuse in na podlagi dobljenih vrednosti izračunali vrednost votlin po enačbi 3.2.

Rezultati preskusa so podni kot srednje vrednosti treh določanj vsebnosti votlin zaokroženi na 1% za kameno moko v preglednici 5-3; za livarski pesek in mešanice kamene moke z dodatkom 3% , 6% , 9% in 12% livarskega peska pa v preglednici 4-1.

4.1.2.3 Delta preskus prstan-kroglica

S preskusom delta prstan kroglica (SIST EN 13179-1 [42]) smo ugotavljali povečanje zmehčišča v zmesi bitumen/kamena moka oz. livarski pesek oz. mešanice kamena moka in livarski pesek s sestavo $37,5$ volumskih delov polnila in $62,5$ volumskih delov bitumna ter razliko z zmehčiščem čistega bitumna, ki je uporabljen v tej zmesi.

Pri postopku »Delta prstan-kroglica« smo potrebovali:

- tehcnico z natančnostjo $0,1 \text{ g}$,
- sušilnik z nastavljivo temperaturo ($110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ in $150 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$),
- eksikator s sušilnim sredstvom ter vakuum črpalko,
- sito $0,125 \text{ mm}$,
- bučko z okroglim dnom in volumnom min. 140 ml ,
- grelec za bučko,
- prstane, jeklene kroglice,
- avtomatski aparat PK znamke Infratest z vso potrebno opremo in priborom.

Priprava testnega vzorca polnila

Minimalno 150 g vzorca smo sušili do konstantne mase v sušilniku pri temperaturi 110 ± 5 °C in ga nato ohlajali v eksikatorju približno 90 min, nato pa suh vzorec presejali skozi sito 0,125 mm.

Priprava posameznega vzorca

V sušilnik smo dali čašo s približno 60 g bitumna 50/70, čašo s testnim vzorcem polnila, destilacijsko bučko z okroglim dnom in 4 medeninaste prstančke ter segreval pri $T = 150 \pm 5$ °C, $t = 4 \pm 0,5$ h. Dva segreta prstančka smo postavili na čisto podlago (petrijevko) premazano z zmesjo dekstrina in glicerina in vanju previdno nalil bitumen. V destilacijsko bučko smo previdno vlili $20 \pm 0,2$ g bitumna (m_b), postavili v grelec za bučko in segrevali pri $T = 150 \pm 10$ °C kot je prikazano na sliki 4-5.

Potrebno maso vzorca (m_f) smo izračunali po enačbi:

$$m_f = 0,6 \cdot m_b \cdot \frac{\rho_f}{\rho_b} \quad (4.2)$$

Kjer je: m_b =masa bitumna (g), m_f =masa dodanega polnila (g), ρ_f =gostota polnila (Mg/m^3),
 ρ_b -gostota bitumna (Mg/m^3)= $1,025 \text{ Mg}/\text{m}^3$

Izračunano maso vzorca (m_f) smo stresli v bučko z bitumnom v času 150 ± 5 sekund in zmes mešali in mešali še $t = 150 \pm 5$ sekund pri $T = 150 \pm 5$ °C, da smo dobili homogeno zmes. Preostala dva segreta prstančka sem postavil na čisto podlago (petrijevko) premazano z zmesjo dekstrina in glicerina in vanju previdno nalil zmes bitumen/kamena moka oz. livarski pesek oz. mešanica kamena moka in livarski pesek.



Slika 4-5: Priprava vzorca zmesi bitumna in mešanice kamena moka Očura/livarski pesek za določanje delta prstan-kroglica

Določanje PK

PK bitumna ter zmesi bitumen/kamena moka oz. livarski pesek oz. mešanica kamena moka in livarski pesek smo določili z metodo, ki jo predpisuje standard SIST EN 1427 [43] in je opisana v poglavju 4.1.3.1.

Določanje delta prstan-kroglica $\Delta_{R\&B}$

Delta prstan-kroglica $\Delta_{R\&B}$ smo izračunali kot razliko med srednjima vrednostma točke zmeščišča ($PK_{\text{vzorec+bitumen}} - PK_{\text{bitumen}}$). Rezultati so podani v preglednicah 5-3: (kamena moka) in 5-7 (livarski pesek in mešanice kamena moka/livarski pesek) na 0,5 °C natančno.

4.1.3 Bitumen

4.1.3.1 Določanje zmeščišča po metodi prstan kroglica (PK)

Skladno s standardom SIST EN 1427 [43] smo določili točko zmeščišča vhodnega bitumna B50/70, ki smo ga uporabil v asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4 in ekstrahiranega bitumna pridobljenega iz asfaltnih zmesi brez in z dodanim livarskim peskom.

Za določanje zmeščišča bitumna smo uporabil naslednjo opremo:

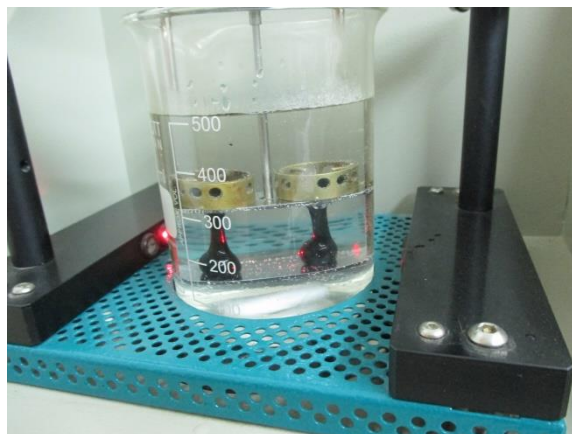
- avtomatski aparat za PK znamke Infratest,
- jeklene kroglice premera $9,50 \pm 0,05$ mm, mase $3,5 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$,
- prstan – kalup,
- držalo za prstana in
- laboratorijsko čašo (600 ml).

Preiskavo smo izvedli na 1 vzorcu vhodnega bitumna ter na 10 vzorcih ekstrahiranega bitumna iz asfaltne zmesi z različnimi deleži livarskega peska.

Za vsak vzorec smo vzeli dva prstana, segreti na približno 90 °C nad pričakovanim zmeščiščem vzorca in jih postavili na čisto podlago (petrijevko) premazano z zmesjo dekstrina in glicerina. Segret vzorec bitumna smo vlili v kovinska prstana malo nad robom in hladil 30 minut na sobni temperaturi. Od vlitja vzorca v kovinske prstane do same izvedbe analize je preteklo 3 ure. Odvečni bitumen na prstanih smo odrezali s segretim nožem in s tem poravnali površino.

Na držalo prstanov smo namestili pripravljene vzorce in namestili držalo kroglic, čašo pa napolnil z destilirano vodo, da je bil nivo tekočine 50 mm nad zgornjim robom prstanov. Na dno čaše smo položili magnetni mešalec in vstavili sondo za merjenje temperature.

Začetna temperatura vode je bila 5 ± 1 °C, kar smo dosegli s predhodnim ohlajanjem v hladilniku ter z ledom. V tako ohlajeni vodi smo temperirali vzorce 15 min, nato pa vklopili avtomatsko napravo za PK ter izvedli preskus (Slika 4-6 a), zraven pa spremljali dvig temperature 5 °C na minuto, dokler se ni bitumen toliko zmeščal, da se je vzorec dotaknil podlage (Slika 4-6 b) in je senzor zabeležil temperaturo v danem trenutku.



a) b)
Slika 4-6: Določanje PK bitumna B50/70: a) med postopkom, b) konec postopka

Rezultati vhodnega bitumna so podani v preglednici 5-8, ekstrahiranega bitumna pa v preglednici 5-25.

4.1.3.2 Določevanje penetracije z iglo

Globino prodiranja igle vhodnega bitumna B50/70, ki smo ga uporabil v asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4, kot tudi ekstrahiranega bitumna pridobljenega iz laboratorijsko proizvedenih asfaltnih zmesi brez in z dodatkom različnega deleža livarskega peska smo določili z metodo, ki jo predpisuje standard SIST EN 1426 [44].

Pri penetraciji igle za bitumne in bitumenska veziva smo potrebovali:

- penetrometer s priborom za termostatiranje,
- standardizirane igle,
- lonček,
- termometer +19 °C do 27 °C, z razdelbo 0,1 °C

Bitumen smo segreli na približno 100 °C nad pričakovanim zmečkščem in ga vlil v za to namenjen čist lonček ter ga hladili na temperaturi 15-30 °C približno 90 – 120 min.

Vzorec smo temperirali v vodni kopeli na temperaturi $25 \pm 0,15$ °C, nato pa ga premestili v avtomatski penetrometer s temperirano vodo, namestili penetracijsko iglo in jo spustili do površine vzorca (konica igle in njen odsev na površini vzorca se »dotakneta«) kot je prikazano na sliki 4-7. Z aktiviranjem penetrometra je igla prodirala v vzorec 5 sekund in se nato sama ustavila. Preskus smo ponovil trikrat za vsak vzorec, rezultat pa navedli kot srednjo vrednost posameznih preskusov.



Slika 4-7: Določevanje penetracije z iglo bitumna B50/70

Rezultati globine prodiranja igle za vhodni bitumen B50/70 so podani v preglednici 5-8, za ekstrahiran bitumen pa v preglednici 5-25.

4.1.4 Asfaltne zmesi

4.1.4.1 Ugotavljanje deleža veziva: Rotacijski uparjalnik

Za metodo ugotavljanje deleža veziva z rotacijskim uparjalnikom (Slika 4-8), ki jo določa standard SIST EN 12697-3 [46] smo potrebovali:

- dve 1000 ml bučki
- oljno kopel z visokotemperaturnim silikonskim oljem,
- rotavapor,
- vakuumsko črpalko,
- termometer z merilnim območjem 100 – 200 °C in natančnostjo $\pm 0,5$ °C in
- trikloretilen (topilo).

V posodo smo dali približno tolikšno količino asfaltne zmesi, da je vsebovala med 50 in 120 g veziva. Vzorec asfaltne zmesi smo prelili z do 1500 ml trikloretilena in posodo z vzorcem mešali tako dolgo, da je bil kameni material čist in ves viden bitumen raztopljen. Bitumensko raztopino smo pustili stati minimalno 10 minut. Nato smo raztopino oddekantirali skozi sito 0,063 mm v 1000 ml stekleno čašo. Stekleno čašo z vzorcem bitumenske raztopine smo pokrili in pustili stati na temnem mestu približno 12 ur.

Pripravljen vzorec smo nalili v destilacijsko bučko in jo s sponko pričvrstili na spodnji del uparjalnika in nastavili temperaturo oljne kopeli na $T_1 = 90$ °C . V oljno kopel smo potopili destilacijsko bučko z vzorcem in vključili rotiranje bučke, da se je vrtela z 75 ± 15 obratov/minuto. Vključili smo vakuumsko črpalko, da se je dvignil podtlak in se je začelo topilo destilirati. Temperaturo smo nato dvignili na $T_2 = 160$ °C in vključil vakuumsko črpalko, da se je destilacija topila nadaljevala, dokler niso prenehali nastajati mehurčki bitumna v

bučki. Ko je bil postopek končan, smo bučko z bitumnom umaknil in vzorce bitumna uporabil za nadaljnje preskušanje.



Slika 4-8: Rotacijski uparjalnik za pridobivanje ekstrahirane bitumna

4.1.4.2 Ugotavljanje največje gostote

Postopek za določanje največje gostote smo izvedli po metodi, ki jo določa standard SIST EN 12697-5:2010/AC 2012 [47].

Za določitev največje gostote smo potrebovali:

- piknometar,
- termometer s točnostjo najmanj 0,1 °C,
- tehtnico s točnostjo najmanj 0,1 g,
- vodna kopel, ki zmora vzdrževati temperaturo vode na enaki temperaturi s točnostjo $25 \pm 0,2$ °C in
- vakuumsko posodo.

Priprava vzorcev

Vročo asfaltno zmes smo razprostrli po podlagi, jo razdrobili in pustili da se ohladi. Z ohlajeno zmesjo smo napolnili piknometar do maksimalno 30 mm pod vrat piknometra. Poln piknometar smo napolnili z destilirano vodo, da je bila zmes v piknometru popolnoma prekrita in ga dali v vakuumsko posodo (Slika 4-9), kjer smo nastavili parametre: Podtlak = 40 ± 3 kPa in čas 15 min.



Slika 4-9: Vakuumska posoda za določanje največje gostote asfaltni zmesi

Po vakumiranju smo dali piknometre temperirati v vodno kopel za cca. 30 – 180 minut kot prikazuje slika 4-10. Prav tako smo dali temperirati piknometre napolnjen samo z vodo.



Slika 4-10: Temperiranje vzorca asfaltnih zmesi v vodni kopeli pri 25 °C

Določanje največje gostote

Piknometre smo stresli, da smo izpodrinili morebitni zrak, dolili temperirano vodo do oznake in izmerili temperaturo vode. Piknometre smo obrisali in stehali. Postopek smo ponovili za vse zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z različnimi deleži dodanega livarskega peska.

4.1.4.3 Ugotavljanje prostorninske gostote bitumenskih preskušancev

Za določitev prostorninske gostote po postopku B (nasičena suha površina), ki ga določa standard SIST EN 12697-6 [48] smo potrebovali:

- kad z vodo,
- termometer s točnostjo najmanj 0,1 °C,
- tehtnico s točnostjo najmanj 0,1 g,
- nosilo za tehtanje pod vodo in
- krpo.

Marshall-ove preskušance (vzorci asfaltnih zmesi) smo pripravili z Marshall-ovim nabijalom ter ohladili na zraku. Za vsako vrsto asfaltnih zmesi smo pripravili 3 Marshall-ove preskušance. Ohlajene vzorce smo stehali in jih dali v kad z vodo tako, da se niso dotikali med seboj in jih pustili pod vodo 1 uro. Med tem smo jih obračali, da smo izpodrinili zrak iz preskušancev.

Na spodnji del tehtnice smo obesili nosilo za tehtanje pod vodo in nanj položili preskušane (m₂) kot je prikazano na sliki 4-11. Paziti smo morali, da je bila gladina vode vsaj 2 cm nad preskušancem, ko je bil še v vodi. Preskušane smo vzeli iz vode, ga s krpo na hitro obrisali in ponovno stehali (m₃). Postopek smo ponovili za vse preskušance, za vsako asfaltno zmes z različnimi dodanimi deleži livarskega peska pripravljenih pri različnih temperaturah.



Slika 4-11: Ugotavljanje prostorninske gostote asfaltnega preskušanca – Tehtanje vzorca pod vodo

Prostorninsko gostoto asfaltnih preskušancev smo izračunali na $0,01 \text{ Mg/m}^3$ natančno po enačbi 4.3:

$$\rho_{AP} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_{H_2O} \quad (4.3)$$

Kjer je: ρ_{AP} – prostorninska gostota asfaltnih preskušancev, m_1 – masa suhega vzorca (g), m_2 – masa vzorca potopljenega pod vodo (g), m_3 – masa vzorca iz vode in obrisanega.

4.1.4.4 Zgoščevanje

Postopek zgoščevanja smo izvedli po metodi, ki jo določa standard SIST EN 12697-10 [50].

Pri postopku zgoščevanja smo potrebovali:

- udarni zgoščevalnik – Marshallovo nabijalo s potrebno opremo,
- programsko opremo,
- hidravlično izstiskalno napravo,
- pladenj za vzorce in
- pomično merilo.

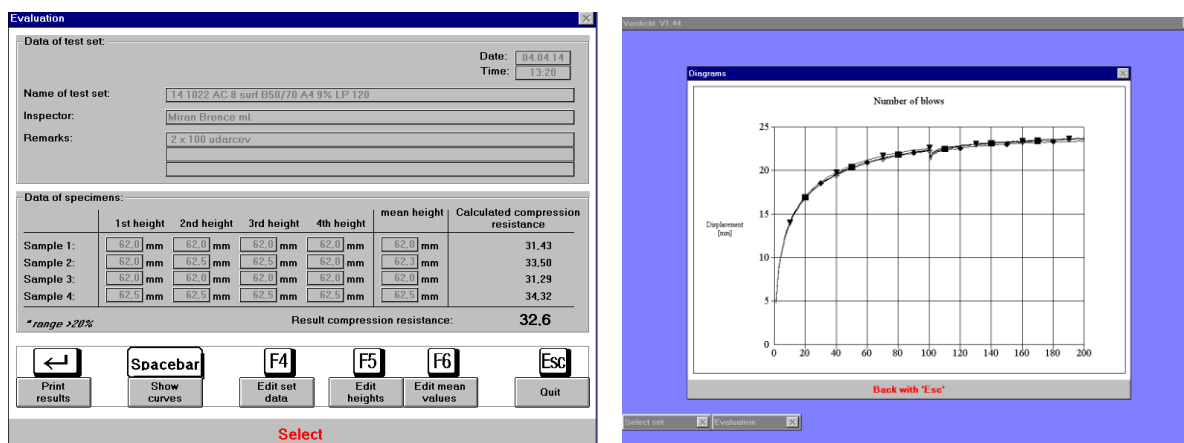
Zatehtali smo štiri vzorce vroče asfaltne zmesi po $1240 \pm 10 \text{ g}$ in jih segrevali na temperaturi, ki je določena za vrsto bitumna uporabljenega v asfaltni zmesi in je za bitumen B50/70 $150 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$.

V računalniku smo zagnali program za določanje stopnje zgoščevanja, vključili nabijalo in nastavili na njem število udarcev, t.j. 100 udarcev. Ko je imela asfaltna zmes zeleno temperaturo, smo namestili na segreto osnovno ploščo segrete kalupe in nastavek. Vstavili smo filter papir, da se asfaltna zmes ni sprijela na nabijalo. Na vrh smo postavimo lijak za polnjenje. V kalup smo stresli segreto asfaltno zmes in na vrh položili spet filtrni papir. Vse skupaj smo vstavili v Marshall-ovo nabijalo ter zagnali računalniški program (Slika 4-12). Po 100 udarcih smo obrnili vzorec ter ponovili postopek za vse vzorce. Ohlajene vzorce smo s pomočjo hidravlične stiskalnice izstisnili iz kalupov, jim izmerili višine ter jih vnesli v

računalniški program, ki je obdelal podatke. Tako smo dobili rezultate (Slika 4-13 in Preglednica 5-27) odpornosti na zgoščevanje asfaltnih zmesi brez in z različnimi deleži dodanega livarskega peska, ki smo jo laboratorijsko pripravili pri 120 in 150 °C.



Slika 4-12: Marshallovo nabijalo



Slika 4-13: Izpis rezultatov zgoščevanja na zaslonu računalnika

4.1.4.5 Ugotavljanje občutljivosti bitumenskih preskušancev na vodo

V laboratoriju smo uporabili za merjenje indirektno natezne trdnosti stiskalnico znamke Infratest, s pripadajočo opremo, to je čeljustmi in software-om (Slika 4-14).



Slika 4-14: Stiskalnica za določanje indirektna natezne trdnosti s pripadajočimi čeljustmi in programsko opremo ter vodna kopel za obdelavo mokrih vzorcev pri 40 °C

Preskus določanja občutljivosti na vodo asfaltnih preskušancev poteka pri metodi A, ki jo predpisuje standard SIST EN 12697-12 [51] v štirih korakih.

Priprava asfaltnih preskušancev

Pripravili smo 8 asfaltnih preskušancev tako, da smo jih nabijali z 2x35 udarcev v Marshall-ovem nabijalu. Vseh 8 vzorcev smo označili in sicer 4 vzorce za suho preskušanje ter 4 vzorce za mokro preskušanje kot prikazuje slika 4-15.



a)

b)

Slika 4-15: Priprava a) suhega in b) mokrega vzorca asfaltne zmesi

Določanje prostorninske gostote asfaltnih preskušancev

Ohlajenim asfaltnim preskušancem smo izmerili višino in premer po SIST EN 12697-29 [54] ter jim določili prostorninsko gostoto (SIST EN 12697-6 [48]).

Priprava vzorcev za določanje natezne trdnosti

Suhi vzorci

Za 2–4 ure smo jih dali sušiti na temperaturo 25 ± 2 °C v vodno kopel, kjer smo vsak vzorec posebej predhodno zavili v plastično vrečo.

Mokri vzorci

V vakuumsko posodo smo nalili toliko destilirane vode, da je segala vodna gladina najmanj 2 cm nad preskušance (25-30 l). Vzorce smo položili v vakuumsko posodo tako, da se niso dotikali drug drugega. Nastavili smo parametre na vakuumski posodi: čas = 30 min in podtlak 67 ± 3 kPa. Vakuumiranim preskušancem smo izmerili višino in premer ter jih vstavili v vodno kopel temperature 40 ± 1 °C za 68–72 ur. Po temperiranju smo preskušance vstavili še v vodno kopel temperature 25 ± 2 °C in jih temperirali približno 2 uri.

Določanje indirektna natezne trdnosti.

Mokrim in suhim preskušancem smo določili indirektno natezno trdnost skladno s standardom SIST EN 12697-23 [52]. S pomočjo računalniškega programa, v katerega smo pred preskusom vnesli podatke, smo dobili rezultate indirektna natezne trdnosti. Primeri vzorcev in prikaza rezultatov po postopku indirektna natezne trdnosti (ti. zlomu) so prikazani na slikah 4-16 in 4-17.

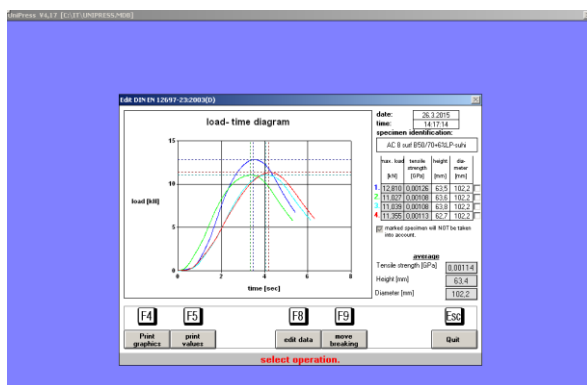


a)

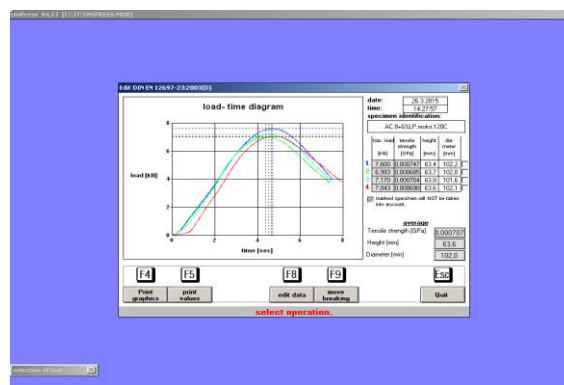


b)

Slika 4-16: Suhi (a) in mokri (b) vzorci asfaltna zmesi po določanju indirektna natezne trdnosti



a)



b)

Slika 4-17: Izpis rezultatov in krivulj indirektna nateznih trdnosti na zaslonu računalnika za suh (a) in moker (b) vzorec

Iz razmerja indirektna natezne trdnosti suhih vzorcev in indirektna natezne trdnosti mokrih vzorcev se izračuna občutljivost na vodo (ITS_R) po enačbi 4.4:

$$ITS_R = ITS_w / ITS_d \quad (4.4)$$

Kjer je: ITS_R – razmerje indirektnih nateznih trdnosti, ITS_d – indirektna natezna trdnost suhih vzorcev, ITS_w – indirektna natezna trdnost mokrih vzorcev.

