

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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNA SMER

Kandidat:

**BLAŽ HRAST**

**HLADNA RECIKLAŽA OBSTOJEČIH CEST -  
STABILIZIRANJE Z RAZLIČNIMI VEZIVI**

Diplomska naloga št.: 3223/PS

**COLD RECYCLING OF EXISTING ROADS -  
STABILIZATION WITH DIFFERENT BINDERS**

Graduation thesis No.: 3223/PS

**Mentor:**  
prof. dr. Janez Žmavc

**Predsednik komisije:**  
izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**  
mag. Dejan Hribar  
Zvonko Cotič, dipl. inž. grad.

Ljubljana, 28. 5. 2012

## **IZJAVE**

Podpisani Blaž Hrast izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Hladna reciklaža obstoječih cest – stabiliziranje z različnimi vezivi«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 7.5.2012

Blaž Hrast



## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 625:656.1:691.16(043.2)
- Avtor:** Blaž Hrast
- Mentor:** prof. dr. Janez Žmavc
- Somentor:** mag. Dejan Hribar
- Somentor:** Zvonko Cotič, dipl. inž. grad.
- Naslov:** Hladna reciklaža obstoječih cest – stabiliziranje z različnimi vezivi
- Obseg in oprema:** 66 str., 19 pregl., 55 sl., 3 en.
- Ključne besede:** voziščna konstrukcija, stabilizacija, vezivo, vezana nosilna plast

### **Izvleček:**

V prvem delu naloge so opisani različni postopki obnove dotrajanih cest s poudarkom na reševanju strukturnih poškodb z globoko reciklažo po hladnem postopku. Opisani so tudi vzroki za nastanek poškodb voziščnih konstrukcij. Reciklaža poškodovanih voziščnih konstrukcij se izvede tako, da se odrezka celotno asfaltno vozišče, del kamnitega materiala (nevezane nosilne plasti) in doda ustrezno količino veziva (penjeni bitumen, cement, apno...). Kot rezultat ustvarimo debele strjene plasti, ki so homogene in ne vsebujejo šibkih vmesnih ploskev med tanjšimi plastmi voziščne konstrukcije kot npr. v konvencionalno izdelanih voziščnih konstrukcijah. Stabiliziran material je veliko bolj nosilen in zmrzlinško odporen. Odlagališča izrabljenega materiala niso potrebna, potrebna količina novega materiala je minimalna.

V drugem delu je predstavljena moja eksperimentalna naloga, ki je bila izdelana v podjetju Primorje d.d. iz Ajdovščine. Izdelane so bile laboratorijske sestave stabilizacijskih mešanic iz recikliranega materiala voziščne konstrukcije lokalne ceste. Raziskave z različnimi hidravličnimi vezivi so potekale skladno s standardom SIST EN 14227-1:2005. Stabilizirane mešanice so bile klasificirane v trdnostne razrede glede na tlačno trdnost in glede na kombinacijo natezne trdnosti in modula elastičnosti.



## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK:** 625:656.1:691.16(043.2)

**Author:** Blaž Hrast

**Supervisor:** prof. Janez Žmavc, Ph.D.

**Cosupervisor:** Dejan Hribar, M.Sc.

**Cosupervisor:** Zvonko Cotič, B.Sc.

**Title:** Cold recycling of existing roads – stabilization with different binders

**Notes:** 66 p., 19 tab., 55 fig., 3 eq.

**Key words:** pavement structure, stabilization, binder, roadbase

### **Abstract:**

The first part of the thesis describes different methods for reconstruction worn-out roads with focus on solving structural deformations with deep-cold recycling. It is also describing causes for pavement distress. Recycling of damaged pavement structures is implemented in such manner that the whole asphalt pavement and a part of stone material (unbound bearing course) are cut-off, and relevant quantity of binder (foamed bitumen, cement, lime...) is added. As a result we produce thick, hardened layers that are homogenous and have no weak interfaces between thinner pavement structure layers, as it is in case of e.g. conventionally produced pavement structures. The stabilised material becomes more supporting and more resistant to freezing. Disposal facilities for worn-out material are not necessary, and required volume of new material is minimal.

The second part presents my experimental assignment, which was made in company Primorje d.d. from Ajdovščina. Job-mix formulas were prepared in the laboratory with recycled material from a local road. Researches with different binders were confirming to SIST EN 14227-1:2005. Stabilised mixtures were classified into strength classes by compressive strength and by direct tensile strength and the module of elasticity.



## **ZAHVALA**

Za usmerjanje in nasvete pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Janezu Žmavcu, somentorju Zvonku Cotiču, dipl. inž. grad., in somentorju mag. Dejanu Hribarju. Za pomoč in potrpežljivost pri delu v laboratoriju se zahvaljujem Primožu Jurjavčiču, univ. dipl. inž. grad., in laborantu Branetu Kaurinu, inž. kem. teh..

Najbolj pa se zahvaljujem svoji družini, ki mi je stala ob strani in me podpirala vsa študijska leta.





## KAZALO VSEBINE

Izjave .....	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček .....	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract .....	V
Zahvala.....	VII
1 UVOD .....	1
2 STANJE CEST .....	4
3 VZROKI ZA NASTANEK POŠKODB VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE.....	5
3.1 Zunanji vplivi .....	5
3.2 Pomanjkljivo načrtovanje .....	6
3.3 Pomanjkljiva izvedba.....	7
3.4 Pomanjkljivo vzdrževanje .....	8
3.5 Neprimerna uporaba.....	8
4 POSTOPKI ZA POPRAVILO VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE .....	9
4.1 Uvod.....	9
4.2 Popravila omejena na krovno plast .....	10
4.2.1 Nadgradnja obstoječe vozne površine z novo plastjo (angl. overlay) .....	11
4.2.2 Zamenjava poškodovane asfaltne plasti (angl. remove & replace) .....	11
4.2.3 Reciklaža poškodovane asfaltne plasti .....	12
4.2.3.1 Reciklaža po vročem postopku.....	12
4.2.3.1.1 Reshape – brez dodane bituminizirane zmesi.....	13
4.2.3.1.2 Repave – z dodano bituminizirano zmesjo brez mešanja.....	14
4.2.3.1.3 Remix – z dodano bituminizirano zmesjo in mešanjem.....	14
4.2.3.1.4 Remix plus – z dodano bituminizirano zmesjo in mešanjem ter nadgraditvijo z dodatno plastjo bituminizirane zmesi.....	15
4.2.3.2 Reciklaža po hladnem postopku .....	15
4.2.3.2.1 Uporaba v bituminiziranih zmesih, proizvedenih po vročem postopku v mešalni opremi .....	16
4.2.3.2.2 Uporaba v hladnih bituminiziranih zmesih .....	16
4.2.3.2.3 Uporaba brez dodatnih materialov.....	17
4.3 Popravilo strukturnih poškodb voziščnih konstrukcij .....	19

4.3.1 Obnovitev voziščne konstrukcije z zamenjavo.....	19
4.3.2 Globoka reciklaža po hladnem postopku .....	20
4.3.3 Kombinacija reciklaž in-place in in-plant .....	20
5 GLOBOKA RECIKLAŽA PO HLADNEM POSTOPKU .....	22
5.1 Uvod.....	22
5.2 Mehanizacija.....	22
5.3 Sprememba plasti v voziščni konstrukciji zaradi globoke reciklaže .....	26
5.4 Pomen stabilizirane plasti.....	27
5.5 Veziva za stabilizacijo .....	28
5.5.1 Anorganska veziva.....	29
5.5.2 Organska veziva.....	31
5.5.2.1 Penjen bitumen .....	32
5.5.2.2 Izdelava recepture .....	33
5.6 Prednosti obnove dotrajanih voziščnih konstrukcij po postopku hladne reciklaže .....	35
6 EKSPERIMENTALNI DEL .....	37
6.1 Uvod.....	37
6.2 Cilji .....	37
6.3 Metode dela .....	38
6.4 Obstoječe stanje vozišča na cesti Idrija-Idrijska Bela .....	40
6.5 Vrsta in sestava zmesi zrn.....	40
6.6 Optimalna vlažnost in največja prostorska masa.....	44
6.7 Izdelava preskušancev.....	45
6.8 Hranjenje preskušancev .....	47
6.9 Klasifikacija stabiliziranih mešanic .....	48
6.9.1 Sistem 1.....	49
6.9.2 Sistem 2.....	50
6.10 Rezultati meritev trdnosti in modula elastičnosti .....	53
7 ANALIZA REZULTATOV.....	59
7.1 Uvod.....	59
7.2 Določitev optimalne količine hidravličnega veziva .....	60
7.3 Odpornost mešanice proti škodljivim vplivom vremena .....	63
8 ZAKLJUČEK .....	64