4.1.4.6 Preskus po Marshallu

Za preskus po Marshall-u smo najprej pripravili preskušance z udarnim zgoščevalnikom (Marshall-ovo nabijalo) po metodi, ki jo predpisuje SIST EN 12697-30 [55].

Oprema, ki smo jo uporabili je:

- udarni zgoščevalnik – Marshall-ovo nabijalo z pripomočki (kalupi, osnovna plošča, nastavek),
- hidravlično iztiskalno napravo in
- pladenj za vzorce.

Priprava preskušancev

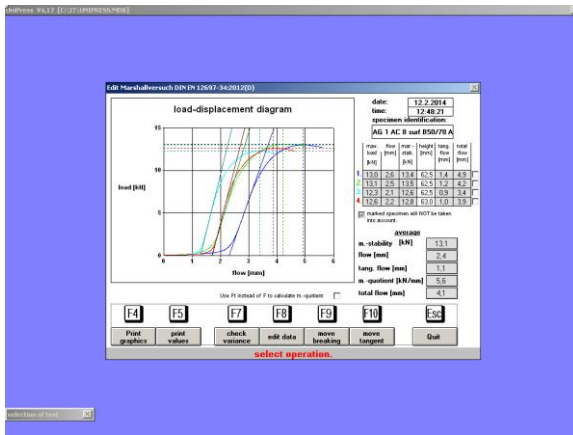
Asfaltno zmes smo razdelili in zatehtali v kovinsko posodico 1240 g \pm 10 g zmesi. Pripravili smo toliko vzorcev kolikor jih zahteva metoda (3 vzorce za vsako asfaltno zmes z različnimi deleži dodanega livarskega peska). Zatehte smo dali v sušilnik in jih segrevali na želeno temperaturo 150 °C \pm 3 °C oz. 120 °C \pm 3 °C. Po cca. dveh urah smo preverili temperaturo asfaltnih vzorcev v sušilniku s termometrom in ko je ustrezala, smo pričeli z zgoščevanjem asfaltnih preskušancev s 50 udarci na vsaki strani preskušanca.

Po končanem zgoščevanju smo kalup s preskušancem položili na pladenj, da se je ohlajal. S hidravlično iztiskalno napravo smo ohlajene preskušance iztisnili iz kalupa.

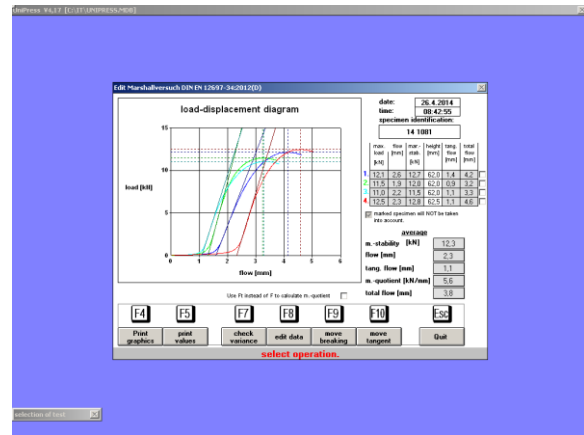
Preskus po Marshallu smo izvedli na stiskalnici z čeljustmi in programsko opremo, ki jo predpisuje standard SIST EN 12697-34 [56]. Preskušanec smo vstavili v čeljusti nameščene na stiskalnico in s pomočjo programske opreme izvedli stiskanje (Slika 4-18). Rezultati stabilnosti, deformacije, tangencialne deformacije in togosti, ki smo jih dobili po Marshallovem preskusu so podani na Sliki 4-19 in v preglednici 5-29.



Slika 4-18: Določanje preskusa po Marshall-u



a)



b)

Slika 4-19: Izpis rezultatov stabilnosti, deformacije, tangencialne deformacije in togosti na zaslonu računalnika za dva različna vzorca asfaltne zmesi

5 REZULTATI PREISKAV

5.1 Vhodni materiali

Rezultati geometrijskih in fizikalnih lastnosti vhodnih materialov (kameni agregati, livarski pesek, kamena moka, bitumen) so prikazani v preglednicah od 5-1 do 5-8.

5.1.1 Kameni agregati

Predhodno smo preiskali kameni agregat Očura, in sicer frakciji 0/4 in 4/8 mm. Frakcijo 0/4 mm smo nato za nadaljnje preiskave razsejali na podfrakciji 0/2 in 2/4 mm. V preglednici 5-1 so prikazane srednje vrednosti presevkov skozi sita (%mas) frakcij 0/4 in 4/8 mm kamenega agregata Očura, ki smo jih določili v skladu s standardom SIST EN 933-1 [25] in rezultati prostorninske mase posameznih frakcij kamenega agregata. Rezultati določanja prostorninske mase zrn so povzeti iz izjav o skladnosti proizvajalca kamenega agregata in sicer za frakciji 0/4 mm [63] in 0/8 mm [64].

Preglednica 5-1: Granulometrija in prostorninske mase frakcij 0/4 in 4/8 mm kamenega agregata Očura

Nazivna frakcija (mm)	Presevek skozi sito v (%mas)								Prostorninska masa (Mg/m ³)
	Premer sita v (mm)								
	0,063	0,25	1,0	2,0	4,0	5,6	8,0	11,2	
0/4	7,5	19	34	61	96	100			2,81
4/8	0,3	1	1	1	7	10	90	100	2,84

5.1.2 Kamena moka

Rezultati preiskav kamene moke so prikazani v preglednicah 5-2 in 5-3:. Kameni moki Očura smo določili granulometrijsko sestavo po SIST EN 933-1 [25], prostorninsko maso po SIST EN 1097-7 [40], vsebnost votlin po Rigdeniu (SIST EN 1097-4 [41]) in delta prstan kroglica skladno s standardom SIST EN 13179-1 [42].

Preglednica 5-2: Granulometrija in prostorninska masa kamene moke Očura

Vrsta kamene moke	Presevek skozi sito v (%mas)				Prostorninska masa (Mg/m ³)
	Premer sita v (mm)				
	0,063	0,25	0,71	2,0	
Očura	70,3	78	98	100	2,78

Preglednica 5-3: Vsebnost votlin v suho zgoščenem polnilu (Votline po Rigdenu), standardna deviacija in Delta prstan kroglica kamene moke Očura

Vrsta kamene moke	Vsebnost votlin po Rigdenu (%)	Delta prstan kroglica $\Delta_{R\&B}$ (°C)
Očura	31	12,6
Standardna deviacija	0,5	/
Kategorija (SIST EN 13043:2002)	28-38	8/16

5.1.3 Livarski pesek

Livarskemu pesku, ki smo ga dodali kot dodatek v asfaltno zmes smo določili geometrijske, mehanske in fizikalne lastnosti.

Granulometrijska sestava, ki smo jo določili z metodo, ki je podana v standardu SIST EN 933-1 [25] in prostorninska masa določena skladno s standardom SIST EN 1097-7 [40] sta podani v preglednici 5-4.

Rezultati prostorninske mase livarskega peska in mešanic kamene moke z različnim deležem dodanega livarskega peska so podani v preglednici 5-5. Prostorninsko maso smo določali po metodi, ki jo določa standard SIST EN 1097-7 [40].

V preglednicah 5-6 in 5-7 so podani rezultati preiskav s katerimi smo določali mehanske in fizikalne lastnosti livarskega peska ter mešanic livarskega peska in kamene moke Očura. Livarski pesek smo kameni moki Očura dodali v različnih deležih, tj. 3 %, 6 %, 9 % in 12 %. Livarskemu pesku ter mešanicam livarskega peska in kamene moke Očura smo določili vsebnost votlin z metodo, ki jo predpisuje standard SIST EN 1097-4 [41] in delta prstan kroglica skladno s standardom SIST EN 13179-1 [42].

Preglednica 5-4: Granulometrija in prostorninska masa livarskega peska

Vrsta	Presevek skozi sito v (%mas)					Prostorninska masa (Mg/m ³)
	Premer sita v (mm)					
	0,063	0,25	0,71	2,0	4,0	
Livarski pesek	1,0	37	98	99	100	1,88

Preglednica 5-5: Prostorninska masa livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska

Delež livarskega peska (%)	Prostorninska masa (Mg/m ³)
100	1,88
3	2,556
6	2,550
9	2,554
12	2,534

Preglednica 5-6: Vsebnost votlin po Rigdenu livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska

Delež livarskega peska (%)	Vsebnost votlin po Rigdenu (%)	Standardna deviacija	Kategorija (SIST EN 13043:2002)
100	40	0,4	/
3	34	0,1	28-38
6	34	0,1	28-38
9	35	0,5	28-38
12	35	1,0	28-38

Preglednica 5-7: Delta prstan kroglica livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska

Delež livarskega peska (%)	Delta prstan kroglica $\Delta_{R\&B}$ (°C)	Kategorija (SIST EN 13043:2002)
100	17	/
3	13	8/16
6	13	8/16
9	14	8/16
12	14	8/16

5.1.4 Bitumen

Za mešanice asfaltnih zmesi smo uporabili cestogradneni bitumen B50/70. Določili smo mu osnovne lastnosti, to sta točka zmečičišča po metodi prstan kroglica, ki jo določa standard SIST EN 1427 [43] in penetracijo z iglo, ki smo jo določili skladno s standardom SIST EN 1426 [44]. Rezultati vhodnega bitumna so podani kot srednje vrednosti v preglednici 5-8.

Preglednica 5-8: Delta prstan kroglica livarskega peska ter mešanic kamene moke Očura z dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska

Vrsta bitumna	Penetracija (mm/10)	Točka zmečkaišča (°C)
B50/70	64	46,2
Mejna vrednost (SIST EN 12591:2009)	50-70	46-54

5.2 Predhodne sestave asfaltnih zmesi

Na osnovi rezultatov preiskav vhodnih materialov smo s pomočjo programa Rampein [19], [20], [21] za prostorsko projektiranje asfaltnih zmesi, sprojektirali asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4. Od tega smo sprojektirali eno asfaltno zmes brez dodanega livarskega peska (0 %) in štiri z različnim deležem livarskega peska, in sicer: 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska.

Vhodni materiali, ki smo jih uporabili v projektiranih asfaltnih zmesih so: kameni agregat Očura, kamena moka Očura, livarski pesek in bitumen B50/70. Kameni agregat in kamena moka v nadaljevanju pojmujejo kameni material Očura.

V podjetju Ramtech d.o.o. je bila točno določena analitična formulacija projektiranja sestave asfaltnih zmesi, ki izpolnjujejo zahteve projektiranja (koncentracija votlin ter zapolnjenost votlin z bitumnom). Razvita je bila enačba 5.1, s katero je mogoče izračunati potrebno količina bitumna, za doseganje katerekoli kombinacije koncentracije votlin in zapolnjenosti votlin z bitumnom.

$$\%masB/AZ = \frac{\frac{CV/AV_{PROJ}}{100} \rho_B}{\frac{CV/AV_{PROJ}}{100} \rho_B + \rho_z + \left(100 - \frac{CV/AV_{PROJ}}{100} \cdot \frac{CV/AV_{PROJ}}{VFB_{PROJ}}\right) \rho_{KM}}{VFB_{PROJ}}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Kjer je: $masB/AZ$ – masa bitumna v asfaltni zmesi (%), CV/AV_{PROJ} – koncentracija votlin v asfaltnem vzorcu (%), VFB_{PROJ} – zapolnjenost votlin z bitumnom (%), ρ_B – gostota bitumna (Mg/m^3), ρ_z – gostota zraka (Mg/m^3) in ρ_{KM} – gostota kamenega materiala (Mg/m^3).

Asfalt je trokomponentni kompozit in iz tega izhaja, da se njegova sestava definira z volumskimi deleži (koncentracijami) posameznih sestavin vhodnih materialov (Slika 2-1):

1. zrnati kameni material ($V_{ZZ/A}$),
2. bitumen ($V_{B/A}$) in
3. zrak ($V_{V/A}$)

Po točno definiranim prostoru, ki ga zavzema asfalt z navedenimi koncentracijami ($V_{ZZ/A}$, $V_{B/A}$, $V_{V/A}$), je potrebno navesti še iz le-teh izvedene elemente asfalta, in sicer:

4. koncentracija votlin, ki se nahajajo med zrni kamenega materiala razporejenega v prostoru asfalta brez upoštevanja bitumna in
5. zapolnjenost predhodno navedenih votlin z bitumnom.

Za točno definiranje sestave poljubno projektirane asfaltne zmesi, sta potrebna najmanj dva od petih definiranih lastnosti, s katerimi je teoretično mogoče zložiti deset kombinacij po dva elementa sestave. Omeniti je potrebno, da je mogoče v postopku projektiranja asfalta uporabiti le devet od desetih kombinacij [5].

Razpon koncentracije votlin in zapolnjenosti votlin z bitumnom je definiran glede na zahtevano prometno obremenitev.

V postopku projektiranja sestave asfaltnih zmesi, katere zadovoljujejo predpisane zahteve in pogoje, je potrebno laboratorijsko preskusiti in analizirati vhodne surovine na naslednji način:

1. Kamenim frakcijam je potrebno s preskušanjem določiti:
 - granulometrijsko sestavo vseh frakcij vključenih v postopek projektiranja in
 - gostote vseh podfrakcij.
2. Bitumnu je potrebno s preskušanjem določiti:
 - gostoto in
 - ekviviskozno temperaturo mešanja in zbivanja asfalta.

Glavni del postopka projektiranja sestave asfaltne zmesi na osnovi predpisanih zahtev (koncentracija votlin in zapolnjenost votlin z bitumnom) je določitev deleža bitumna v asfaltni zmesi, s katero se izpolnijo omenjene zahteve. Ta del postopka projektiranja je rešljiv z enačbo 5.1 v primeru, ko so poznane (izmerjene) gostote vhodnih surovin asfalta.

Sledi del postopka projektiranja s katerim se ugotovi delež kamene moke (zrna manjša od 0,063 mm) v kamenem materialu, kateri s projektirano granulometrijo (zrna večja od 0,063 mm) kamenega skeleta in najdenim deležem bitumna v projektiranem vzorcu daje točno predpisane koncentracije votlin in zapolnjenosti votlin z bitumnom.

5.2.1 Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska

Vrste in količine vhodnih materialov, ki smo jih vstavili v program za prostorsko projektiranje asfaltne zmesi brez dodanega livarskega peska AC 8 surf B50/70 A4 so prikazane v preglednici 5-9. V preglednici 5-10 in na sliki 6-1 je prikazana optimalna granulometrijska sestava asfaltne zmesi, optimalne lastnosti projektirane asfaltne zmesi, pa so podane v preglednici 5-11.

Preglednica 5-9: Vhodne količine kamenega materiala Očura in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska

Podfrakcija na situ (mm)	Kameni material Očura (g)	Livarski pesek (g)	Bitumen B50/70 (g)
0,00 do 0,063	86,9	0	71,7
0,063 do 0,25	77,6	0	
0,25 do 0,71	127,1	0	
0,71 do 2,0	240,7	0	
2,0 do 4,0	264,0	0	
4,0 do 8,0	374,9	0	
8,0 do 11,2	26,8	0	
SKUPAJ	1197,97	0	

Preglednica 5-10: Granulometrijska sestava asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1[26], [27]

Premer sita v (mm)	Projektiran presevek skozi sito (%mas)	Priporočene vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
0,063	7,3	6,0 do 13,0
0,25	14	11 do 27
0,71	24	/
2,0	44	40 do 68
4,0	67	60 do 85
8,0	98	90 do 100
11,2	100	100

Preglednica 5-11: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 [28] in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1 [26], [27]

Lastnosti po SIST EN 13108-20	Projektirane vrednosti	Zahtevane vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
Optimalna vsebnost votlin (% V/V)	4,30	$V_{\min}1,5$ do $V_{\max}5$
Optimalni delež bitumna (% m/m)	5,65	/
Prostorska vsebnost bitumna (% V/V)	13,66	/
Zapolnjenost votlin z bitumnom (% V/V)	76,07	$VFB_{\min}75$ do $VFB_{\max}89$
Gostota vhodnega bitumna (kg/m^3)	1,020	/
Gostota kamene zmesi (Mg/m^3)	2,808	/
Največja gostota asfaltna zmesi (Mg/m^3)	2,564	/

5.2.2 Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska

V preglednici 5-12 so podane vrste in količine vhodnih materialov, ki smo jih uporabili za prostorsko projektiranje asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z dodanimi 3% livarskega peska. Kot izhodne podatke smo dobili optimalno granulometrijsko sestavo (Preglednica 5-13 In Slika 6-2) ter optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltna zmesi, ki so podane v preglednici 5-14.

Preglednica 5-12: Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % livarskega peska

Podfrakcija na situ (mm)	Kameni material Očura (g)	Livarski pesek (g)	Bitumen B50/70 (g)
0,00 do 0,063	89,4	0,3	71,4
0,063 do 0,25	69,9	12,8	
0,25 do 0,71	113,6	22,2	
0,71 do 2,0	216,3	0,4	
2,0 do 4,0	239,7	0	
4,0 do 8,0	401,0	0	
8,0 do 11,2	29,0	0	
SKUPAJ	1158,90	35,70	
SKUPAJ KM+LP	1194,60		

Preglednica 5-13: Granulometrijska sestava asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1[26], [27]

Premer sita v (mm)	Projektiran presevek skozi sito (%mas)	Priporočene vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
0,063	7,5	6,0 do 13,0
0,25	14,4	11 do 27
0,71	25,8	/
2,0	43,0	40 do 68
4,0	64,0	60 do 85
8,0	97,6	90 do 100
11,2	100,0	100

Preglednica 5-14: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 [28] in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1 [26], [27]

Lastnosti po SIST EN 13108-20	Projektirane vrednosti	Zahtevane vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
Optimalna vsebnost votlin (% V/V)	4,30	$V_{\min}1,5$ do $V_{\max}5$
Optimalni delež bitumna (% m/m)	5,61	/
Prostorska vsebnost bitumna (% V/V)	14,22	/
Zapolnjenost votlin z bitumnom (% V/V)	75,99	$VFB_{\min}75$ do $VFB_{\max}89$
Gostota vhodnega bitumna (kg/m^3)	1,020	/
Gostota kamene zmesi (Mg/m^3)	2,828	/
Največja gostota asfaltne zmesi (Mg/m^3)	2,571	/

5.2.3 Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska

V računalniški program Rampein [19], [20], [21] za prostorsko projektiranje asfaltnih zmesi smo vnesli vhodne podatke, to je količine in vrste vhodnih materialov, ki so prikazani v preglednici 5-15. Kot izhodne podatke smo dobili optimalno predhodno sestavo asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska z optimalno granulometrijsko sestavo, ki je prikazana v preglednici 5-16 in na sliki 6-3 ter optimalne fizikalno mehanske lastnosti (Preglednica 5-17).

Preglednica 5-15: Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % livarskega peska

Podfrakcija na situ (mm)	Kameni material Očura (g)	Livarski pesek (g)	Bitumen B50/70 (g)
0,00 do 0,063	86,6	0,6	69,3
0,063 do 0,25	67,6	25,6	
0,25 do 0,71	109,9	44,5	
0,71 do 2,0	209,3	0,7	
2,0 do 4,0	232,1	0	
4,0 do 8,0	391,1	0	
8,0 do 11,2	28,3	0	
SKUPAJ	1124,92	71,40	
SKUPAJ KM+LP	1196,32		

Preglednica 5-16: Granulometrijska sestava asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1[26], [27]

Premer sita v (mm)	Projektiran presevek skozi sito (%mas)	Priporočene vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
0,063	7,3	6,0 do 13,0
0,25	15,1	11 do 27
0,71	28,0	/
2,0	45,5	40 do 68
4,0	64,9	60 do 85
8,0	97,6	90 do 100
11,2	100,0	100

Preglednica 5-17: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 [28] in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1 [26], [27]

Lastnosti po SIST EN 13108-20	Projektirane vrednosti	Zahtevane vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
Optimalna vsebnost votlin (% V/V)	4,30	$V_{\min}1,5$ do $V_{\max}5$
Optimalni delež bitumna (% m/m)	5,47	/
Prostorska vsebnost bitumna (% V/V)	13,79	/
Zapolnjenost votlin z bitumnom (% V/V)	75,43	$VFB_{\min}75$ do $VFB_{\max}89$
Gostota vhodnega bitumna (kg/m^3)	1,020	/
Gostota kamene zmesi (Mg/m^3)	2,818	/
Največja gostota asfaltne zmesi (Mg/m^3)	2,570	/

5.2.4 Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska

Za pripravo optimalne asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska smo v program Rampein [19], [20], [21], ki se uporablja za prostorsko projektiranje, vnesli podatke (vrsto materiala in količine) vhodnih materialov: kamenega materiala Očura, livarskega peska in cestogradbenega bitumna B50/70. Količine vhodnih materialov so prikazane v preglednici 5-18. Optimalna granulometrijska sestava asfaltne zmesi je prikazana v preglednici 5-19 in na sliki 6-4. V preglednici 5-20 so prikazane optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi.