## KAZALO PREGLEDNIC

<b>Preglednica 1: Metode površinske reciklaže s ponovno uporabo bituminiziranih zmesi po vročem postopku .....</b>	<b>13</b>
<b>Preglednica 2: Razdelitev popravil voziščne konstrukcije .....</b>	<b>18</b>
<b>Preglednica 3: Najpomembnejše tehnične lastnosti reciklatorja WR 2500 S .....</b>	<b>23</b>
<b>Preglednica 4: Razdelitev standarda SIST EN 14227 .....</b>	<b>38</b>
<b>Preglednica 5: Določitev sestave zmesi zrn .....</b>	<b>41</b>
<b>Preglednica 6: Mejne vrednosti presejkov zmesi zrn 0/31,5 (aneks B, SIST EN 14227-1:2005)..</b>	<b>42</b>
<b>Preglednica 7: Mejne vrednosti presejkov zmesi zrn po TSC 06.320.....</b>	<b>42</b>
<b>Preglednica 8: Dimenzije Proctorjevih kalupov (SIST EN 13286-2:2005) .....</b>	<b>46</b>
<b>Preglednica 9: Osnovni podatki postopkov zgoščevanja (SIST EN 13286-2:2005).....</b>	<b>47</b>
<b>Preglednica 10: Primeri različnih režimov staranja preskušancev ki jih predlaga standard SIST EN 14227-1:2005.....</b>	<b>47</b>
<b>Preglednica 11: Klasifikacija s hidravličnimi vezivi stabilizirane mešanice glede na tlačno trdnost (vir: SIST EN 14227-1:2005) .....</b>	<b>49</b>
<b>Preglednica 12: Klasifikacija hidravlično stabilizirane mešanice glede na modul elastičnosti in natezne trdnosti (SIST EN 14227-1:2005).....</b>	<b>51</b>
<b>Preglednica 13: Minimalna količina dodanega veziva nekaterih držav Evrope .....</b>	<b>54</b>
<b>Preglednica 14: Mehanske lastnosti mešanic z vezivom A in klasifikacija po sistemu 1 in 2 .....</b>	<b>54</b>
<b>Preglednica 15: Mehanske lastnosti mešanic z vezivom B in klasifikacija po sistemu 1 in 2 .....</b>	<b>56</b>
<b>Preglednica 16: Mehanske lastnosti mešanic z vezivom C in klasifikacija po sistemu 1 in 2 .....</b>	<b>57</b>
<b>Preglednica 17: Primerjava projektnih zahtev in doseženih vrednosti z vezivom C .....</b>	<b>57</b>
<b>Preglednica 18: Mehanske lastnosti mešanic z vezivom D in E ter klasifikacija po sistemu 1 in 2 .....</b>	<b>58</b>
<b>Preglednica 19: Primerjava zahtev evropskih držav in vrednosti za z vezivom A stabilizirano zmes zrn (količina veziva 100 kg/m<sup>3</sup>).....</b>	<b>61</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Dotrajana cesta potrebna globinske sanacije.....	2
Slika 2: Globoke in široke mrežaste razpoke po celem asfaltnem vozišču .....	4
Slika 3: Udarne jama, ki ogroža varnost prometa .....	4
Slika 4: Prodiranje vode v vozišče (COST 351 – Watmove).....	6
Slika 5: Dodatnemu vlaženju zaradi slabega odvodnjavanja sledi porušitev vozišča .....	8
Slika 6: Voziščni konstrukciji se razlikujeta po vrsti poškodbe: (a) poškodba omejena na krovno plast ceste, (b) strukturna poškodba (Wirtgen, 2010) .....	10
Slika 7: Shema nadgradnje z novo plastjo .....	11
Slika 8: Zamenjava poškodovane asfaltne plasti (Wirtgen, 2010) .....	12
Slika 9: Postopek za oblikovanje ravnosti vozne površine (TSC 06.800) .....	14
Slika 10: Centralni obrat za šaržno proizvodnjo asfaltnih zmesi z mešanjem po vročem postopku (Žmavc, 2007).....	16
Slika 11: Uporaba asfaltnega granulata na manj pomembnih vozniških površinah .....	17
Slika 12: Obnovitev voziščne konstrukcije z zamenjavo (Wirtgen, 2010).....	19
Slika 13: Izvajanje reciklaže v mešalni opremi (in-place) (Wirtgen, 2010).....	20
Slika 14: Kombinacija reciklaž in-place in in-plant (Wirtgen, 2010) .....	21
Slika 15: Obnova cest s hladno reciklažo na licu mesta (vir: Primorje).....	22
Slika 16: Rezkalni valj z noži za izkop (Wirtgen, 2010).....	23
Slika 17: Dimenzije reciklatorja WR 2500 S (Wirtgen, 2010).....	24
Slika 18: Najpogostejši reciklažni nizi strojev za hladno reciklažo .....	25
Slika 19: Pregled vseh plasti v prerezu voziščne konstrukcije .....	26
Slika 20: Sprememba plasti v voziščni konstrukciji zaradi globoke reciklaže (TSC 06.800) .....	26
Slika 21: Raznos obremenitev v voziščni konstrukciji z vezano in nevezano nosilno plastjo (Wirtgen, 2010) .....	27
Slika 22: Rast cene bitumna v evrih na eno tono (Department of Transportation, 2011) .....	29
Slika 23: Posipavanje cementa (vir: Primorje).....	30
Slika 24: Priprava mešanice s cementom in kemijskim dodatkom.....	31
Slika 25: Proizvodnja hladne bituminizirane zmesi s penjenim bitumnom (TSC 06.800) .....	33
Slika 26: Določitev karakteristik penjenega bitumna (Cotič, 2006) .....	34
Slika 27: Reciklator WIRTGEN WR 2500 S pri izvedbi hladne reciklaže z uporabo penjenega bitumna (Primorje, 2006) .....	37
Slika 28: Laboratorij Vrtojb ob asfaltni bazi CPG .....	39
Slika 29: Hranjenje zmesi zrn pri laboratoriju za asfalte Vrtojb .....	40
Slika 30: Reciklirana zmes zrn pred mešanjem z vezivi .....	40
Slika 31: Mejne krivulje v skladu s standardom SIST EN 14227-1:2005 .....	41