Preglednica 5-18: Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % livarskega peska

Podfrakcija na situ (mm)	Kameni material Očura (g)	Livarski pesek (g)	Bitumen B50/70 (g)
0,00 do 0,063	89,5	1,2	68,6
0,063 do 0,25	54,1	38,3	
0,25 do 0,71	86,2	66,5	
0,71 do 2,0	167,0	1,1	
2,0 do 4,0	191,1	0	
4,0 do 8,0	465,4	0	
8,0 do 11,2	34,3	0	
SKUPAJ	1087,64	107,00	
SKUPAJ KM+LP	1194,64		

Preglednica 5-19: Granulometrijska sestava asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1[26], [27]

Premer sita v (mm)	Projektiran presevek skozi sito (%mas)	Priporočene vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
0,063	7,6	6,0 do 13,0
0,25	15,3	11 do 27
0,71	28,1	/
2,0	42,2	40 do 68
4,0	58,2	60 do 85
8,0	97,1	90 do 100
11,2	100,0	100

Preglednica 5-20: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 [28] in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1 [26], [27]

Lastnosti po SIST EN 13108-20	Projektirane vrednosti	Zahtevane vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
Optimalna vsebnost votlin (% V/V)	4,25	$V_{\min}1,5$ do $V_{\max}5$
Optimalni delež bitumna (% m/m)	5,43	/
Prostorska vsebnost bitumna (% V/V)	13,66	/
Zapolnjenost votlin z bitumnom (% V/V)	75,47	$VFB_{\min}75$ do $VFB_{\max}89$
Gostota vhodnega bitumna (kg/m^3)	1,020	/
Gostota kamene zmesi (Mg/m^3)	2,808	/
Največja gostota asfaltne zmesi (Mg/m^3)	2,564	/

5.2.5 Asfaltna zmes AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % dodanega livarskega peska

Vrste in količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in cestogradbenega bitumna B50/70, ki smo jih vstavili v program za prostorsko projektiranje asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % livarskega peska, so prikazane v preglednici 5-21. V preglednici 5-22 in na sliki 6-5 je prikazana optimalna granulometrijska sestava asfaltne zmesi, medtem ko so optimalne lastnosti projektirane asfaltne zmesi podane v preglednici 5-23.

Preglednica 5-21: Vhodne količine kamenega materiala Očura, livarskega peska in bitumna B50/70 za projektiranje asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % livarskega peska

Podfrakcija na situ (mm)	Kameni material Očura (g)	Livarski pesek (g)	Bitumen B50/70 (g)
0,00 do 0,063	84,7	1,6	69,3
0,063 do 0,25	50,5	50,9	
0,25 do 0,71	80,3	88,5	
0,71 do 2,0	156,2	1,4	
2,0 do 4,0	179,7	0	
4,0 do 8,0	460,6	0	
8,0 do 11,2	34,0	0	
SKUPAJ	1046,10	142,50	
SKUPAJ KM+LP	1188,60		

Preglednica 5-22: Granulometrijska sestava asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska in priporočene mejne vrednosti po SIST EN 1038-1[26], [27]

Premer sita v (mm)	Projektiran presevek skozi sito (%mas)	Priporočene vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
0,063	7,3	6,0 do 13,0
0,25	15,8	11 do 27
0,71	30,0	/
2,0	43,3	40 do 68
4,0	58,4	60 do 85
8,0	97,1	90 do 100
11,2	100,0	100

Preglednica 5-23: Optimalne fizikalno mehanske lastnosti projektirane asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % dodanega livarskega peska po SIST EN 13108-20 [28] in zahtevane mejne vrednosti po SIST EN 1038-1 [26], [27]

Lastnosti po SIST EN 13108-20	Projektirane vrednosti	Zahtevane vrednosti po SIST EN 1038-1:2008
Optimalna vsebnost votlin (% V/V)	4,25	$V_{\min}1,5$ do $V_{\max}5$
Optimalni delež bitumna (% m/m)	5,51	/
Prostorska vsebnost bitumna (% V/V)	13,79	/
Zapolnjenost votlin z bitumnom (% V/V)	75,64	$VFB_{\min}75$ do $VFB_{\max}89$
Gostota vhodnega bitumna (kg/m^3)	1,020	/
Gostota kamene zmesi (Mg/m^3)	2,798	/
Največja gostota asfaltne zmesi (Mg/m^3)	2,553	/

5.3 Preiskave asfaltnih zmesi

Po sprojektiranih optimalnih predhodnih sestavah asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez in z različnimi odstotki (3 %, 6 %, 9 %, 12 %) dodanega livarskega peska, ki so podane v poglavjih od 5.2.1 do 5.2.5 smo v laboratoriju zamešali asfaltne zmesi, in sicer pri 120 °C in 150 °C. Tako pripravljenim asfaltnim zmesem smo določili delež topnega veziva, lastnosti ekstrahirane bitumna ter fizikalne in mehanske lastnosti, katerih rezultati so prikazani v preglednicah od 5-24 do 5-29.

5.3.1 Topni delež veziva in lastnosti ekstrahirane bitumna

Rezultati topnega deleža veziva, ki smo ga določali po metodi, ki jo predpisuje standard SIST EN 12697-1 [45] so prikazani v razpredelnici 5-24.

Iz, v laboratoriju zmešane projektirane asfaltne zmesi, smo z uporabo topila in vakuumsko destilacijo z rotacijskim uparjalnikom skladno s SIST EN 12697-3 [46] ekstrahirali bitumen,

kateremu smo določila točko zmečičišča [43] in penetracijo z iglo [44]. Rezultati so podani v preglednici 5-25.

Preglednica 5-24: Topni delež veziva v asfaltnih zmesih brez livarskega peska ter z dodatkom 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C

Temperatura priprave asfaltne zmesi (°C)	120					150				
	0	3	6	9	12	0	3	6	9	12
Delež livarskega (% m/m)										
Vsebnost bitumna (% m/m)	5,8	5,8	5,4	6,0	5,2	5,8	5,5	5,3	5,5	5,8

Preglednica 5-25: Lastnosti ekstrahirane bitumna iz asfaltnih zmesih brez livarskega peska ter 3 %, 6 %, 9 % in 12 % dodanega livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C

Temperatura priprave asfaltne zmesi (°C)	120					150				
	0	3	6	9	12	0	3	6	9	12
Delež livarskega (% m/m)										
Točka zmečičišča (°C)	51,0	59,8	54,2	57,2	52,2	55,2	56,0	53,4	54,6	56,8
Penetracija z iglo (mm/10)	58	34	45	42	55	45	40	47	44	48

5.3.2 Fizikalne lastnosti

Asfaltnim zmesem brez dodanega livarskega peska in z dodatkom različnega deleža, tj. 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska ter pripravljenih pri 120 °C in 150 °C smo z različnimi metodami določili fizikalne lastnosti.

V preglednici 5-26 so podani rezultati prostorninske gostote asfaltnih preskušancev (SIST EN 12697-6 [48]) in največje gostote asfaltnih zmesi (SIST EN 12697-5 [47]). V skladu s SIST EN 12697-8 [49] smo izračunali vsebnost votlin v asfaltnem preskušancu (enačba 3.3), prostorska vsebnost bitumna v asfaltni zmesi – VMA (enačba 3.5) in zapolnjenost votlin z bitumnom – VFB (enačba 3.4).

Preglednica 5-26: Prostorninska gostota asfaltnih preskušancev, največja gostota asfaltnih zmesi, vsebnost votlin, prostorska vsebnost bitumna v asfaltni zmesi – VMA, vsebnost votlin v mineralnem agregatu, delež mineralnega agregata, zapolnjenost votlin z bitumnom – VFB in gostota kamene zmesi v asfaltnih zmesih brez livarskega peska ter dodanim 3 %, 6 %, 9% in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C

Temperatura priprave asfaltne zmesi (°C)	120					150				
	0	3	6	9	12	0	3	6	9	12
Delež livarskega peska (% m/m)										
Prostorninska gostota asfaltnih preskušancev (Mg/m ³)	2,45 (0,006)*	2,44 (0,004)*	2,45 (0,006)*	2,44 (0,005)*	2,44 (0,004)*	2,45 (0,006)*	2,45 (0,004)*	2,44 (0,003)*	2,46 (0,004)*	2,43 (0,004)*
Največja gostota asfaltne zmesi (Mg/m ³)	2,582	2,559	2,573	2,582	2,553	2,582	2,595	2,577	2,589	2,556
Vsebnost votlin (% V/V)	5,3 (0,17)*	4,5 (0,17)*	5,0 (0,22)*	5,5 (0,10)*	4,3 (0,14)*	5,3 (0,17)*	5,6 (0,15)*	5,2 (0,13)*	5,0 (0,17)*	4,9 (0,15)*
Prostorska vsebnost bitumna v asfaltni zmesi – VMA (% V/V)	14,0	13,9	12,9	14,4	12,5	13,9	13,3	12,8	13,2	13,8
Vsebnost votlin v mineralnem agregatu (% V/V)	19,3	18,4	18,5	19,8	16,8	19,2	18,9	18,0	18,3	18,7
Delež mineralnega agregata (% V/V)	80,7	81,6	81,5	80,2	83,2	80,8	81,1	82,0	81,7	81,3
Zapolnjenost votlin z bitumnom - VFB (% V/V)	72,4	75,7	69,5	72,4	74,6	72,3	70,2	71,3	72,4	73,6
Gostota kamene zmesi (kg/m ³)	2853	2822	2840	2863	2785	2852	2853	2820	2844	2817

*Standardna deviacija rezultatov pri preiskavi

5.3.3 Mehanske lastnosti

V preglednicah od 5-27 do 5-29 so prikazani rezultati mehanskih lastnosti asfaltnih zmesi brez dodanega livarskega peska in z dodanim različnim deležem livarskega peska (3 %, 6%, 9% in 12 %) zmešanih pri 120 °C in 150 °C.

Rezultati preskusa, kjer smo določali odpornost na zgoščevanje asfaltnih zmesi po metodi, ki jo predpisuje standard SIST EN 12697-10 [50], so podani v preglednici 5-27.

Občutljivost asfaltnih preskušancev na vodo smo določali skladno s standardom SIST EN 12697-12 [51], kjer smo na podlagi določanja indirektnih nateznih trdnosti (SIST EN 12697-23 [52]) in enačbe 4.4 izračunali razmerje indirektna natezne trdnosti mokrih vzorcev in indirektna natezne trdnosti suhih vzorcev, ki določa občutljivost asfaltnih preskušancev na vodo. Istočasno smo določili tudi silo izmerjeno pri zlomu mokrega in suhega vzorca asfaltnega preskušanca. Rezultati so podani v preglednici 5-28.

Za preskus po Marshall-u (SIST EN 12697-34 [56]), kjer smo določali stabilnost, deformacijo, tangencialno deformacijo in togost asfaltnih preskušancev so rezultati podani v preglednici 5-29.

Preglednica 5-27: Odpornost na zgoščevanje asfaltnih zmesi brez dodanega livarskega peska in dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C

Temperatura priprave asfaltne zmesi (°C)	120					150				
	0	3	6	9	12	0	3	6	9	12
Delež livarskega (% m/m)										
Odpornost na zgoščevanje T(21Nm)	47,3	42,9	40,0	32,6	31,0	41,7	37,3	34,6	31,3	26,8
Standardna deviacija	1,15	1,81	0,15	1,51	1,53	0,55	2,17	1,63	2,55	1,98

Preglednica 5-28: Natezna trdnost, sila izmerjena pri zlomu vzorcev brez in po delovanju vode ter občutljivost na vodo podana kot razmerje med nateznima trdnostima asfaltnih zmesi brez dodanega livarskega peska ter dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C

Temperatura priprave asfaltne zmesi (°C)	120					150				
	0	3	6	9	12	0	3	6	9	12
Delež livarskega (% m/m)										
Natezna trdnost po delovanju vode ITS _w (kPa)	764 (17,8)*	561 (42,0)*	707 (28,2)*	705 (30,7)*	463 (24,3)*	1120 (33,7)*	926 (23,3)*	487 (8,5)*	634 (54,7)*	633 (61,2)*
Natezna trdnost brez delovanja vode ITS _d (kPa)	1188 (32,0)*	868 (7,0)*	1138 (180,1)*	1086 (160,8)*	1128 (20,6)*	1340 (33,7)*	1277 (23,3)*	796 (8,5)*	1031 (54,7)*	1063 (61,2)*
Sila izmerjena pri zlomu vzorca po delovanju vode (kN)	8,12	5,68	7,20	7,17	4,63	11,42	9,46	5,02	6,18	6,33
Sila izmerjena pri zlomu vzorca brez delovanja vode (kN)	12,57	8,80	11,57	11,56	12,20	13,73	13,08	8,12	10,56	11,42
ITS _R =ITS _w /ITS _d (%)	64,3	64,6	62,1	64,9	41,0	83,6	72,5	61,2	61,6	59,5

*Standardna deviacija rezultatov pri preiskavi

Preglednica 5-29: Stabilnost, deformacija, tangencialna deformacija in togost asfaltnih preskušancev asfaltnih zmesi brez livarskega peska, dodanim 3 %, 6 %, 9 % in 12 % livarskega peska pripravljene pri 120 in 150 °C

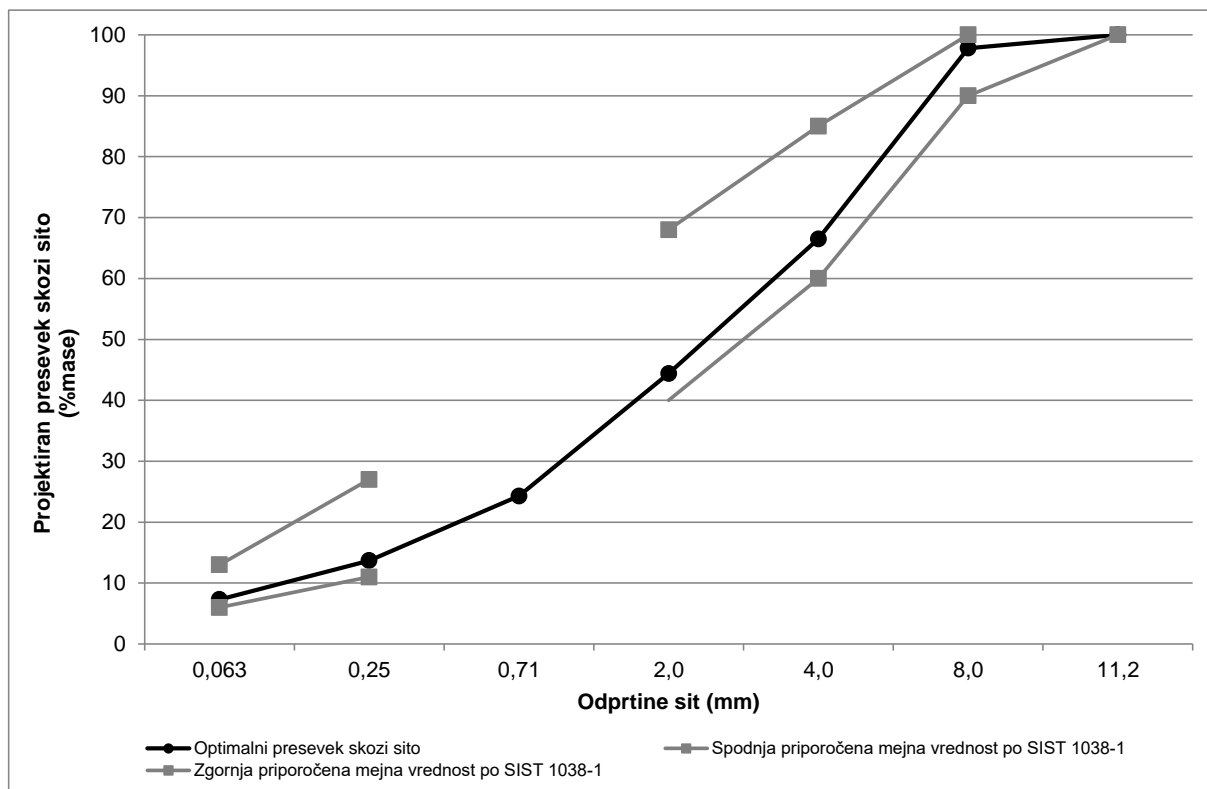
Temperatura priprave asfaltni zmesi (°C)	120					150				
	0	3	6	9	12	0	3	6	9	12
Delež livarskega (% m/m)										
Stabilnost (kN)	8,1 (0,47)*	8,9 (0,20)*	9,0 (0,57)*	9,0 (0,21)*	9,9 (0,47)*	13,2 (0,44)*	12,7 (0,30)*	13,7 (0,54)*	12,3 (0,61)*	11,9 (0,75)*
Deformacija (mm)	2,4 (0,26)*	2,0 (0,06)*	2,3 (0,19)*	2,3 (0,07)*	2,3 (0,13)*	2,4 (0,24)*	2,2 (0,10)*	2,3 (0,21)*	2,3 (0,29)*	2,9 (0,06)*
Tangencialna deformacija (mm)	1,3 (0,17)*	1,0 (0,06)*	1,3 (0,10)*	1,1 (0,07)*	1,3 (0,18)*	1,1 (0,22)*	1,1 (0,08)*	1,1 (0,14)*	1,1 (0,21)*	1,6 (0,10)*
Togost (kN/mm)	3,5 (0,26)*	4,5 (0,10)*	4,0 (0,50)*	4,0 (0,14)*	4,4 (0,38)*	5,7 (0,48)*	5,7 (0,26)*	6,2 (0,70)*	5,6 (0,52)*	4,0 (0,25)*

*Standardna deviacija rezultatov pri preiskavi

6 DISKUSIJA

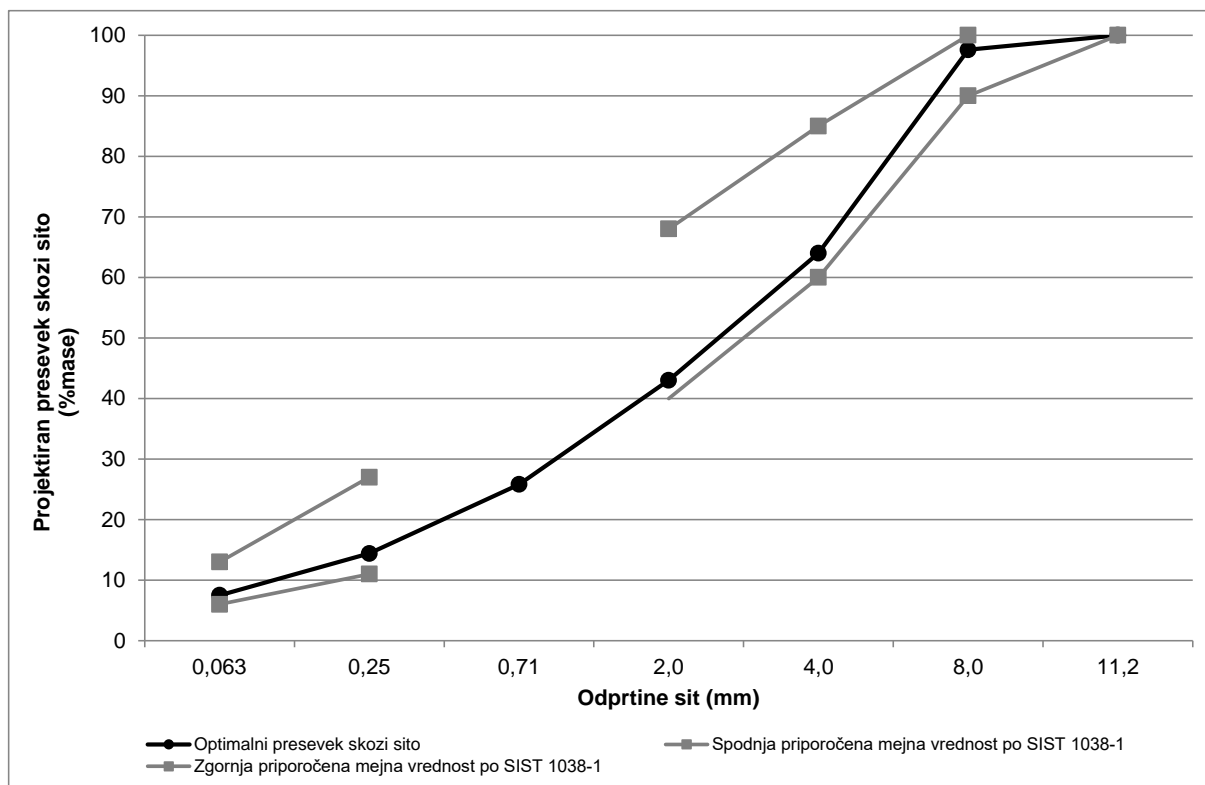
6.1 Granulometrijska sestava asfaltne zmesi

V grafih na slikah od 6-1 do 6-5 so prikazane optimalne granulometrijske sestave asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska in z dodatkom livarskega peska v različnih deležih, in sicer 3 %, 6 %, 9 % in 12 %, ki smo jih dobili s pomočjo prostorskega projektiranja s programom Rampein.



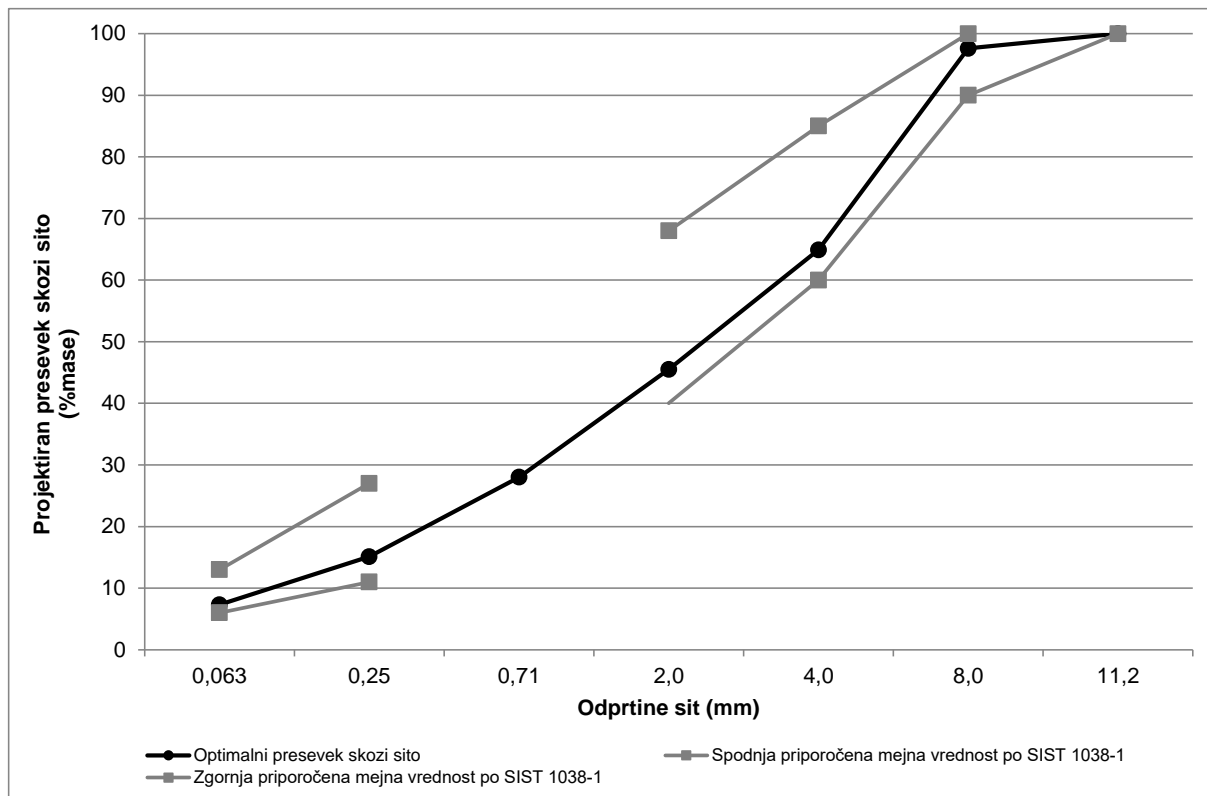
Slika 6-1: Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska

Iz grafa na sliki 6-1, kjer je prikazana granulometrijska sestava delovne sestave asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 brez dodanega livarskega peska je razvidno, da krivulja poteka v priporočenem območju, ki ga določa standard SIST 1038-1 [26], [27] za obrabno zaporne asfaltne zmesi AC 8 surf za lahko prometno obremenitev.



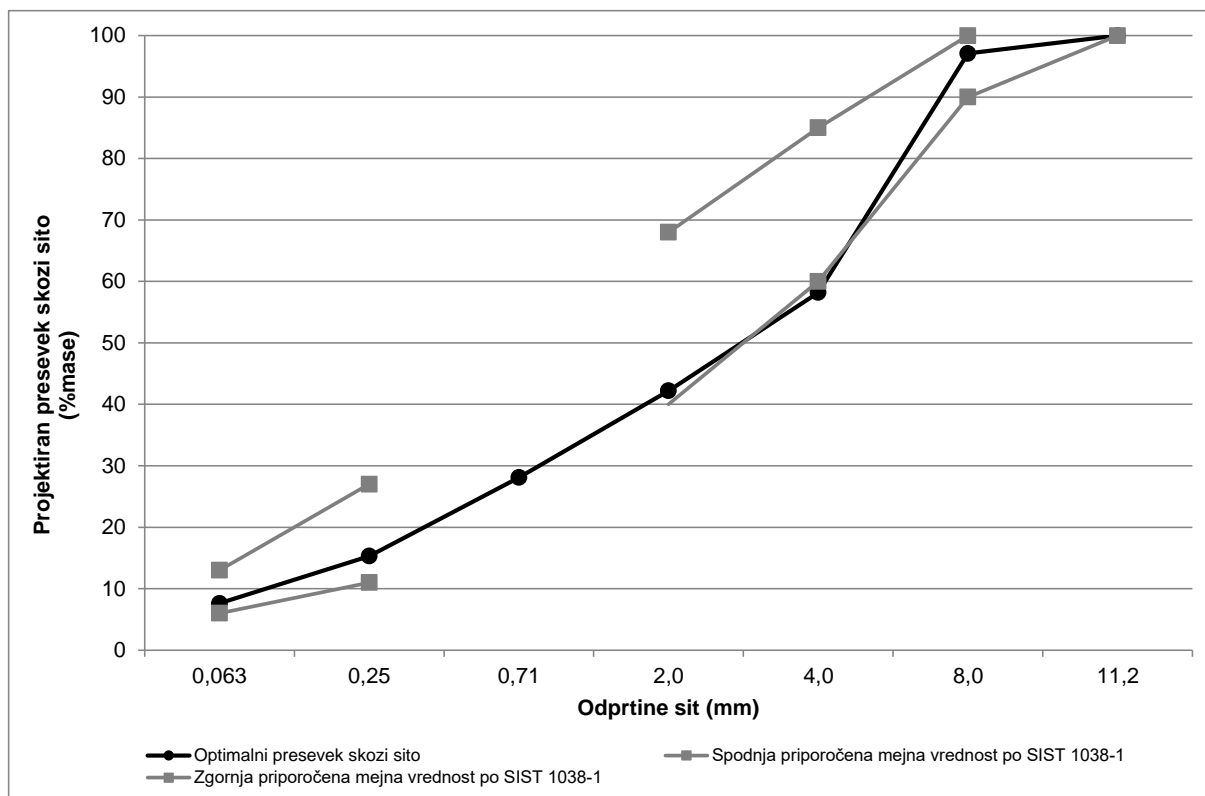
Slika 6-2: Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 s 3 % dodanega livarskega peska

Optimalna granulometrijska sestava asfaltna zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 3 % dodanega livarskega peska ustreza priporočenim mejnim vrednostim, ki jih predpisuje standard SIST 1038-1[26], [27] za tovrstno asfaltno zmes. Krivulja granulometrijske sestave poteka znotraj priporočenih mejnih vrednosti, kar je razvidno iz grafa na sliki 6-2.



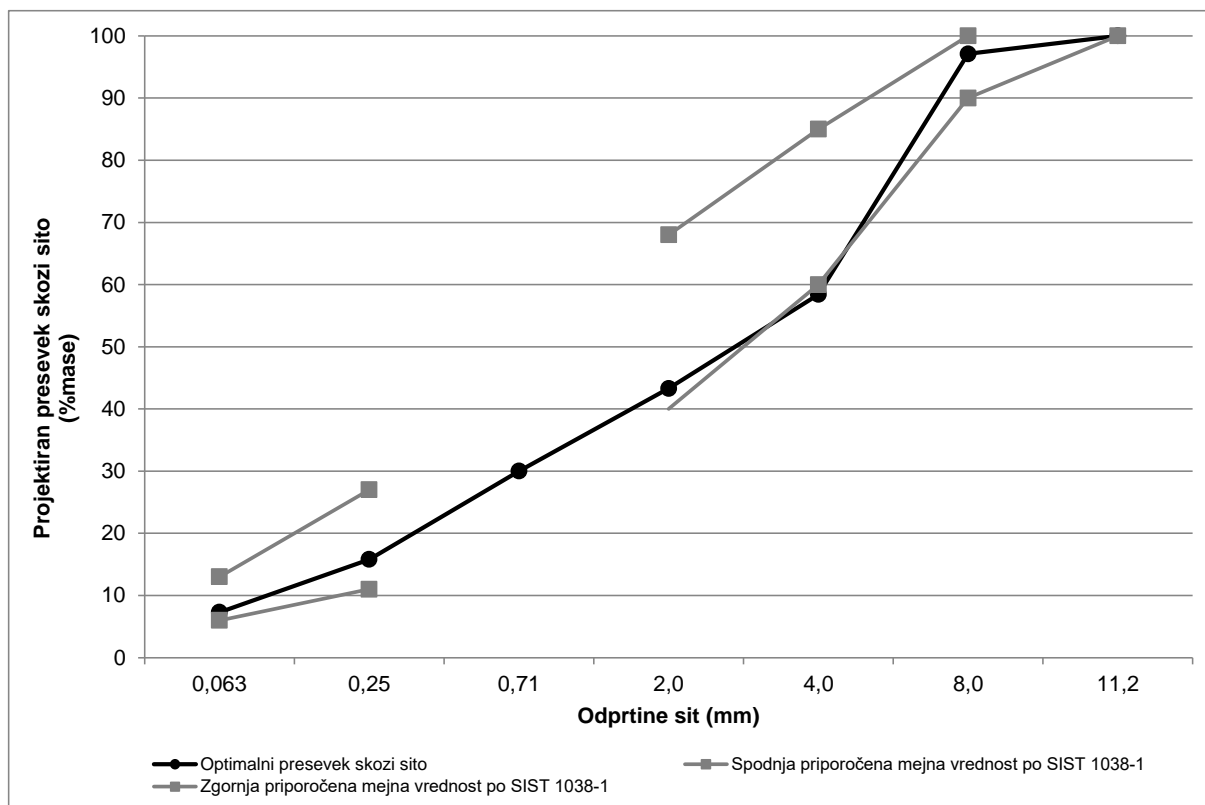
Slika 6-3: Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 s 6 % dodanega livarskega peska

Krivulja optimalne granulometrijske sestave asfaltno zmesi AC 8 surf B50/70 A4, kateri smo dodali 6 % livarskega peska, poteka znotraj priporočenih mejnih vrednosti (SIST 1038-1[26], [27]), kar je razvidno iz grafa na sliki 6-3.



Slika 6-4: Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 z 9 % dodanega livarskega peska

Iz grafa na sliki 6-4, kjer je prikazana optimalna granulometrijska sestava asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 9% dodanega livarskega peska je razvidno, da krivulja poteka v spodnjem priporočenem mejnem območju (SIST 1038-1[18], [19]). Na situ 4,0 mm granulometrijska krivulja za 2 % (mase) odstopa od priporočene spodnje mejne vrednosti.



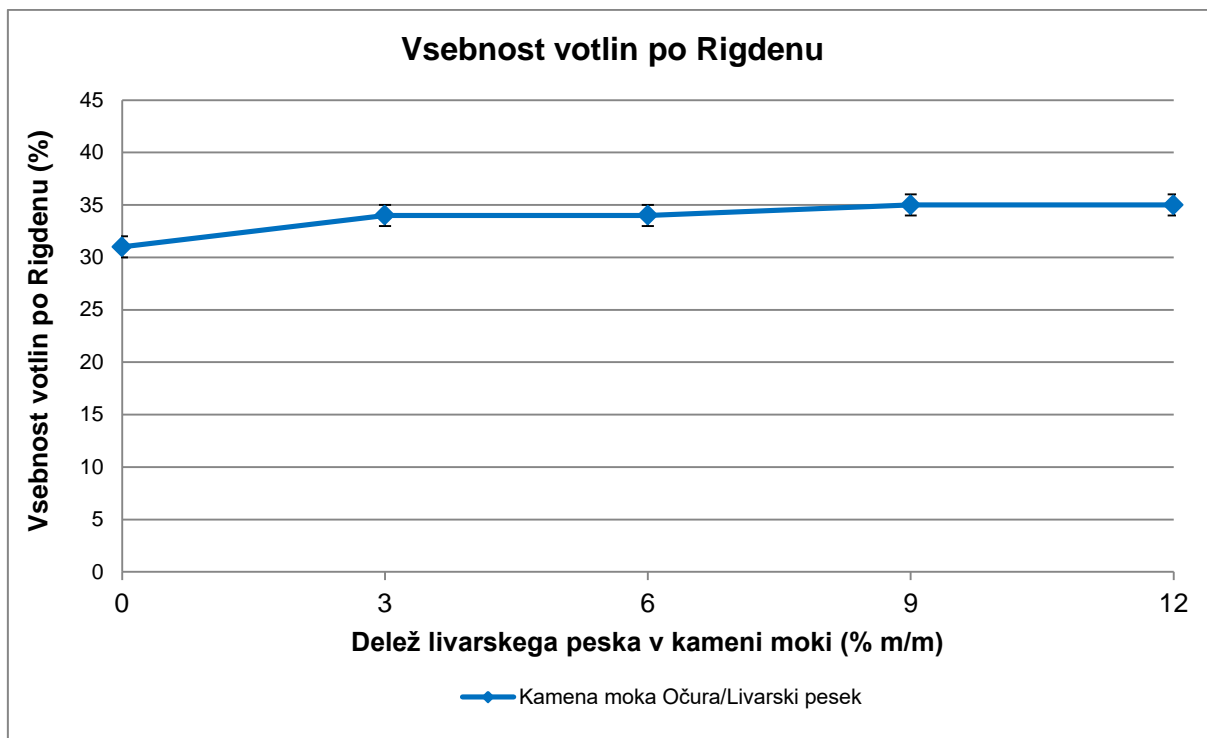
Slika 6-5: Optimalna granulometrijska sestava AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % dodanega livarskega peska

Granulometrijska sestava asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 z 12 % dodanega livarskega peska je prikazana na grafu na sliki 6-5 iz katerega je razvidno, da granulometrijska krivulja poteka blizu spodnjih priporočenih mejnih vrednostih, ki jih predpisuje standard SIST 1038-1 [18], [19], razen na situ 8,0 mm, kjer je bližje zgornji priporočeni mejni vrednosti. Na situ 4,0 mm pa je zaznati odstopanje od priporočene spodnje meje za 5 % (mase).

6.2 Vhodni materiali

6.2.1 Kamena moka in livarski pesek

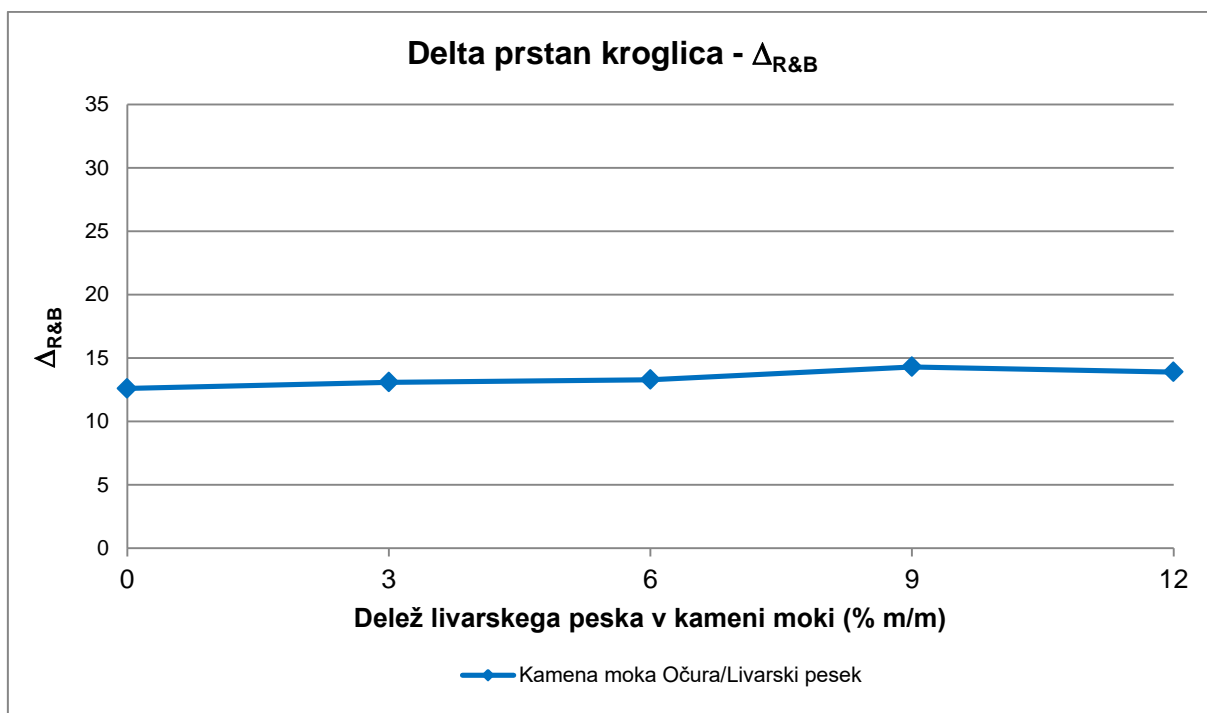
Vpliv livarskega peska, ki smo ga dodali v različnih deležih (3 %, 6 %, 9 % in 12 %) kameni moki Očura, na vsebnost votlin po Rigdenju je prikazan na sliki 6-6, na delta prstan – kroglica $\Delta_{R\&B}$ pa na sliki 6-7.



Slika 6-6: Vsebnost votlin po Rigdenu kamene moke Očura v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v kameno moko Očura

Iz grafa na sliki 6-6 je razvidno, da ima uporabljena kamena moka kot vhodni material brez dodanega deleža livarskega peska vsebnost votlin po Rigdenu 31 %, medtem ko ima livarski pesek vsebnost votlin 40 % (Preglednica 5-6). Z dodajanjem deleža livarskega peska kamenu moki Očura se vsebnost votlin po Rigdenu zviša na 34 % (pri dodanih 3 % in 6 % livarskega peska) oz. 35 % (pri 9 % in 12 % dodanega livarskega peska). Iz tega lahko sklepamo, da z višanjem deleža livarskega peska v kameno moko bistveno ne vplivamo na vsebnost votlin v mešanici kamene moke Očura in livarskega peska.

Deleži kamene moke in livarskega peska v asfaltnih zmesih so podani kot masni deleži, zato smo pri omenjenih odstotkih dodanega livarskega peska v asfaltni zmesi (3 %, 6 %, 9 % in 12 %) upoštevali mešanico kamene moke in livarskega peska oziroma njuno masno razmerje na situ 0,125 mm.



Slika 6-7: Delta prstan-kroglica kamene moke Očura v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v kameno moko Očura

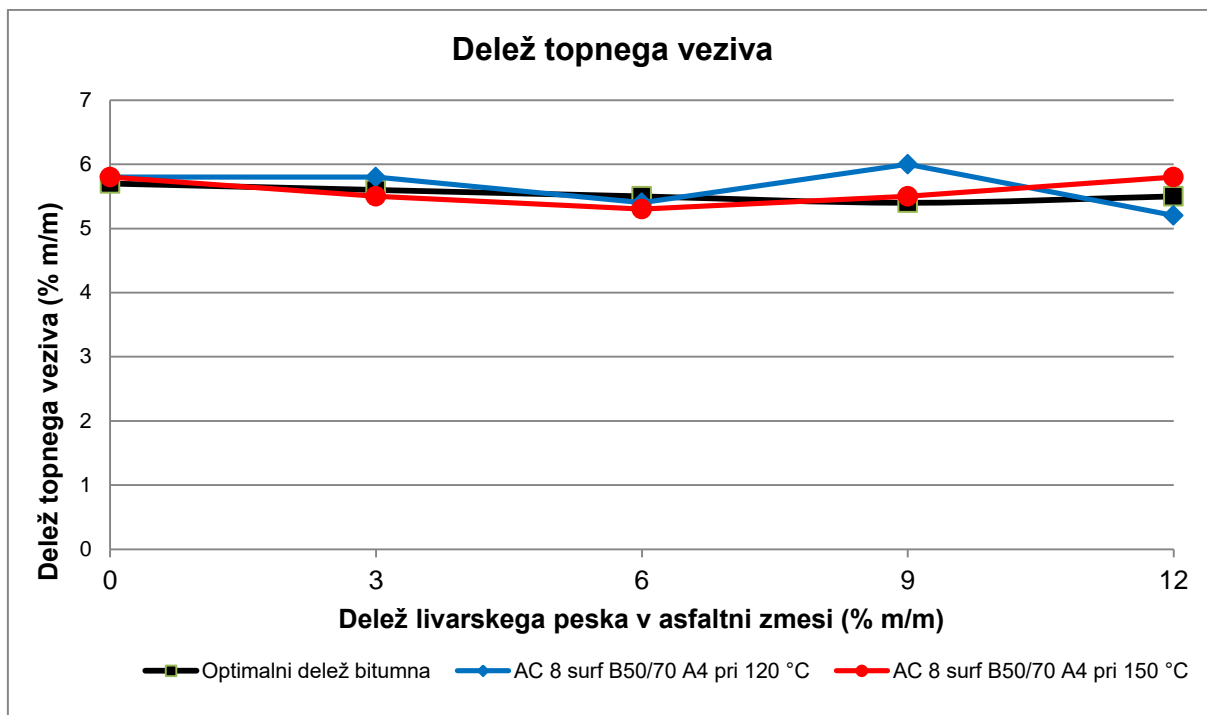
Iz grafa na sliki 6-7 je razvidno, da z dodatkom livarskega peska k kameni moki Očura, $\Delta_{R\&B}$ narašča. Vrednost $\Delta_{R\&B}$ kamene moke Očura je 13, livarskega peska pa 31 (Preglednica 5-7). Vrednosti $\Delta_{R\&B}$ z dodatkom livarskega peska se gibljejo od 13 do 14. Ugotavljamo, da livarski pesek nima bistvenega vpliva na vrednosti $\Delta_{R\&B}$.

6.3 Asfaltna zmes

6.3.1 Topni delež veziva

Za vse laboratorijsko proizvedene asfaltno zmesi z različno dodanimi deleži livarskega peska smo določili topne deleže veziva, in sicer v asfaltnih mešanica pripravljanih pri 120 °C in 150 °C (Slika 6-8). Optimalni deleži bitumna za posamezne asfaltno zmesi AC 8 surf B50/70 A4 so podani v preglednicah 5-11, 5-14, 5-17, 5-20 in 5-23.

Iz asfaltnih zmesi proizvedenih pri 120 in 150 °C brez in z dodatkom livarskega peska smo ekstrahirali bitumen, kateremu smo določali vpliv temperature priprave asfaltno zmesi in vpliv različnih deležev livarskega peska (3 %, 6 %, 9 % in 12 %) na točko znehčišča – PK (Slika 6-9) in penetracijo (Slika 6-10).



Slika 6-8: Delež topnega veziva v asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Asfaltna zmes pripravljena brez dodanega livarskega peska (0 %) pri 120°C in 150°C vsebuje praktično isti delež topnega veziva (5,8 % (m/m)), ki sovpada optimalnemu deležu veziva, tj. 5,7 % (m/m).

Topni delež veziva v asfaltni zmesi s 3 % livarskega peska pripravljene pri 120 °C je višji za 0,2 % (m/m) pri 150 °C pa je nižji za 0,1 % (m/m) od optimalne vsebnosti topnega veziva (5,5 % (m/m)).