<b>Slika 32: Mejne krivulje v skladu s tehnično specifikacijo za ceste TSC 06.320 .....</b>	<b>43</b>
<b>Slika 33: Mejne krivulje za hladno reciklažo s penjenim bitumnom (Wirtgen, 2010) .....</b>	<b>43</b>
<b>Slika 34: Soodvisnost prostorninske gostote suhega materiala in deleža v vode v recikliranem materialu .....</b>	<b>44</b>
<b>Slika 35: Kontrola vlage s kepo mešanice .....</b>	<b>44</b>
<b>Slika 36: Shema dimenzij Proctorjevega kalupa (SIST EN 13286-2:2005) .....</b>	<b>45</b>
<b>Slika 37: Izdelava preskušancev po Proctorju.....</b>	<b>45</b>
<b>Slika 38: Hranjenje preskušancev v komori.....</b>	<b>48</b>
<b>Slika 39: Razkalupljanje po enem dnevu .....</b>	<b>48</b>
<b>Slika 40: Tipi primernih in neprimernih porušitev preskušancev(SIST EN 13286-41:2004) .....</b>	<b>50</b>
<b>Slika 41: Primer primerne porušitve preskušanca po enoosni tlačni obremenitvi .....</b>	<b>50</b>
<b>Slika 42: Grafičen prikaz klasifikacije po sistemu 2 (EN 14227-1:2005) .....</b>	<b>52</b>
<b>Slika 43: Stiskalnica za preizkušanje posredne natezne trdnosti .....</b>	<b>52</b>
<b>Slika 44: Primer primerne porušitve preskušanca .....</b>	<b>52</b>
<b>Slika 45: Preiskave modula elastičnosti je izvedel Igmata d.d., Inštitut za gradbene materiale.....</b>	<b>53</b>
<b>Slika 46: Odvisnost tlačne trdnosti stabilizirane mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend) .....</b>	<b>55</b>
<b>Slika 47: Odvisnost posredne natezne trdnosti stabilizirane mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend).....</b>	<b>55</b>
<b>Slika 48: Odvisnost tlačne trdnosti stabilizacijske mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend).....</b>	<b>56</b>
<b>Slika 49: Odvisnost posredne natezne trdnosti stabilizacijske mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend).....</b>	<b>56</b>
<b>Slika 50: Časovni razvoj tlačne trdnosti z vezivom C stabilizirane mešanice .....</b>	<b>58</b>
<b>Slika 51: Prikaz asfaltne granulate v prerezu vzorca stabiliziranega materiala.....</b>	<b>59</b>
<b>Slika 52: Tlačne trdnosti stabiliziranih mešanic z različnimi deleži veziv A,B in C po 7 dneh.....</b>	<b>60</b>
<b>Slika 53: Tlačne trdnosti stabiliziranih mešanic z različnimi deleži veziv A,B in C po 28 dneh... </b>	<b>60</b>
<b>Slika 54: Grafični prikaz rezultatov klasifikacije po sistemu 2 izbranih deležev veziv A, B in C</b>	<b>62</b>