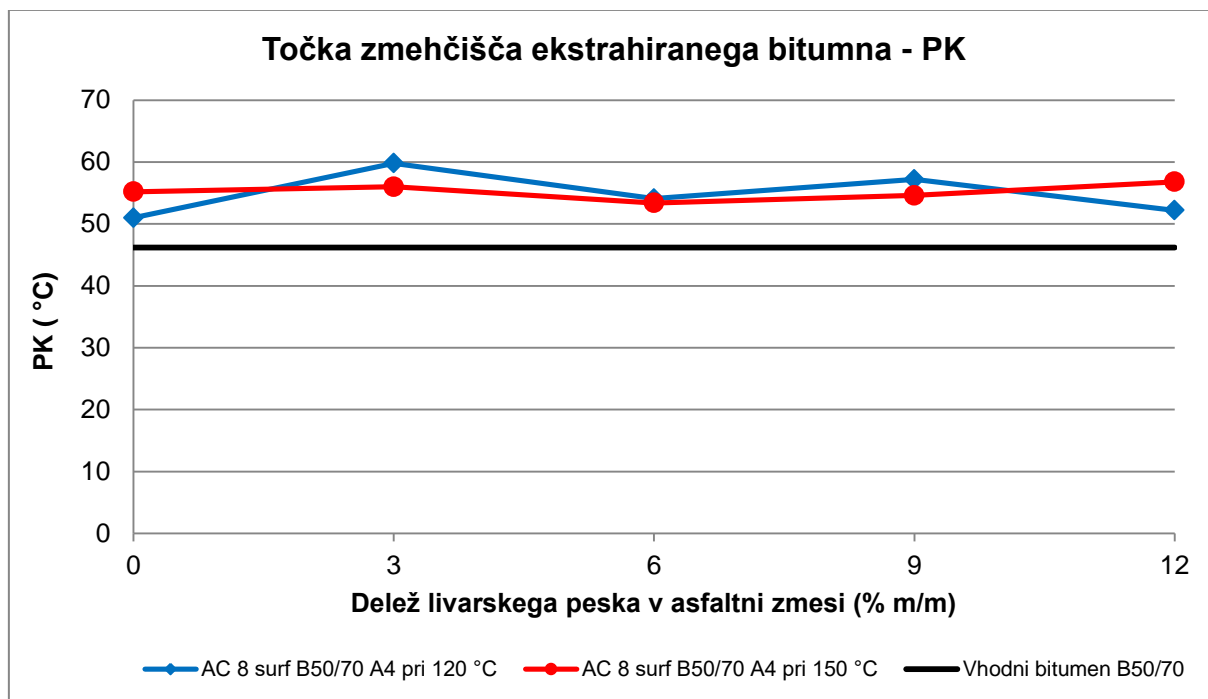
Optimalni delež topnega veziva pri asfaltni zmesi z dodatkom 6 % livarskega peska je 5,5 % (m/m). Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C znaša delež topnega veziva 5,4 % (m/m), kar je za 0,1 % (m/m) nižje od optimalne vsebnosti. Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C pa je delež topnega veziva nižji za 0,3 % (m/m) od optimalne vsebnosti in znaša 5,3 % (m/m) topnega veziva.

Delež topnega veziva v asfaltni zmesi z 9 % dodanim deležem livarskega peska pripravljene pri 120 °C je od optimalnega deleža veziva višji za 0,6 % (m/m), medtem ko je delež topnega veziva v asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C skoraj enak optimalnemu deležu, saj se je v primerjavi z optimalnim deležem topnega veziva (5,4 % (m/m)) zmanjšal za 0,1 % (m/m).

V asfaltni zmesi pripravljene z 12 % livarskega peska pri 120 °C in 150 °C topni delež veziva malenkost odstopa od optimalne vrednosti deleža veziva. V asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C je višji za 0,3 % (m/m), pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C pa je nižji za 0,3 % (m/m) od optimalne vsebnosti topnega veziva (5,5 % (m/m)).

Iz grafa na sliki 6-8 je razvidno, da optimalna vsebnost topnega deleža veziva z višanjem deleža livarskega peska pada za 0,1 % (m/m), razen pri dodanem 12 % livarskega peska, kjer se le-ta poveča na 5,5 % (m/m) kar predstavlja isti delež topnega veziva kot pri 6 %

dodanega livarskega peska. Pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska znaša optimalna vsebnost topnega veziva 5,7 % (m/m).

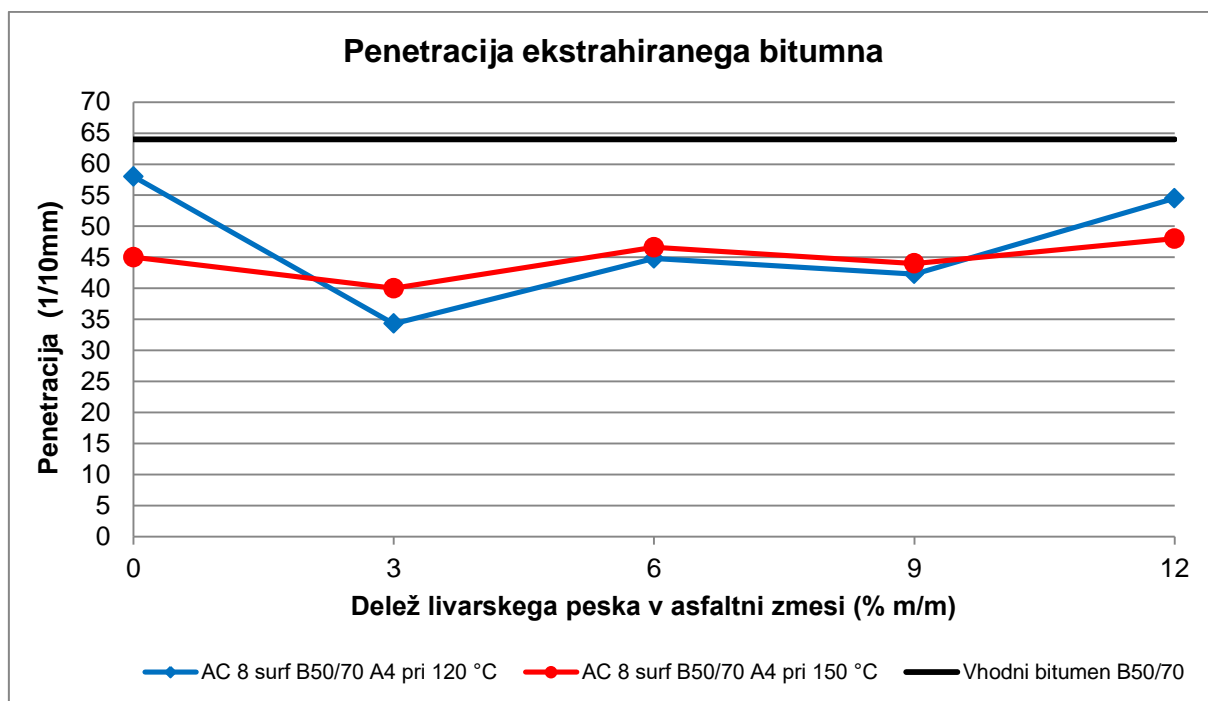


Slika 6-9: Točka zmečičišča - PK ekstrahiranega bitumna v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v asfaltni zmesi

Točka zmečičišča ekstrahiranega bitumna pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C brez dodanega livarskega peska je 51,0 °C. Z dodatkom livarskega peska 3 %, 6%, 9% in 12 % pa se točka zmečičišča ekstrahiranega bitumna giblje od 52,2 – 59,8 °C. Najbolj je otrdel bitumen z uporabo 3 % in najmanj z dodatkom 12 % livarskega peska.

Pri asfaltni zmesi proizvedeni pri 150 °C je najbolj otrdel bitumen z uporabo 12 % livarskega peska (PK = 56,8 °C), najmanj pa bitumen ekstrahiran iz asfaltne zmesi z uporabo 6 % livarskega peska z točk zmečičišča 53,4 °C. Iz grafa na sliki 6-9 je razvidno, da je vrednost PK ekstrahiranega bitumna brez dodanega livarskega peska (PK = 55,2 °C) višja od PK vhodnega bitumna za 19,5 %.

Standard SIST EN 12591 [37] podaja mejne vrednosti točke zmečičišča za cestogradbene bitumne, ki se za B50/70 gibajo od 46 do 54 °C. Vrednost PK vhodnega bitumna je 46,2 in ustreza zahtevam standarda. Ker lahko ekstrahiran bitumen otrdi za dve stopnji, mora točka zmečičišča ustrezati vsaj predpisanim mejnim vrednostim za B35/40 (50-58 °C). Ugotavljamo, da so vrednosti točke zmečičišča pri vseh ekstrahiranih bitumnih v tem območju, razen pri bitumnu ekstrahiranem iz asfaltne zmesi pripravljene pri 120 °C in z dodatkom 3 % livarskega peska, kjer je vrednost PK 59,8 °C.



Slika 6-10: Penetracija ekstrahiranega bitumna v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska v asfaltni zmesi

Iz grafa na sliki 6-10 je razvidno, da je penetracija ekstrahiranega bitumna iz asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljena pri 120 °C brez in z dodanim livarskim peskom nižja od vrednosti vhodnega bitumna katerega vrednost penetracije je 64 (1/10 mm). Penetracija ekstrahiranega bitumna pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska je 58 (1/10 mm). Pri dodatku livarskega peska pa je najvišjo penetracijo ekstrahiranega bitumna zaznati pri 12 % (55 (1/10 mm)), najnižjo pa pri dodatku 3 % livarskega peska kjer je vrednost penetracije padla na 34 (1/10 mm).

Penetracija ekstrahiranega bitumna iz asfaltne zmesi pripravljene pri 150 °C se je znižala glede na vrednosti penetracije vhodnega bitumna. Največjo vrednost penetracije, tj. 48 (1/10 mm) je zaznati pri uporabi 12 % livarskega peska, najmanjšo 40 (1/10 mm) pa pri dodanih 3 % livarskega peska. Penetracija ekstrahiranega bitumna iz asfaltne zmesi, kjer ni bilo dodanega livarskega peska je 45 (1/10 mm).

Vpliv temperature proizvodnje asfaltne zmesi je najbolj zaznati pri asfaltni zmesi brez in z dodatkom 3 % livarskega peska. Pri temperaturi priprave asfaltne zmesi 120 °C brez dodanega livarskega peska je penetracija višja za 28,9 % od istovrstne asfaltne zmesi pripravljene pri 150 °C. Z uporabo 3 % livarskega peska pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C pa je vrednost penetracije večja za 16,6 % v primerjavi z asfaltno zmesjo proizvedeno pri 120 °C.

Iz ugotovitev lahko sklepamo, da dodatek livarskega peska vpliva na znižanje penetracijskih vrednosti bitumna.

Mejne vrednosti za penetracijo vhodnega bitumna B50/70 so podane v standardu SIST EN 12591 [37] in znašajo 50-70 (1/10 mm). Ugotavljamo, da vrednosti penetracije vhodnega

bitumna ustrezajo zahtevam. Pri ekstrahiranem bitumnu se lahko penetracijska vrednost spremeni za največ dve stopnji in tako ustrezajo mejnim vrednostim za bitumen B35/40.

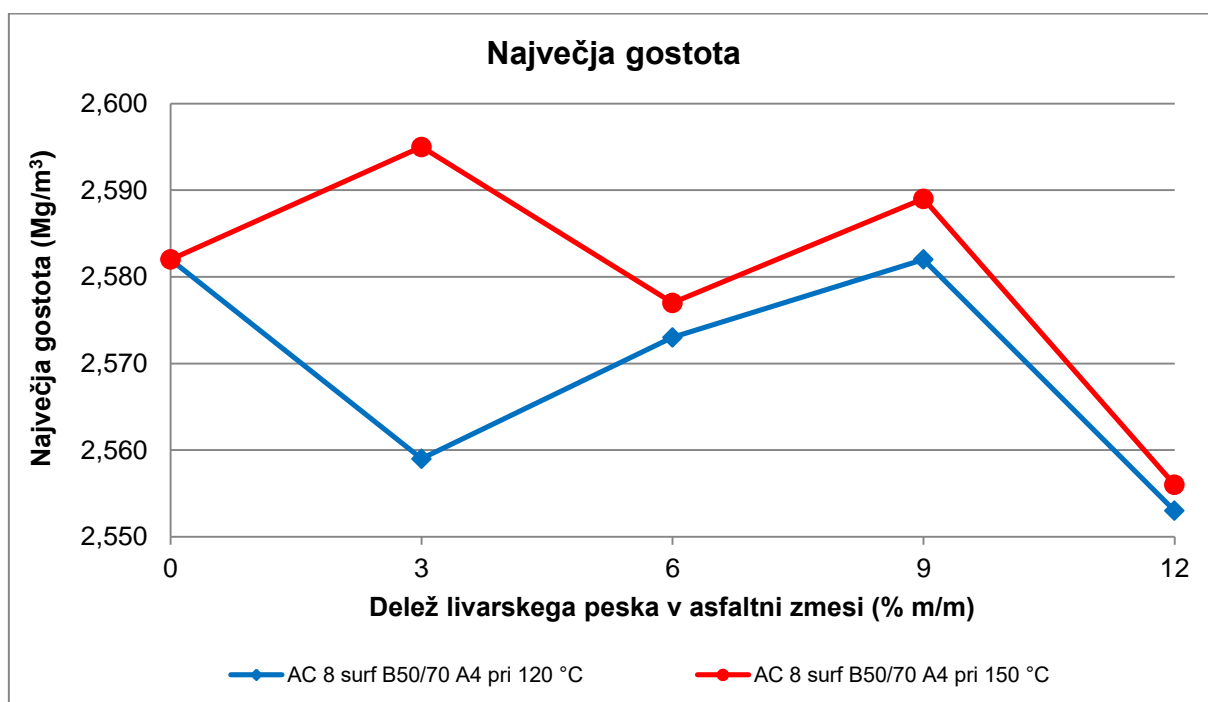
6.3.2 Fizikalne lastnosti

Kako vplivajo temperature priprave asfaltnih zmesi in različni deleži livarskega peska na fizikalne lastnosti asfaltnih zmesi prikazujejo slike od 6-11 do 6-12.

Vpliv deleža livarskega peska in temperatura proizvodnje asfaltne zmesi na največjo gostoto asfaltne zmesi je prikazan na sliki 6-11, kako pa vpliva na gostoto asfaltnih preskušancev pa prikazuje slika 6-12.

Na sliki 6-13 so prikazane značilnosti votlin v bitumenskih preskušancih za asfaltne zmesi pripravljene pri temperaturah 120 °C in 150 °C ter z dodatkom različnih deležev livarskega peska. Vsebnost votlin smo izračunali po enačbi 3.3 na podlagi predhodnih preiskav za določitev največje gostote asfaltnih zmesi in prostorninske gostote asfaltnih preskušancev.

Zapolnjenost votlin z bitumnom – VFB smo določili z izračunom po enačbi 3.4. Rezultati so v grafični obliki prikazani na sliki 6-14.



Slika 6-11: Največja gostota asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Iz grafa na sliki 6-11 je razvidno da se največje gostote pri asfaltnih zmesih brez dodanega livarskega peska in z dodanim livarskim peskom gibajo od 2,553 do 2,582 Mg/m³. Največja gostota je najnižja pri asfaltni zmesi kateri smo dodali 12 % livarskega peska, največja pa pri uporabi 9 % livarskega peska in pri asfaltni zmesi brez livarskega peska.

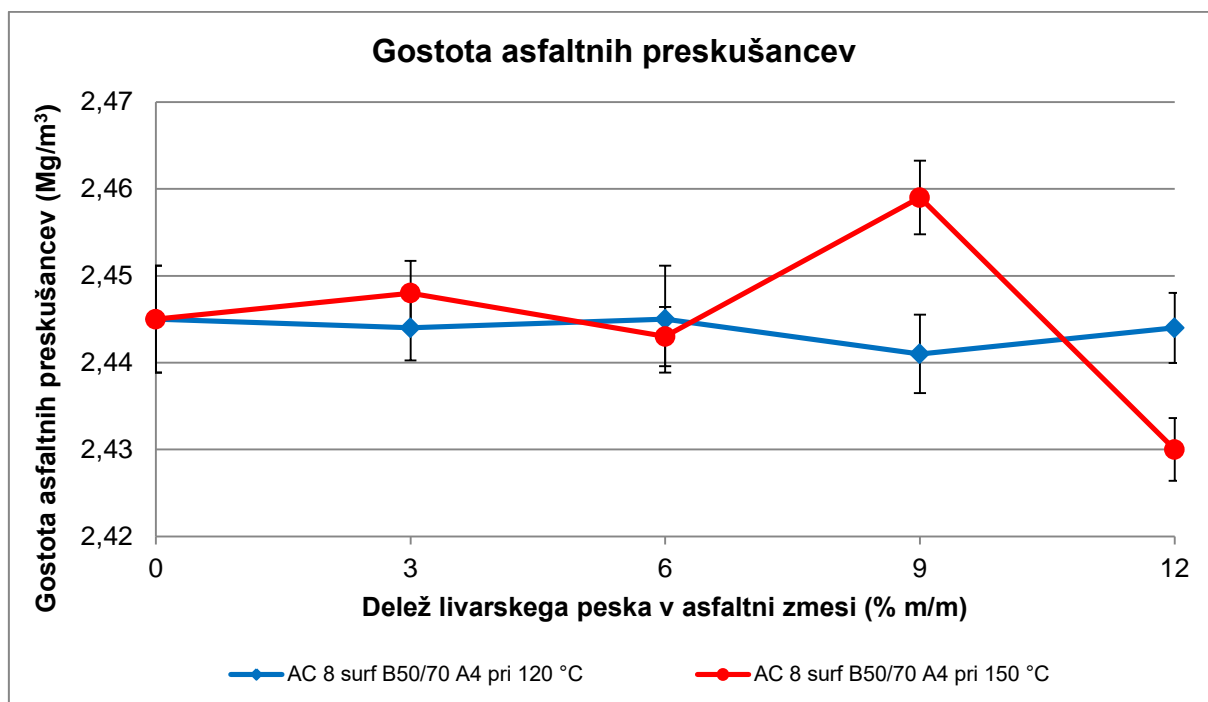
Pri 3 % dodanega livarskega peska v asfaltni zmesi proizvedeni pri 120 °C znaša topni delež veziva v asfaltni zmesi 5,8 % (m/m), medtem ko topni delež veziva v asfaltni zmesi

proizvedeni pri 150 °C znaša 5,2 % (m/m). Ker se z višanjem topnega deleža bitumna največja gostota niža, z zmanjšanjem topnega deleža bitumna v asfaltni zmesi pa viša, je prišlo do razlike med največjimi gostotami proizvedenih asfaltnih zmesi (pri 120 °C in 150 °C) z dodanimi 3 % livarskega peska.

Ker je po SIST EN 12697-5 [47] za določanje največje gostote v vodi primerljivost $R=0,022 \text{ Mg/m}^3$, primerljivost vzorcev z dodanimi 3 % livarskega peska pri asfaltnih zmesih proizvedenih pri 120°C in 150°C pa znaša $R=0,018 \text{ Mg/m}^3$, smatramo, da so rezultati primerljivi.

Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C je maksimalna gostota asfaltne zmesi brez dodanega livarskega peska $2,582 \text{ Mg/m}^3$, medtem ko se maksimalne gostote asfaltnih zmesi z dodanim različnim deležem livarskega peska gibajo med $2,556$ in $2,595 \text{ Mg/m}^3$. V primerjavi z maksimalno gostoto asfaltne zmesi brez dodanega livarskega peska je maksimalno gostoto povečal dodatek 3 % livarskega peska, znižala pa uporaba 12 % livarskega peska.

Pri primerjavi rezultatov maksimalnih gostot asfaltnih zmesi glede na temperaturo priprave asfaltne zmesi je iz grafa na sliki 6-11 razvidno, da so pri dodatku livarskega maksimalne gostote nekoliko višje.

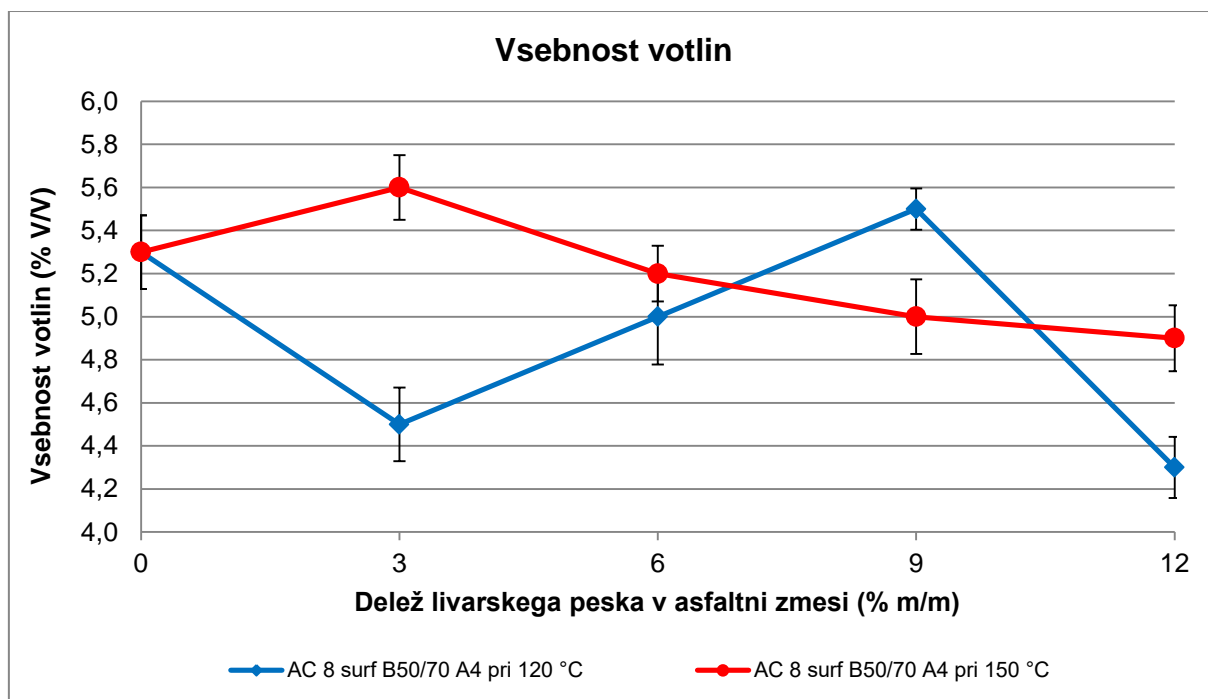


Slika 6-12: Gostota asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Pri asfaltnih zmesih pripravljenih pri 120 °C se gostote asfaltnih preskušancev bistveno ne spreminjajo pri različno dodanih deležih livarskega peska. Gostota asfaltnih preskušancev pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska je $2,45 \text{ Mg/m}^3$, medtem ko se gostote asfaltnih preskušancev z dodanimi različnimi deleži livarskega peska gibljejo med $2,44$ in $2,45 \text{ Mg/m}^3$.

Tudi pri asfaltnih zmesih, pripravljenih pri 150 °C ni zaznati večjih sprememb gostote asfaltnih preskušancev pri uporabi livarskega peska, razen pri dodatku 9 % livarskega peska, ki znaša 2,46 Mg/m³. V primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska katere gostota je 2,45 Mg/m³ se gostota asfaltnega preskušanca z dodatkom 9 % livarskega peska poveča zanemarljivo (0,6 %).

Iz grafa na sliki 6-12 je tudi razvidno, da temperatura priprave asfaltnih zmesi ne vpliva na gostoto asfaltnih preskušancev.



Slika 6-13: Vsebnost votlin v bitumenskih preskušancih asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Iz grafa na sliki 6-13 je razvidno da je vsebnost votlin pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C najmanjša (4,3 % V/V) pri 12 %, največja (5,5 % V/V) pa pri 9 % dodanega livarskega peska. Pri asfaltni zmesji brez dodanega livarskega peska je vsebnost votlin 5,3 % V/V. Tako je v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska vsebnost votlin pri 12 % dodanega livarskega peska manjša za 18,9 %, pri dodanih 9 % pa večja za 3,8 %.

Ker se delež votlin izračuna na podlagi največje gostote asfaltni zmesi in prostorninske gostote asfaltnih preskušancev (enačba 3.3), prihaja pri dodatku 3 % livarskega peska ter obeh temperaturah priprave asfaltni zmesi (pri 120 °C in 150 °C) do razlik v vrednosti vsebnosti votlin. Prostorninska gostota bitumenskih preskušancev je pri 120 °C 2,44 Mg/m³, pri 150 °C pa 2,45 Mg/m³. Ker je pri asfaltni zmesji, pripravljene pri 120 °C najdena večja vsebnost bitumna (5,8 % (m/m)) je posledično nižja največja gostota (2,559 Mg/m³) in nižja vsebnost votlin (4,5 % (V/V)). Pri asfaltni zmesji pripravljene pri 150 °C pa je manjša vsebnost bitumna (5,5 % (m/m)) ter posledično višja največja gostota (2,595 Mg/m³) in višja vsebnost votlin (5,6 % (V/V)).

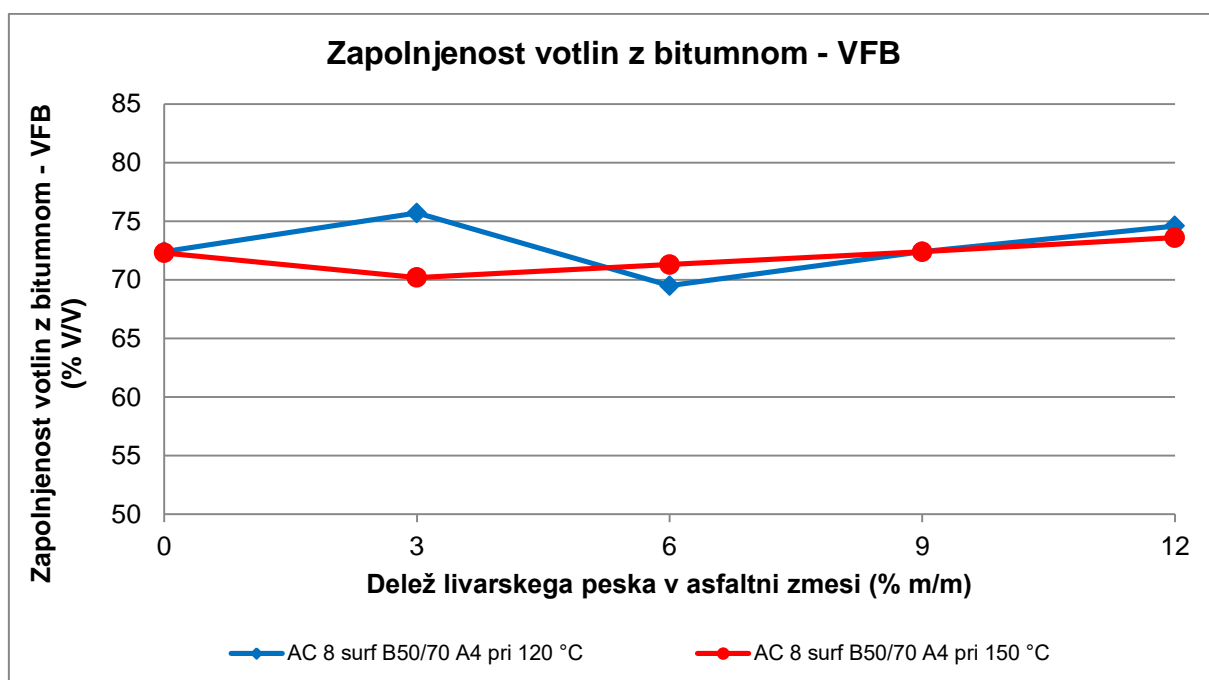
Ker je primerljivost, ki jo določa standard SIST EN 12697-8 [49] R=2,2 % v/v lahko rečemo, da so dobljeni rezultati določanja vsebnosti votlin primerljivi.

Po standardu SIST 1038-1 [26], [27] so mejne vrednosti za asfaltno zmes AC 8 surf za lahko in zelo lahko prometno obremenitev (A4) $V_{min} 1,5$ do $V_{max} 5$. Iz preglednice 5-26 in slike 6-13 je razvidno, da se vsebnosti votlin gibajo med 4,3 – 5,5 % V/V, kar pomeni, da so vsebnosti votlin asfaltnih zmesi pripravljene pri 120 °C znotraj mejnih vrednosti.

Največja vsebnost votlin je pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C z 3 % dodanega livarskega peska, tj. 5,6 % V/V, najmanjša pa pri 12 % dodanega livarskega peska (4,3 % V/V). Tako se je vsebnost votlin pri uporabi 3 % livarskega peska zvišala v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska (5,3 % V/V) za 5,7 %, medtem ko se je pri uporabi 12 % dodanega livarskega peska znižala za 7,5 %.

Vsebnosti votlin so za vse asfaltno zmesi pripravljene pri 150 °C znotraj mejnih vrednosti, ki jih predpisuje standard SIST 1038-1 [26], [27], razen pri dodanih 3 % livarskega peska, ki presega zahtevo za 0,1 % V/V.

Pri asfaltnih zmesih pripravljene pri 120 °C in 150 °C brez dodanega livarskega peska je vsebnost votlin enaka, in sicer 5,3 % V/V. Dodatki različnih deležev livarskega peska pa različno vplivajo na zmanjšanje oz. večanje vsebnosti votlin, razen pri dodanih 6 % in 12 % livarskega peska, kjer pri obeh asfaltnih zmesih vsebnost votlin pade.



Slika 6-14: Zapolnjenost votlin z bitumnom - VFB asfaltno zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C brez dodanega livarskega peska je zapolnjenost votlin z bitumnom-VFB, ki smo jo določili po enačbi 3.4, 72,4 % V/V. (Preglednica 5-26, slika 6-14). Zapolnjenost votlin z bitumnom se v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska poveča pri dodatku 3 % (75,7 % V/V) in 12 % (74,6 % V/V) livarskega peska za 4,6 % oz. 3,0 %. Najmanjšo zapolnjenost vsebnosti votlin 69,5 % V/V pa je zaznati pri uporabi 6 % livarskega peska, kar pomeni v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska zmanjšanje za 4 %.

Pri asfaltnih zmesih pripravljenih pri 120 °C so vrednosti zapolnjenosti votlin z bitumnom – VFB od 69,5 do 75,7 % V/V. Mejne vrednosti, ki jih določa standard SIST 1038-1 [26], [27] so za asfaltno zmes AC 8 surf, ki se uporablja za zelo lahke in lahke prometne obremenitve (A4) od 75 do 89 % V/V. Tem pogojem ustreza samo asfaltna zmes z 3 % dodanega livarskega peska z vrednostjo 75,7 % V/V. Vse ostale asfaltno zmesi imajo nižjo vrednost zapolnjenosti votlin z bitumnom od zahtevane.

Iz preglednice 5-26 in grafa na sliki 6-14 je razvidno, da so pri asfaltnih zmesih pripravljenih pri 150 °C brez in z dodatkom različnih deležev livarskega peska vrednosti zapolnjenosti votlin z bitumnom od 70,2 do 73,6 % V/V. Najmanjšo zapolnjenost votlin z bitumnom je zaznati pri uporabi 3 % livarskega peska, največjo pa pri uporabi 12 % livarskega peska. V primerjavi z asfaltno zmesjo brez uporabe livarskega peska se pri dodatku 3 % livarskega peska zniža za 2,9 % in pri uporabi 12 % livarskega peska poveča za 1,8 %. Zapolnjenosti votlin z bitumnom so v vseh primerih asfaltnih zmesi manjše od zahtevanih 75 % V/V, kar pomeni, da ne ustrezajo zahtevam standarda SIST 1038-1 [26], [27] za asfaltno zmes uporabljene za zelo lahke in lahke prometne obremenitve.

Poudariti velja, da nižja zapolnjenost votlin z bitumnom ni posledica vpliva deleža dodanega livarskega peska na lastnosti asfaltno zmesi, temveč to bolj zadeva projektiranje asfaltno zmesi z dodanim deležem livarskega peska.

Pri asfaltnih zmesih brez dodanega livarskega peska je zapolnjenost votlin z bitumnom enaka tako pri asfaltni zmesi pripravljeni pri 120 °C kot tudi 150 °C, in sicer 72,4 oz. 72,3 % V/V.

6.3.3 Mehanske lastnosti

Vplivi temperature (120 °C in 150 °C) priprave asfaltno zmesi in različnih deležev livarskega peska (3 %, 6 %, 9 % in 12 %) na mehanske lastnosti asfaltnih zmesi so prikazani na slikah od 6-15 do 6-21.

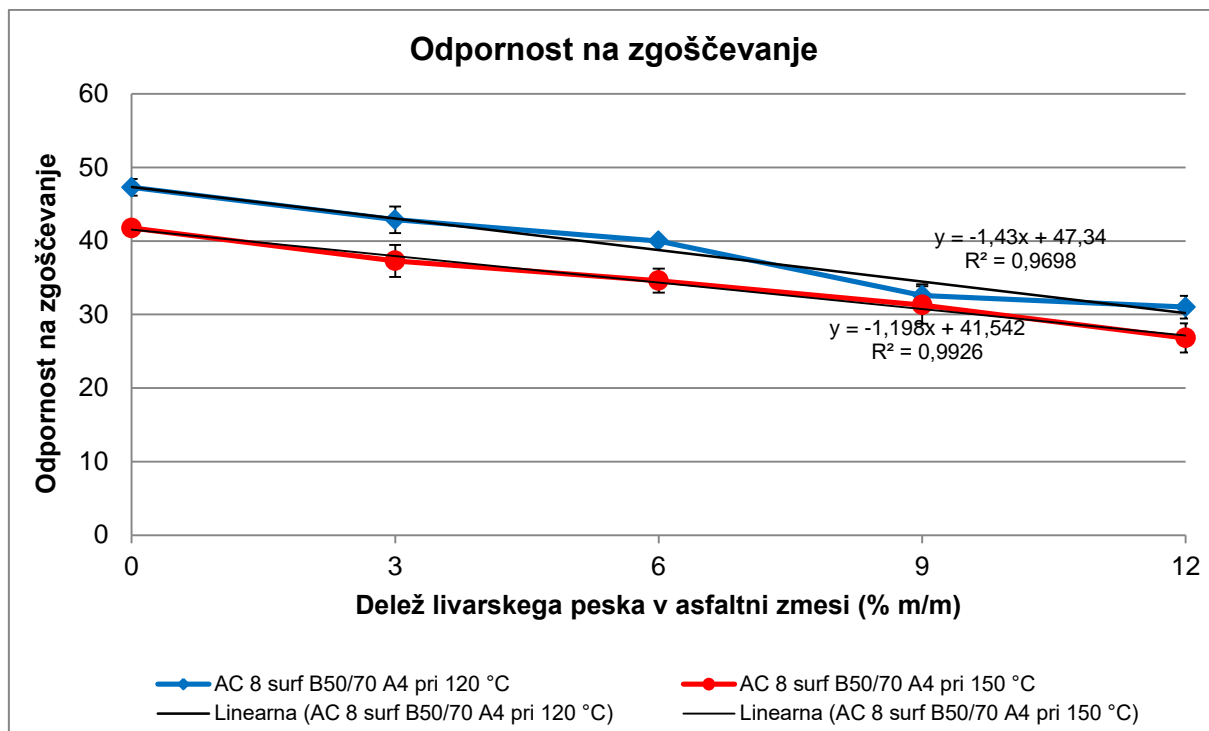
Za vse laboratorijsko proizvedene asfaltno zmesi pri temperaturah 120 °C in 150 °C brez in z različno dodanimi deleži livarskega peska smo preskušali odpornost na zgoščevanje kar prikazuje slika 6-15.

Kako vplivajo temperatura proizvodnje in različni deleži livarskega peska na indirektno natezno trdnost (ITS) mokrih in suhih vzorcev je prikazano na sliki 6-16.

Rezultati za določanje občutljivosti asfaltnih preskušancev na vodo laboratorijsko proizvedenih asfaltnih zmesi brez in z različno dodanimi deleži (3 %, 6 %, 9 % in 12 %) livarskega peska pripravljenih pri 120 °C ter 150 °C so prikazani v grafu na sliki 6-17.

Občutljivost asfaltnih preskušancev na vodo smo določili z razmerjem indirektno natezne trdnosti suhih in indirektno natezne trdnosti mokrih vzorcev asfaltnih preskušancev po enačbi 4.4.

Po Marshall-ovem preskusu smo določali stabilnost, deformacijo, tangencialno deformacijo in togost. Rezultati so podani na slikah od 6-18 do 6-21.



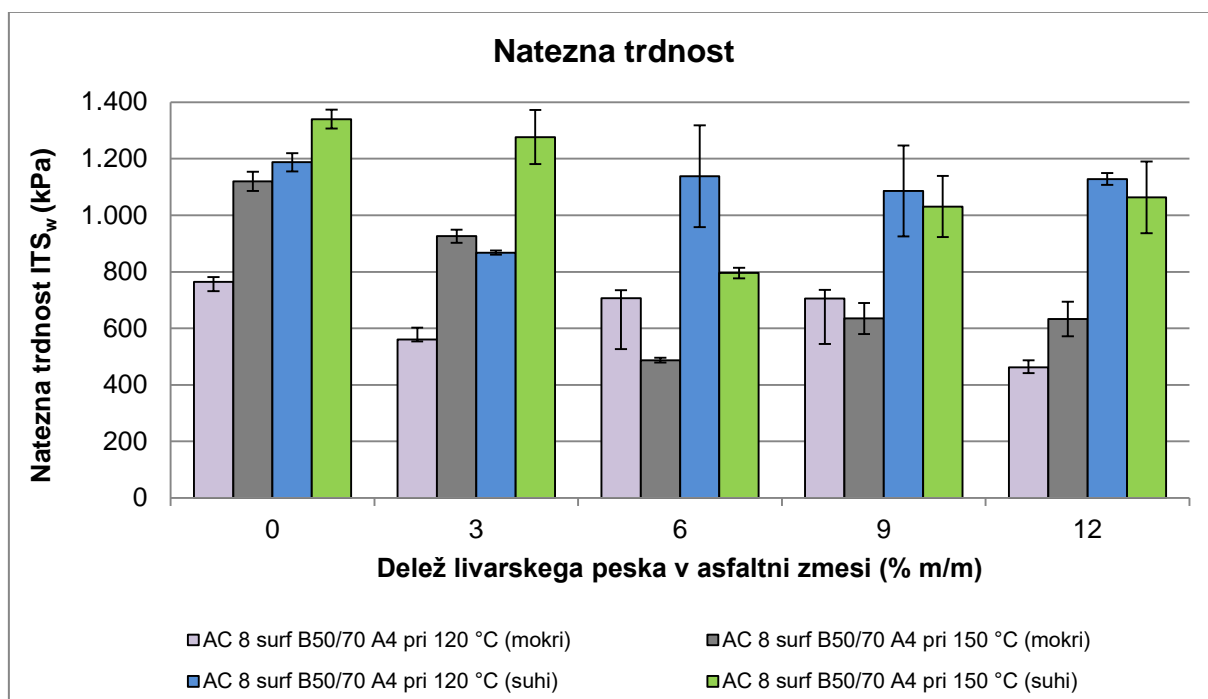
Slika 6-15: Odpornost na zgoščevanje asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Odpornost na zgoščevanje pri asfaltnih zmesih AC 8 surf B50/70 A4 pripravljenih pri 120 °C z dodajanjem in večanjem deleža livarskega peska konstantno pada (Slika 6-15). Odpornost na zgoščevanje pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska je 47,3 (21Nm). Največjo odpornost na zgoščevanje zaznamo pri 3 % dodanega livarskega peska (T=42,9 21Nm), najmanjšo pa pri 12 % dodanega livarskega peska (T= 31,0 21Nm). V primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska se odpornost na zgoščevanje z dodatkom livarskega peska zniža za 9,8 % (pri 3 %), 15,4 % (pri 6 %), 31,1 % (pri 9 %) in 34,4 % pri dodatku 12 % livarskega peska.

Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C odpornost na zgoščevanje z večanjem deleža livarskega peska pada. Iz grafa na sliki 6-15 je razvidno, da je najbolj odporna na zgoščevanje asfaltna zmes z dodanimi 3 % livarskega peska (T = 37,3 21Nm), najmanj pa z dodanimi 12 % livarskega peska, kjer je T = 26,8 21Nm. Pri dodatku 12 % livarskega peska se je odpornost na zgoščevanje v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska, ki znaša 41,8 21Nm, znižala za 35,8 %.

Pri primerjavi vpliva temperature priprave asfaltnih zmesi na odpornost na zgoščevanje vidimo, da tako pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C, kot pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C, z večanjem deleža dodanega livarskega peska odpornost na zgoščevanje pada. Pri obeh temperaturah je največji padec odpornosti na zgoščevanje pri 12 % dodanega livarskega peska, ki v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska znaša okoli 35 %. Pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska pripravljene pri 120 °C je odpornost na zgoščevanje 47,3 21Nm in je v primerjavi z asfaltno zmesjo pripravljeno pri 150 °C (T= 41,8 21Nm) večja za približno 13,2 %.

To pomeni, da dodatek livarskega peska in višja temperatura vplivata na zmanjšanje odpornosti na zgoščevanje asfaltnih zmesi.



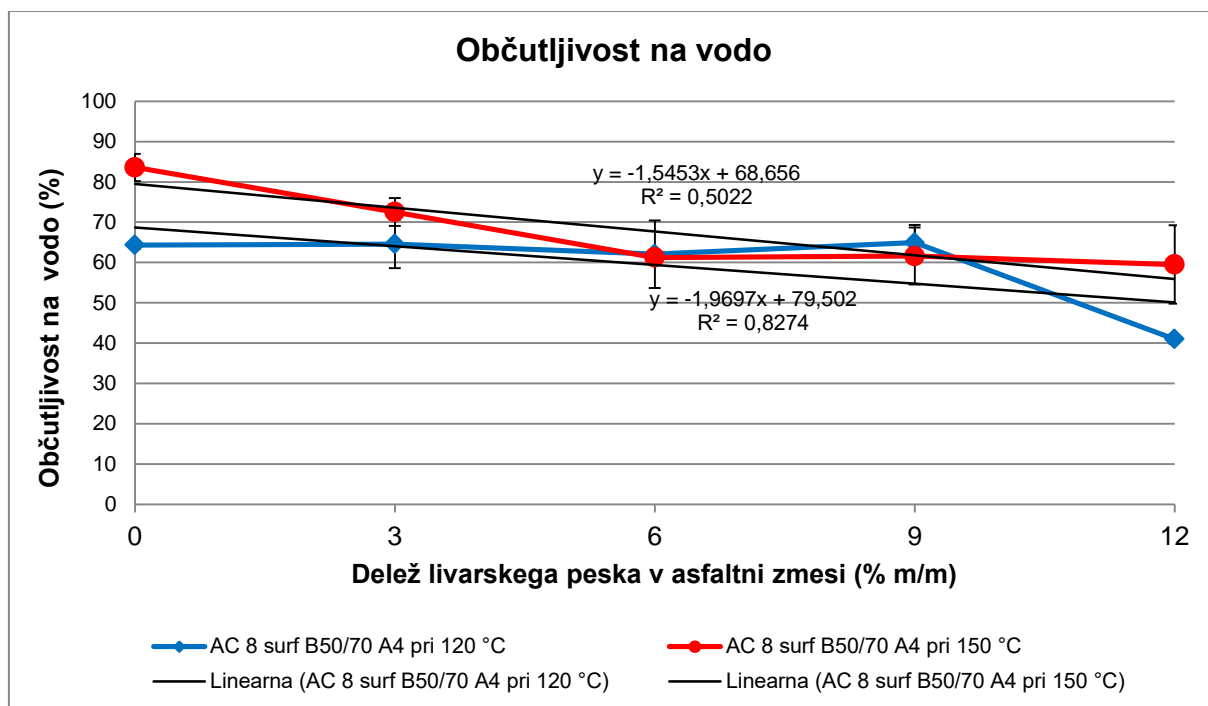
Slika 6-16: Indirektna natezna trdnost mokrih in suhih asfaltnih preskušancev asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Indirektna natezna trdnost mokrih vzorcev pri asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4, proizvedeni pri 120 °C brez dodanega livarskega peska znaša $ITS_w = 764$ kPa. Pri dodajanju različnih deležev livarskega peska indirektna natezna trdnost pade in se giblje od 463 do 707 kPa. Največji padec indirektna natezne trdnosti je zaznati pri uporabi 12 % livarskega deleža, najmanjši pa pri uporabi 6 % livarskega deleža v asfaltni zmesi. V primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska pade indirektna natezna trdnosti za 39,5 % (12 % livarskega peska) oz. 7,5 % (6 % livarskega peska).

Največji padec indirektna natezne trdnosti mokrih in suhih vzorcev asfaltnih zmesi AC 8 surf B50/70 A4, proizvedene pri 150 °C je zaznati pri uporabi 6 % livarskega peska. Sklepamo lahko, da gre očitno za dva nasprotna vpliva, ki sta se v tej raziskavi pokazala kot predmet nadaljnjih raziskav. Vsebovana voda v livarskih peskih zmanjšuje indirektno natezno trdnost, sam livarski pesek brez vode, pa nekoliko povečuje indirektno natezno trdnost. Pri mokrih vzorcih se indirektna natezna trdnost v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska le-ta zniža za 56,5 %. Najmanjši padec indirektna natezne trdnosti je zaznati pri dodatku 3 %, ki se je znižal na $ITS_w = 926$ kPa. Indirektna natezna trdnost za vzorce asfaltnih zmesi brez dodanega livarskega peska znaša 1120 kPa.