## 1 UVOD

Vitalnega pomena za državo so vlaganja v razvoj in obnovo cestnega omrežja. Pri konkurenčnosti gospodarstva, razvoju tehnologije in znanj ima nezanemarljiv delež državna prometna politika. V Sloveniji kakovost in obseg ponudbe infrastrukturnih storitev na državnih in občinskih cestah ne zadovoljuje današnjih potreb. Rezultat nepravilnega finančnega vlaganja in vsakoletnega naraščanja prometa je po podatkih iz poročila DRSC-ja (Direkcija Republike Slovenije v letu 2010) samo 38 % glavnih in regionalnih cest v dobrem in zelo dobrem stanju. Od skoraj 6.000 km državnih cest, katere upravlja DRSC, je za zagotovitev zahtevane prevoznosti in prometne varnosti skoraj polovica cest potrebna posodobitve. Stanje občinskih cest je zelo podobno državnim.

Vzrok današnjega stanja cestnega omrežja je upravičeno iskati tudi v tem, da številne ceste niso bile dimenzionirane za tolikšen obseg prometa. Poleg gostote se je povečala tudi obremenitev prometa. Po končani dobi trajanja sledi izbira sanacijskega ukrepa dotrajane in poškodovane ceste (slika 1). Določimo ga glede na stanje voziščne konstrukcije in cilj, ki ga hočemo z ukrepom doseči. S številnimi meritvami in kontrolami stanja nas predvsem zanima, kakšna je narava poškodb voziščne konstrukcije. Strukturne nepravilnosti zahtevajo globinsko sanacijo, ki pa za učinkovitost zahteva večje posege. V vozišču so prepogosto vgrajeni materiali, ki so zmrzlinško neodporni, slabo nosilni in podvrženi slabim hidrološkim pogojem. Nevezana nosilna plast je pogosto zaglinjena. Žal pa so v praksi prevečkrat izbrani neustrezni postopki obnove, ki teh nepravilnosti ne odpravijo trajno in zato krajšajo življenjsko dobo ceste.