Pri asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4 proizvedeni pri 120 °C brez dodanega livarskega peska (suhi vzorci) znaša indirektna natezna trdnost $ITS_d = 1188$ kPa. Z dodajanjem livarskega peska le-ta pada. Najmanjšo vrednost oz. največji padec je zaznati pri dodatku 3% livarskega peska kjer je vrednost $ITS_d = 876,8$ kPa, najmanjši padec pa pri uporabi 6 % livarskega peska ($ITS_d = 1138$ kPa).

Iz grafa na sliki 6-16 je razvidno, da se indirektna natezna trdnosti pri suhih vzorcih ITS_d asfaltne zmesi pripravljene pri 150 °C gibajo od 1340 do 796 kPa. Asfaltna zmes brez dodanega livarskega peska ima vrednost indirektna natezne trdnosti $ITS_d = 1340$ kPa. Z dodajanjem različnih deležev livarskega peska pa indirektna natezna trdnost pada. Najmanjšo indirektno natezno trdnost ima asfaltna zmes, ki smo ji dodali 6 % livarskega peska in je v primerjavi z indirektno natezno trdnostjo asfaltne zmesi brez dodanega livarskega peska nižja za 40,6%. Najboljšo vrednost indirektna natezne trdnosti pa smo dobili z dodatkom 3 % livarskega peska ($ITS_d = 1277$ kPa).



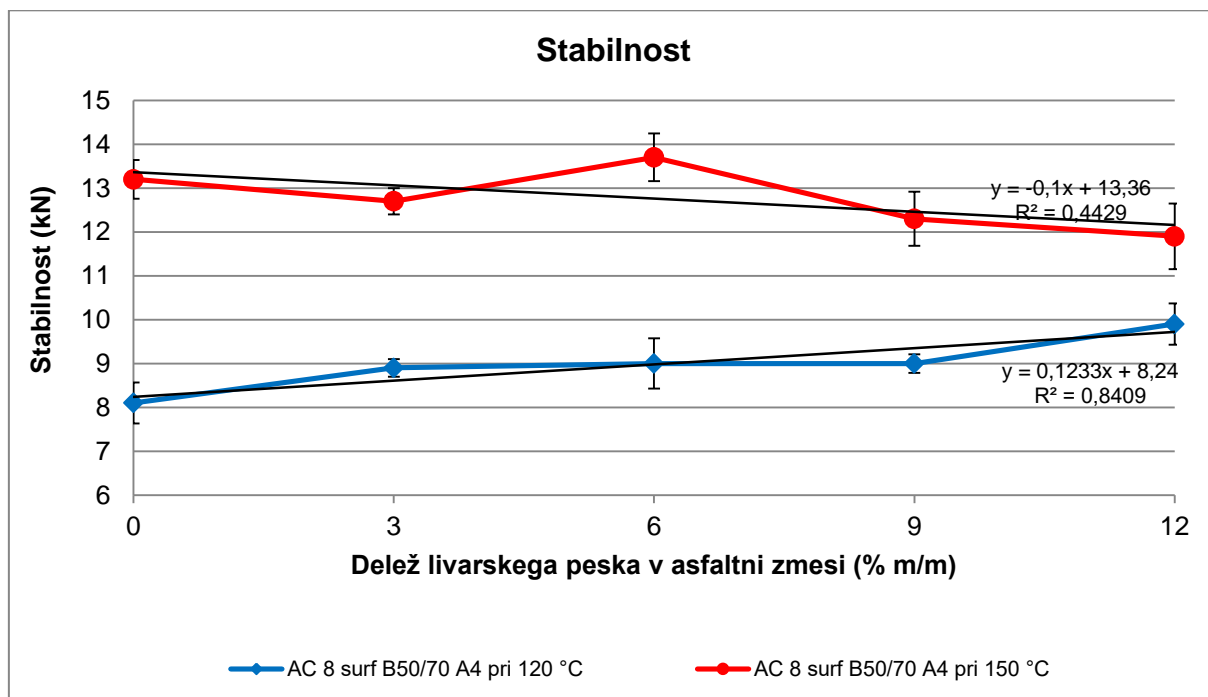
Slika 6-17: Občutljivost asfaltnih preskušancev na vodo asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Iz rezultatov prikazanih v preglednici 5-28 in na grafu na sliki 6-17 je razvidno, da se faktor ITS_R z dodatkom 3 %, 6 % in 9 % livarskega peska pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska (64,34 %) bistveno ne spreminja, saj je primerljivost rezultatov, ki jo določa standard SIST EN 12697-12 [51] za metodo A manjša od 23 %. Pri asfaltni zmesi z dodanimi 12 % livarskega peska pa se zniža na 41,0 %, tj. za 36 % nižji faktor ITS_R v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska.

Pri asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 150 °C pa je zaznati, da z višanjem deleža livarskega peska faktor ITS_R pada. V primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska pri kateri je ITS_R faktor 83,6 % se z dodatkom 3 % livarskega peska le-ta zniža za 13 %, pri dodanih 6 % in 9 % za 27 % in pri 12 % pa za približno 30 %.

Iz grafa na sliki 6-17 je tudi razvidno, da je faktor ITS_R pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska pripravljene pri 120 °C 64,3 %, pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C pa 83,6 %, kar predstavlja za približno 30 % večji ITS_R faktor. Iz tega lahko sklepamo, da je asfaltna zmes, pripravljena pri 150 °C manj občutljiva na vodo oz. ima voda manjši vpliv.

Iz rezultatov je razvidno, da se faktor ITS_R bistveno razlikuje le pri 0 % dodanega livarskega peska in 12 % dodanega livarskega peska pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C, kot tudi pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C. Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C tako faktor ITS_R pade za 23,35 % v razponu od 0 % do 12 % dodanega livarskega peska. Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C pa faktor ITS_R pade za 24,07 % v razponu od 0 % do 12 % dodanega livarskega peska.



Slika 6-18: Stabilnost asfaltnih preskušancev asfaltni zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

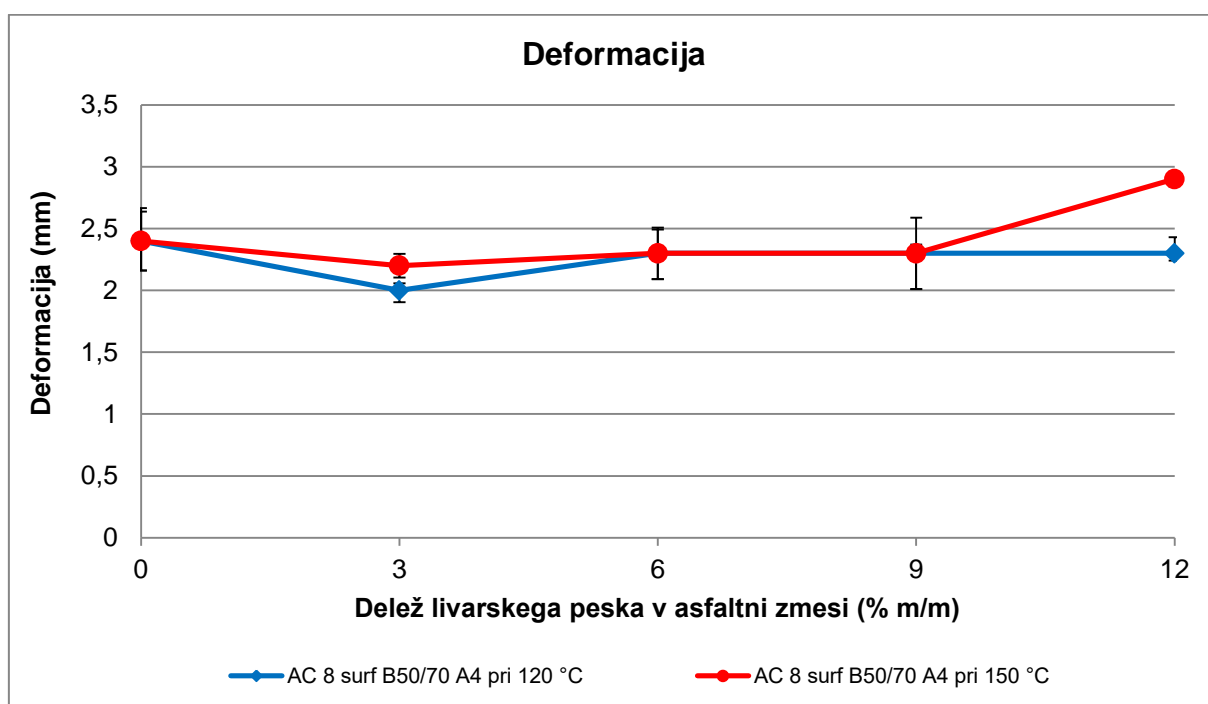
Pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska, ki je proizvedena pri 120 °C je izmerjena sila stabilnosti 8,1 kN. Z dodajanjem livarskega peska je pri vseh deležih zaznati porast stabilnosti. Največjo stabilnost ima asfaltna zmes, kateri smo dodali 12 % livarskega peska in sicer je vrednost 9,9 kN, kar pomeni, da je v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska za 22,2 % večja. Najmanj pa se je povečala stabilnost z uporabo 3 % livarskega peska in sicer za 9,9 %.

Iz grafa na sliki 6-18 je razvidno, da se pri asfaltnih zmesih pripravljenih pri temperaturi 150 °C in uporabo 3 %, 9 % in 12 % livarskega peska stabilnost zmanjša. Manjše povečanje stabilnosti je zaznati pri uporabi 6 % livarskega peska in to za 3,8 % v primerjavi z asfaltno zmesjo brez livarskega peska katere vrednost stabilnosti je 13,2 kN.

Stabilnost je pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska pripravljena pri 150 °C večja v primerjavi z isto vrsto asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C, in sicer za približno 38 %. Medtem ko je pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C z dodajanjem livarskega peska zaznati povečanje stabilnosti, je pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C to zaznati samo pri uporabi 6 % livarskega peska. V vseh ostalih primerih, tj. dodatku 3 %, 9 % in 12 % se stabilnost asfaltni zmesi niža.

Preiskave stabilnosti, deformacija, tangencialna deformacija in togost asfaltnih preskušancev po Marshallu so se v preteklosti izvajale kot del kontrole kakovosti asfaltnih zmesi. Za lahke, kot tudi težje prometne obremenitve je bila po standardu JUS U.E4.014 [57] zahtevana stabilnost več kot 7 kN in togost več kot 1,8 kN/mm. Te zahteve so pri vseh preiskanih asfaltnih zmesih izpolnjene.

Poudariti velja, da standard JUS od leta 2003 ni več v veljavi, kriteriji za stabilnost in deformacijo pa niso več zahtevani. Za asfaltne zmesi uporabljene na letališčih pa določa standard SIST EN 13108-1 [58] samo kategorije, ki se jih določi na podlagi izmerjenih laboratorijskih vrednosti. Čeprav mehanske lastnosti stabilnost in deformacija oziroma njihovi mejni vrednosti nista več zahtevani in določeni s standardom pri laboratorijskem preskušanju asfaltnih zmesi za gradnjo cest, smo jih uporabili kot izhodišče za določitev in opredelitev sprememb parametrov dveh osnovnih mehanskih lastnosti – stabilnosti in deformacije.



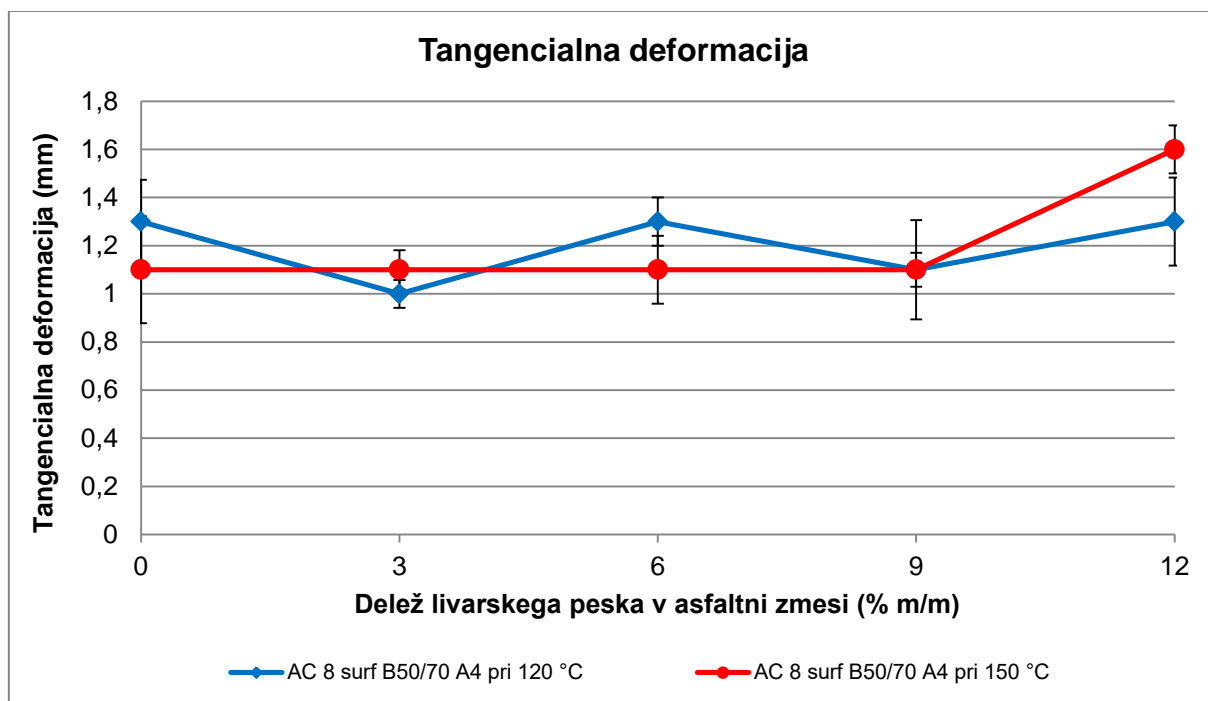
Slika 6-19: Deformacija asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Deformacija asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi, ki smo jo pripravili pri 120 °C se v vseh primerih dodanega livarskega peska giblje 2,3 mm, razen pri 3 % kjer se zniža na 2,0 mm. To pomeni, da je v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska (2,4 mm) pri 3 % dodanega livarskega peska nižja za 16,7 %, pri vseh ostalih dodanih deležih pa za 4,2 %.

Pri asfaltnih zmesih pripravljenih pri 150 °C se vrednosti deformacij gibajo od 2,2 do 2,9 mm. Najbolj deformabilna je asfaltna zmes z dodatkom 12 % livarskega peska, najmanj pa z dodanimi 3 % livarskega peska. Pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska je vrednost deformacije 2,4 mm. Pri asfaltni zmesi z dodatkom 12 % livarskega peska se v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska tako deformacija poveča za 20,8 %, medtem ko se pri uporabi 3 % livarskega peska zmanjša za 8,3 %.

Iz grafa na sliki 6-19 je razvidno da temperatura priprave vzorca nima vpliva na spremembe deformabilnosti pri asfaltnih zmesih brez dodanega livarskega peska, saj je vrednost deformacije tako pri 120 °C, kot tudi 150 °C enaka, tj. 2,4 mm. Deformabilnost je pri obeh temperaturah pri katerih smo pripravili vzorce za vse deleže dodanega livarskega peska enaka, le občutni porast je zaznati pri 150 °C in uporabi 12 % livarskega peska.

Na osnovi rezultatov lahko sklepamo, da višja temperatura priprave asfaltne zmesi in višji delež livarskega peska povečata deformabilnost asfaltne zmesi.



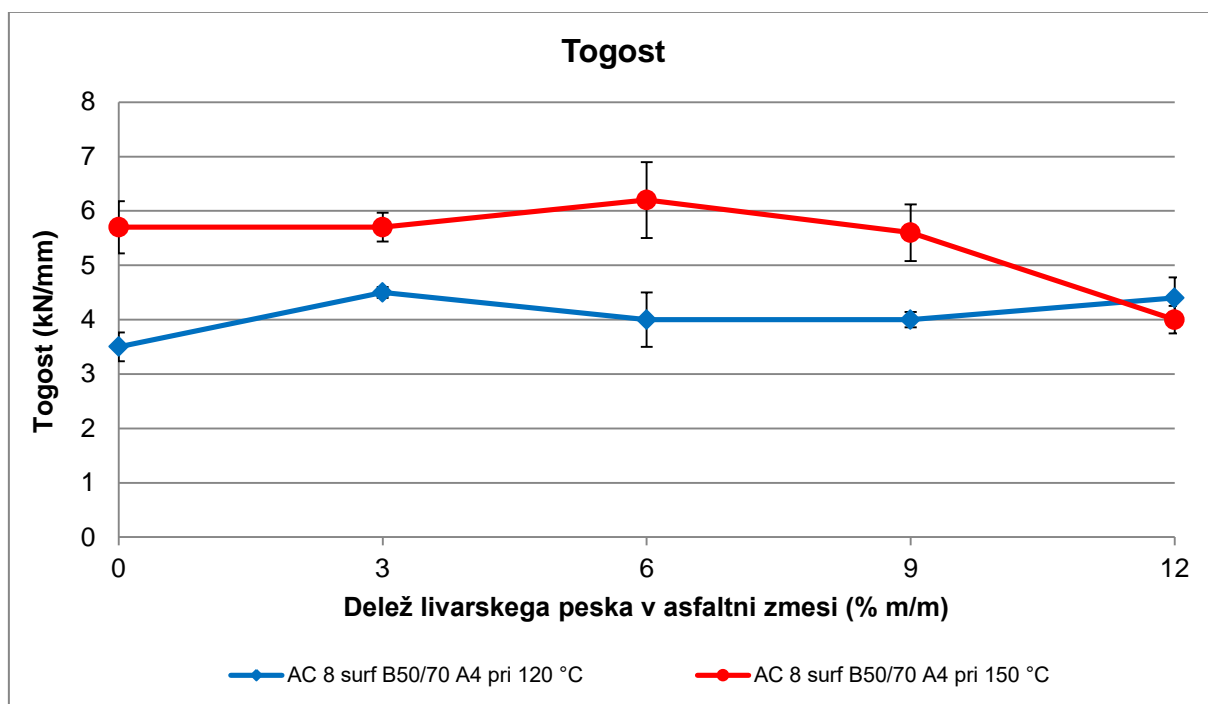
Slika 6-20: Tangencialna deformacija asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Najmanjša tangencialna deformacija je pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C z dodanimi 3 % livarskega deleža, in sicer znaša 1,0 mm. Enake vrednosti tangencialne deformacije 1,3 mm so pri asfaltnih zmesih brez dodanega livarskega peska ter uporabi 6 % in 12 % livarskega peska. Pri uporabi 9 % livarskega peska je vrednost tangencialne deformacije 1,1 mm. Tako se vrednost tangencialne deformacije pri uporabi 3 % livarskega peska v primerjavi z asfaltno zmesjo brez livarskega peska zniža za 23,1 % (Slika 6-20).

Tangencialna deformacija je pri asfaltnih zmesih pripravljene pri 150 °C pri asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska in z dodanimi 3 %, 6 % in 9 % livarskega peska enaka in znaša 1,1 mm. Povečano tangencialno deformacijo je zaznati pri asfaltni zmesi z uporabo 12 % livarskega peska, ki se je v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska povečala za 45,5 %.

Asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska pripravljene pri 120 °C imajo večjo vrednost tangencialne deformacije kot asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C in to za 18,2 %.

Iz tega lahko sklepamo, da imata povišana temperatura priprave asfaltne zmesi in večji delež livarskega peska vpliv na povečanje tangencialne deformacije asfaltne zmesi.



Slika 6-21: Togost asfaltnih preskušancev asfaltne zmesi AC 8 surf B50/70 A4 pripravljene pri 120 °C in 150 °C v odvisnosti od deleža dodanega livarskega peska

Iz grafa na sliki 6-21 je razvidno da se pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C z uporabo vseh deležev livarskega peska togost poveča, in sicer na največ 4,5 kN/mm pri uporabi 3 % livarskega peska, nato pade na 4,0 kN/mm (pri 6 % in 9 % livarskega peska) in se pri 12 % livarskega peska ponovno poviša na 4,4 kN/mm. Togost asfaltne zmesi brez dodanega livarskega peska je 3,5 kN/mm. Togost se v primerjavi z asfaltno zmesjo brez uporabe livarskega peska najbolj poveča pri uporabi 3 % livarskega peska in to za 28,6 %.

Togost asfaltnih zmesi pripravljene pri 150 °C se giblje med 4,0 in 5,7 kN/mm. Najbolj toga je asfaltna zmes z dodanimi 6 % livarskega peska, najmanj pa asfaltna zmes z uporabo 12 % livarskega peska. Tako se v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska (5,7 kN/mm) poveča togost asfaltne zmesi z 6 % dodanega livarskega peska za 8,8 % in z uporabo 12 % livarskega peska zniža za 29,8 %.

Pri primerjavi vpliva temperature na pripravo asfaltne zmesi ugotavljamo, da višja temperatura priprave, tj. 150 °C poveča togost asfaltnih zmesi, razen pri uporabi 12 % livarskega peska. Pri temperaturi priprave 120 °C je togost asfaltnega preskušanca 3,5 kN/mm, pri 150 °C pa 5,7 kN/mm, kar je za 62,9 % večja vrednost od asfaltne zmesi pripravljene pri 120 °C.

6.4 Primerjava rezultatov z drugimi raziskavami

Iz raziskave, ki so jo naredili Javed in sodelavci [15] je razvidno, da je z višanjem deleža livarskega peska do 15 % v asfaltni zmesi bila izmerjena nižja deformacija ter višja vsebnost zračnih votlin v asfaltu, kar posledično pomeni krhkost asfaltne zmesi in razpoke v vgrajenem

asfaltu. Če bi potegnili vzporednice z rezultati, ki smo jih dobili s preskušanjem v okviru magistrske naloge, ugotovimo, da je prišlo do čisto nasprotnih ugotovitev. Namreč, z dodajanjem deleža livarskega peska asfaltni zmesi ni prišlo do zmanjšanja deformacij, temveč se je tangencialna deformacija z dodajanjem deleža livarskega peska do 12 % pri 120 °C sicer spreminjala, vendar pri 12 % deležu livarskega peska ni presegla vrednosti, kot ga je dosegla pri 0 % in 6 % dodanega livarskega peska, medtem ko je deformacija pri 120 °C ostala praktično nespremenjena od 6 do 12 % dodanega livarskega peska.

Pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C pa je opaziti celo porast pri 12 % dodanega livarskega peska tako pri tangencialni deformaciji, kot pri deformaciji.

Iz te raziskave je mogoče tudi razbrati, da se je z dodajanjem deleža livarskega peska višal tudi delež zračnih votlin, kar vpliva na trajnost asfaltni zmesi, kar je nasprotno od naših ugotovitev, saj delež zračnih votlin pada (Slika 6-13) z dodajanjem deleža livarskega peska tako pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C, kot tudi pri 150 °C.

Do nasprotij med rezultati v magistrski nalogi in študijo The Federal Highway Administration [18] prihaja tudi v stabilnosti, kjer le-ta navaja, da z višanjem deleža livarskega peska v asfaltni zmesi, narašča tudi stabilnost oziroma je celo višja kot v asfaltni zmesi brez dodanega livarskega peska. V našem primeru je nasprotno, saj z dodajanjem deleža livarskega peska stabilnost pri asfaltni zmesi pripravljene pri 150 °C in 12 % livarskega peska pade in je za približno 10 % nižja kot pri asfaltni zmesi brez dodanega peska. Vzporednice bi lahko potegnili pri asfaltni zmesi pripravljene pri 120 °C, kjer je stabilnost za približno 18 % višja v zmesi z 12 % dodanega livarskega peska, v primerjavi z zmesjo brez dodanega peska.

Navajajo tudi, da z dodanim deležem livarskega peska naraste občutljivost na vodo, medtem ko so naše ugotovitve nasprotno. Z dodajanjem deleža livarskega peska občutljivost na vodo pada, oziroma je pri asfaltnih zmesih pripravljene pri obeh temperaturah nižja pri 12 % dodanega peska v primerjavi z asfaltno zmesjo brez dodanega livarskega peska (Slika 6-17).

Iz navedenega lahko povzamemo, da je pri določanju mehanskih lastnosti v asfaltnih zmesih brez dodanega in z dodajanjem deleža livarskega peska, v primerjavi z rezultati objavljenimi v tujih virih [15], [18], prišlo v večini primerih do nasprotij pri obravnavanju mehanskih lastnosti pridobljenih s preskušanjem v laboratoriju za asfalte. Tuji viri [15], [18] ne navajajo temperatur preskušanja vzorcev in proizvedenih asfaltnih zmesi, kar je eden od pomembnih faktorjev pri tem. Glede na nasprotno rezultate in ugotovitve pri določanju mehanskih lastnosti preskušanih asfaltnih zmesi lahko sklepamo, da preskušanja niso bila izvedena pod enakimi pogoji. Namreč, pod enake pogoje štejemo iste ali podobne vhodne materiale (kamni material, bitumen, kamena moka), temperaturo priprave vzorcev in najpomembneje, to je isti livarski pesek.

Sklepamo lahko, da so rezultati, ki so objavljeni in predstavljeni v tujih virih [15], [18], dobljeni na osnovi preskušanj asfaltnih zmesi, kjer je bil dodan drugačen livarski pesek, kot v magistrski nalogi. Za objektivno analizo in primerjavo rezultatov, bi morali natančno preiskati več vrst livarskih peskov in ugotoviti njihove bistvene lastnosti (delež bentonita, delež vezane kristalne vode, granulometrijsko sestavo ...), kar pa je lahko predmet za nadaljnje raziskave na tem področju.

7 ZAKLJUČKI

V magistrskem delu je prikazana uporaba livarskega peska, kot nadomestek frakcij kamenega materiala pri proizvodnji asfaltnih zmesi.

Vse sistematično izvedene preiskave so bile namenjene preverjanju, če ali z odpadnim livarskim peskom lahko enakovredno nadomestimo kamene frakcije v asfaltni zmesi. Zaradi bentonitov vsebovanih v izbranih livarskih peskih sem pričakoval lažje zgoščanje asfaltnih zmesi, oziroma možnost zgoščanja asfaltnih zmesi pri nižjih temperaturah od običajnih. Ugotovil sem, da res lahko pride celo do določenega izboljšanja v smislu zmanjšanja porabljene energije pri proizvodnji vročih asfaltnih zmesi, kot tudi pri vgrajevanju.

Pri preiskavi odpornosti na zgoščanje (korelacija je na sliki 6-15 ter rezultati preiskav v preglednici 5-27) je bilo ugotovljeno, da pri vsebnosti 4 % livarskega peska lahko temperaturo zgoščanja znižamo za 30 stopinj, pa dobimo enakovredno odpornost na zgoščanje. To velja pri znižanju temperature z 150 °C na 120 °C. Gre za signifikantno znižanje temperature, kar vidim iz tega, da takšno znižanje temperature priporočajo pri dodajanju parafinskih voskov (Sasobit), ki je najpogosteje uporabljen nizkotemperaturni dodatek.

Kot cilj smo zastavili, da ne sme priti do poslabšanja bistvenih mehanskih lastnosti asfaltnih zmesi, kot so na primer: odpornost proti nastanku kolesnic, odpornost na vodo in odpornost na nizke temperature. Ker se normalno tovrstna zmes vgrajuje pri približno 150 °C, smo kot referenčno vzeli rezultate preiskave zmesi pripravljene pri 150 °C brez dodanega livarskega peska. Pri preiskavi občutljivosti na vodo (preglednica 5-28) se vidi, da je nekoliko zmanjšana vrednost faktorja občutljivosti na vodo (ITS_R) pri vseh zmesih pripravljenih pri 120 °C glede na referenčno ($ITS_R=83,6\%$). Iz preglednice pa je razvidno, da livarski pesek, razen pri vsebnosti 12 %, nima vpliva na vrednost faktorja občutljivosti na vodo, ki je okoli 64%. Namreč po standardu SIST EN 12697-12 [51] je primerljivost (R) 23 % in rezultati so znotraj primerljivosti.

Podobno lahko zaključimo tudi iz preiskave stabilnosti, deformacija, tangencialna deformacija in togost asfaltnih preskušancev po Marshallu (preglednica 5-29). Tudi v tem primeru so posebej vrednosti stabilnosti pri vseh zmesih pripravljenih pri 120 °C (okoli 9 kN) nižje glede na referenčno (13,2 kN). Kljub nižji vrednosti stabilnosti pri vseh zmesih pripravljenih pri 120 °C so vse asfaltne zmesi ustrezne za lahko, kot tudi za najtežje obremenitve tudi po standardu JUS U.E4.014 [57].

Poudariti velja, da standard JUS od leta 2003 ni več v veljavi, kriteriji za stabilnost in deformacijo pa niso več zahtevani. Za asfaltne zmesi uporabljene na letališčih pa določa standard SIST EN 13108-1 [58] samo kategorije, katere za konkretne asfalte izbere naročnik. Čeprav mehanski lastnosti stabilnost in deformacija oziroma njuni mejni vrednosti nista več zahtevani in določeni s standardom pri laboratorijskem preskušanju asfaltnih zmesi za gradnjo cest, smo jih uporabili kot izhodišče za določitev in opredelitev sprememb parametrov dveh osnovnih mehanskih lastnosti – stabilnosti in deformacije. Tako je mogoče enostavneje definirati ali so se mehanske lastnosti spreminjale bistveno z dodajanjem livarskega peska asfaltni zmesi pri različnih temperaturah.

Tudi pri preiskavi Delta prstan-kroglica, ki nam da oceno spremembe trdote bitumna zaradi vpliva polnila, vidimo iz slike 6-7, da se zaradi dodanega livarskega peska trdota bitumna bistveno ne spremeni. Tudi na trdoto ekstrahiranega bitumna (sliki 6-9 in 6-10) dodatni livarski pesek ne vpliva.

Zaključimo lahko, da dodani livarski pesek bistveno vpliva le na lažjo vgradljivost asfaltnih plasti. Že 4 % dodanega livarskega peska ima na zgoščanje podoben vpliv, kot najpogosteje uporabljeni nizkotemperaturni dodatki (parafinski voski in zeolit) [12]. Pri tem smo ugotovili, da pri dodajanju do 9 % livarski pesek ne vpliva na ostale mehanske lastnosti asfaltnih zmesi, tako pri 120°C, kot tudi pri 150°C. Iz rezultatov pa je razvidno, da so nekatere mehanske lastnosti (stabilnost in togost) nekoliko slabše v asfaltni zmesi pripravljene pri 120°C v primerjavi z mehanskimi lastnostmi asfaltna zmesi pripravljene pri 150 °C, vendar bi po kriterijih standarda JUS U.E4.014 [57] še zmeraj ustrezale zahtevam. Znižanje temperature torej bolj vpliva na stabilnost asfaltnih preskušancev, količina dodanega livarskega peska pa na indirektno natezno trdnost ITS_R .

Torej v asfaltno zmes lahko dodamo do 9 % livarskega peska brez bistvenega poslabšanja kakovosti asfaltna plasti. Pri tem dosežemo pri 4 % livarskega peska enako vgradljivost asfaltna plasti pri 120 °C, kot pri asfaltni plasti brez livarskega peska, ki je vgrajena pri 150 °C. Livarski pesek je torej povsem uporaben nizkotemperaturni dodatek, ki nam omogoča prihranitev na energiji v proizvodnji asfaltnih zmesi.

8 LITERATURA

Knjige, učbeniki

- [1] Žmavc, J. 2007. Gradnja cest: voziščne konstrukcije. 2. Izdaja. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 357 str.
- [2] Henigman, S., Bašelj, R., in drugi. 2011. Asphalt. 2 izdaja. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 334 str.
- [3] Henigman, S., Bašelj, R., in drugi. 2016. Asphalt. 3 izdaja. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 336 str.
- [4] Lee, T., Benson, C.H. (2002). Using waste foundry sands as reactive media in permeable reactive barriers. Geo Engineering Report No. 02-01. Dept. Of Civil and Environmental Engineering. University of Wisconsin-Madison. USA 2020: 247 p.
http://chbenson.seas.virginia.edu/images/stories/pdfs/Foundry_Byproducts/Lee%20and%20Benson%2002%20report.pdf. (Pridobljeno: 25.8.2016).

Članki

- [5] Ramljak, Z. et. al. Projektiranje asfalta otpornog prema visokim (pojava kolotruga) i niskim (pojava pukotina) temperaturama sa potvrdom deklarirane otpornosti
https://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwih76K6wufOAhVHWRQKHdEODaYQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fdata.abacus.hr%2Fh-a-d%2Fradovi_hrvatskih_autora%2FProjektiranje%2520asfalta_Ramljak_Ramljak_Safran_Dedic.pdf&usq=AFQjCNFRm8ZilQFNvs9_49yTRQfEQMGQRw&sig2=i3uoqHZcaWdduoFAMmw5XQ (Pridobljeno 15.5.2016).
- [6] Tušar, M., Brence, M., Hanžič, L., Mladenovič, A. Študija uporabnosti pepela z rešetke iz Toplarne Celje v asfaltnih zmesih. Mineral, november 2011, let. 4, št. 18: 46-48.
- [7] Tušar, M., Brence, M. Uporaba odpadnega livarskega peska. Mineral, marec 2015, let. 7, št. 38: 27-29.
- [8] Jurjavčič, P. 2012. Vrste žlinder kot proizvodi v gradbeništvu. Mineral. letnik V., številka 21, maj 2012: 28-31.
- [9] Manke, R., Gogolin, D. 2013. Gummimodifizierung von Bitumen und Asphalt, Wirkungsweise und praktische Umsetzung. Aktuelle Themen aus der Straßenbautechnik. VSVI NRW, FH Münster, 19. Februar 2013: 49 p.
http://www.vsvinrw.de/tl_files/VSVINRW/Downloads/Seminarberichte/09_2013/Gummimodifizierung_von_Bitumen_und_Aspphalt.pdf (Pridobljeno 17.5.2015).

- [10] Carnina, R.L.P., et al. 2012. Use of an integrated approach to characterize the physicochemical properties of foundry green sands. *Thermochimica Acta*. 543 (2012): 150–155. <http://naldc.nal.usda.gov/download/54254/PDF> (Pridobljeno 22.8.2016).
- [11] Foundry Industry Recycling Starts Today (FIRST). 2004. Foundry Sand Facts for Civil Engineers. May 2004: 80 p. <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013791.pdf> (Pridobljeno 17.5.2015).
- [12] Tušar, M., Cotič, Z., Iljaž, K., Vračko, M. 2006. Nizko temperaturna bitumenska veziva. 8. Slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, 25.-27. oktobra 2006: 1-10. <http://www.drc.si/Portals/1/Referati/T6-Tusar.pdf>. (Pridobljeno 3.4.2016).
- [13] Vaitkus, A, Čygas, D., Laurinavičius, A., Perveneckas, Z. 2009. Analysis and Evaluation of Possibilities for the Use of Warm mix Asphalt in Lithuania. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 4(2): 80–86. https://eelv94plateau.files.wordpress.com/2011/12/hma_wma_lithuania.pdf. (Pridobljeno 3.4.2016).
- [14] Miller, E., Bahia, H.U, Benson, C., Khatri, A., Braham, A. 2001. Utilization of waste foundry sand in hot mix asphalt mixtures. *American Foundry Society Transactions*. 103 (1): 1393-407. http://chbenson.engr.wisc.edu/images/stories/pdfs/Compost_and_Recycling/20060808161332596.pdf . (Pridobljeno 22.8.2016).
- [15] Javed, S., Lovell, C.W., Wood, L.E. 1994. Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete. *Transportation Research Record* 1994a (1437): 27-34. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1437/1437-004.pdf> . (Pridobljeno 22.8.2016).

Elaborati, projekti

- [16] Hanžič, L., Samec, N., Kokalj, F., in ostali. 2011. Študija uporabnosti pepela izpod rešetke Toplarne Celje: poročilo projekta. Maribor, Univerza v Mariboru. Fakulteta za strojništvo: 52 str.
- [17] Novič, M. 2015. Izboljševanje lastnosti in okolju prijazno proizvodnjo asfaltov z optimizacijo dodajanja sekundarnih surovin v asfaltne zmesi. Zaključno poročilo raziskovalnega projekta. Ljubljana, Kemijski inštitut: 28 str.
- [18] Benson, C.H., Bradshaw, S. 2011 User Guideline For Foundry Sand in Green Infrastructure Construction. Recycled Materials Resource Center. University of Wisconsin-Madison. USA: 17 p. <http://rmrc.wisc.edu/wp-content/uploads/2012/11/Bradshaw-No.-59-Part-4-Updated-Beneficial-User-Guidelines-Foundry-Sand2.pdf> (Pridobljeno 22.8.2016).

Zborniki, priročniki

- [19] Ramljak, Z., Pejanović, V. 1981. Model i prostorne karakteristike asfaltnog uzorka. Zbornik radova II. Jugoslavenskog simpozija o bitumenu i asfaltu. Poreč 22-24.4.1981. Znanstveni savjet za naftu jugoslavenske Akademije znanosti i umjetnosti. Sekcija za preradu i primjenu nafte. Serija C, Knjiga 5: 179-193.
- [20] Ramljak, Z. 1984. Principi prostornog projektiranja asfaltnih mješavina optimalnog sastava – Uvodno predavanje. Zbornik radova III. Jugoslavenskog simpozija o bitumenu i asfaltu. Poreč 9-11.10.1984. Znanstveni savjet za naftu jugoslavenske Akademije znanosti i umjetnosti. Sekcija za preradu i primjenu nafte. Serija C, Knjiga 8: 135-144.
- [21] Ramljak, Z. 1990. Laboratorijski postupak prostornog projektiranja sastava asfalta- Uvodno predavanje. Zbornik radova IV. Jugoslavenskog simpozija o bitumenu i asfaltu. Dubrovnik 7-9.5.1990. Znanstveni savjet za naftu jugoslavenske Akademije znanosti i umjetnosti. Sekcija za preradu i primjenu nafte. Serija C, Knjiga 9: 111-119.
- [22] Jurjavčič, P., Mladenovič, A., Cotič, Z. 2013. Priročnik za uporabo agregata iz črne jeklarske žindre iz elektroobločnih peči v asfaltnih obrabnih plasteh. Maj 2013. Konzorcij projekta ReBirth: 34 str.
http://www.re-birth.eu/scripts/download.php?file=/data/Prirocnik_za_uporabo_agregata.pdf
(Pridobljeno 5.4.2016).
- [23] Cotič, Z., Čibej, K. 2007. Žindra v asfaltu. Zbornik referatov – 11. Kolokvij o asfaltih in bitumnih. Kranjska Gora, ZAS – Združenje asfalterjev Slovenije: str. 73-81.

Standardi in tehnične specifikacije

- [24] TSC 06.730:2001. Predhodna sestava asfaltne zmesi. Tehnična specifikacija za javne ceste. Direkcija Republike Slovenije za ceste. Ljubljana 2001.
- [25] SIST EN 933-1:2012. Preskusi geometričnih lastnosti agregatov - 1. del: Ugotavljanje zrnivosti - Metoda sejanja.
- [26] SIST 1038-1:2008. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 1.del: Bitumenski beton - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-1.
- [27] SIST 1038-1:2008/AC101:2009. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 1.del: Bitumenski beton - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-1 - Popravek AC101.
- [28] SIST EN 13108-20:2006/AC:2009. Bitumenske zmesi - Specifikacije materialov - 20. del: Tipski preskus.
- [29] SIST EN 13043:2002/AC:2004. Agregati za bitumenske zmesi in površinske prevleke za ceste, letališča in druge prometne površine.

- [30] SIST 1043:2009. Agregati za bitumenske zmesi in površinske prevleke za ceste, letališča in druge prometne površine – Zahteve.
- [31] SIST 1038-5:2008. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 5. del: Drobir z bitumenskim mastiksom - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-5.
- [32] SIST 1038-5:2008/AC102:2011. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 5. del: Drobir z bitumenskim mastiksom - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-5 - Popravek AC102.
- [33] SIST 1038-6:2008. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 6. del: Liti asfalt - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-6.
- [34] SIST 1038-6:2008/AC101:2009. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 6. del: Liti asfalt - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-6 - Popravek AC101.
- [35] SIST 1038-7:2008. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 7. del: Drenažni asfalt - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-7.
- [36] SIST 1038-7:2008/AC101:2009. Bituminizirane zmesi - Specifikacije materialov - 7. del: Drenažni asfalt - Zahteve - Pravila za uporabo SIST EN 13108-7 - Popravek AC101.
- [37] SIST EN 12591:2009. Bitumen in bitumenska veziva - Specifikacije za cestogradbene bitumne.
- [38] SIST EN 14023:2010. Bitumen in bitumenska veziva - Okvirna specifikacija za bitumne, modificirane s polimeri.
- [39] SIST 1035:2008. Bitumen in bitumenska veziva - Cestogradbeni, s polimeri modificirani bitumni - Zahteve in pravila za uporabo SIST EN 14023.
- [40] SIST EN 1097-7:2008. Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov - 7. del: Določevanje prostorninske mase zrn kamene moke - Postopek s piknometrom.
- [41] SIST EN 1097-4:2008 Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov - 4. del: Določevanje votlin v suho zbiti kameni moki.
- [42] SIST EN 13179-1:2013 Preskus kamene moke za bitumenske zmesi - 1. del: Delta preskus prstan-kroglica.
- [43] SIST EN 1427:2015. Bitumen in bitumenska veziva - Določanje zmehčišča - Metoda prstana in kroglice.
- [44] SIST EN 1426:2015 Bitumen in bitumenska veziva - Določanje penetracije z iglo.
- [45] SIST EN 12697-1:2012. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltno zmesi - 1. del: Topni delež veziva.

- [46] SIST EN 12697-3:2013. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 3. del: Ugotavljanje deleža veziva: rotacijski uparjalnik.
- [47] SIST EN 12697-5:2010/AC:2012. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 5. del: Ugotavljanje največje gostote.
- [48] SIST EN 12697-6:2012. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 6. del: Ugotavljanje prostorninske gostote bitumenskih preskušancev.
- [49] SIST EN 12697-8:2004. Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 8. del: Ugotavljanje značilnosti votlin v bitumenskih preskušancih.
- [50] SIST EN 12697-10:2002/AC:2007. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 10. del: Zgoščenost.
- [51] SIST EN 12697-12:2009. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 12. del: Ugotavljanje občutljivosti bitumenskih preskušancev na vodo.
- [52] SIST EN 12697-23:2004. Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 23. del: Ugotavljanje posredne natezne trdnosti bitumenskih preskušancev.
- [53] SIST EN 12697-27:2002. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 27: Sampling.
- [54] SIST EN 12697-29:2004. Bitumenske zmesi – Preskusna metoda za vroče asfaltne zmesi – 29. del: Ugotavljanje mer bitumenskega preskušanca.
- [55] SIST EN 12697-30:2012 Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 30. del: Priprava preskušancev z udarnim zgoščevalnikom.
- [56] SIST EN 12697-34:2012. Bitumenske zmesi - Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 34. del: Preskus po Marshallu.
- [57] JUS U.E4.014:1990. Projektovanje i gradenje puteva - Izrada habajucih slojeva od asfaltnih betona po Vrućem postupku - Tehnički uslovi.
- [58] SIST EN 13108-1:2016. Bitumenske zmesi - Specifikacije materialov - 1. del: Bitumenski beton.

Diplomska dela, Seminarske naloge

- [59] Pevec, R. 2013. Tehnologija proizvodnje in analiza uporabe gumiranega asfalta. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, UL FGG, oddelek za gradbeništvo-prometna smer.
- [60] Kljajič, P. 2012. Bentonitne gline. Seminarski rad. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-Geološko-Naftni Fakultet, smjer Rudarstvo. Zagreb, 2012.

Navodila in certifikati proizvajalcev

- [61] Sasol: Priporočila za doziranje pri uporabi Sasobita®.
- [62] Kerovit – Informacija za proizvajalce asfalta - SLO - nov. 2015: S Kerovit®-om modificiran asfalt izboljšuje trajnost vozišča.
- [63] Holcim mineralni agregati d.o.o. kamenolom u Očuri, Izjava o svojstvima br. AG-007/Oč, z dne 20.3.2014.
- [64] Holcim mineralni agregati d.o.o. kamenolom u Očuri, Izjava o svojstvima br. AG-008/Oč, z dne 20.3.2014.

Internetne strani

- [65] HK Asphalt Handelskontor GmbH & Co. KG.
<http://www.hk-asphalt.de/22-0-Asphaltrecycling.html>. (Pridobljeno 6.4.2016).
- [66] HighwaysIndustry.com .
<http://www.highwaysindustry.com/asphalt-recycling-centre-opens/> (Pridobljeno 6.4.2016).