Zamenjava voziščne konstrukcije je eden od postopkov za globinsko sanacijo. Kljub dotrajanosti je odstranjeni material še vedno kakovosten (asfalt). S postopkom globoke reciklaže po hladnem postopku materiale iz voziščne konstrukcije stabiliziramo z vezivi, homogeno premešamo in ponovno vgradimo. Hladna reciklaža je sodobna in poceni metoda obnove cest, s katero bi lahko država in občine veliko prihranile. Izmed številnih prednosti izpostavimo še varovanje okolja. Pri zamenjavi voziščne konstrukcije je potreben izkop in odvoz starih materialov na deponijo, iz kamnoloma pa je potrebno pripravljen material pripeljati in vgraditi. Ker vsi ti postopki pri hladni reciklaži odpadejo, je vpliv na okolje bistveno manjši.





Slika 1: Dotrajana cesta potrebna globinske sanacije

Zeleno javno naročanje je inštrument, s katerim javni sektor postane eden pomembnejših akterjev pri zmanjšanju negativnih vplivov na okolje, znižanju porabe energije, vode in surovin, ohranjanju naravnih virov in biotske raznovrstnosti ter preprečevanju podnebnih sprememb. Z vključevanjem okoljskih meril in zahtev v javna naročanja si Evropska komisija in države članice prizadevajo, da bi bilo izbrano okolju najbolj prijazno blago, storitve in gradnje. Ti so v svojem celotnem življenjskem krogu tudi ekonomsko bolj ugodni. S tem se poveča prispevek javnega sektorja k trajnostnemu razvoju in daje zgled zasebnemu sektorju ter potrošnikom. Neposredno vpliva na razvoj novih okoljskih tehnologij, inovacij, okolju prijaznejših izdelkov ter ustvarjanje zelenega trga in dviganje konkurenčnosti.

Izmed številnih skupin izdelkov in storitev izpostavimo naročila javnih gradenj, v katera lahko uvrstimo hladno reciklažo obstoječih voziščnih konstrukcij. Z uvajanjem zelenih javnih gradenj se je izrazila želja po novi praksi kakovostnejše, ekonomične in okolju prijaznejše gradnje. Pri javnih naročilih je poleg kriterija najnižje cene merilo še kakovost, kar poveča razvojne izzive in iskanje najboljših rešitev za številna gradbena podjetja. Le tako so lahko ta bolj konkurenčna za nastop na domačih in zahtevnih tujih trgih. Sodobna metoda hladne reciklaže ima prednost v številnih merilih v primerjavi z ostalimi metodami obnove cest.

Vsebina diplomskega dela je obnova dotrajanih voziščnih konstrukcij s poudarkom na reševanju strukturnih poškodb z globinsko reciklažo po hladnem postopku. Opisane so prednosti, ki jih ima ta metoda v primerjavi s konvencionalnimi postopki. Diplomsko delo je razdeljeno na dva dela. V prvem delu so predstavljene teoretične osnove. Poglavje 3 najprej povzema vzroke za nastanek poškodb voziščne konstrukcije (po knjigi Vzdrževanje cest, J. Žmavc). V naslednjem poglavju sledi razdelitev postopkov popravila cest na postopke, omejene na krovno plast in na popravila zaradi strukturnih poškodb. V poglavju 5 je podrobno opisana metoda hladne reciklaže, predstavljena je potrebna mehanizacija in pomen stabilizirane plasti v cesti.

V drugem delu diplome je opisana moja raziskovalna naloga, ki je bila izdelana v podjetju Primorje iz Ajdovščine. Izdelane so bile laboratorijske sestave stabilizacijskih mešanic iz recikliranega materiala voziščne konstrukcije lokalne ceste. Raziskave z različnimi hidravličnimi vezivi so potekale skladno s standardom SIST EN 14227-1:2005. Hidravlično stabilizirane mešanice so bile klasificirane v trdnostne razrede glede na tlačno trdnost in glede na kombinacijo natezne trdnosti in modula elastičnosti.

## 2 STANJE CEST

Zaradi izpostavljenosti različnim zunanjim obremenitvam se osnovne lastnosti v voziščnih konstrukcijah vgrajenih materialov škodljivo spremenijo. Posledica so deformacije voziščne konstrukcije, ki se skozi čas kažejo v obliki poškodb na vozni površini. Tipične nastale poškodbe so razpoke (slika 2), kolesnice, posedki, udarne jame (slika 3), odlomljeni robovi in druge površinske deformacije. Cesta mora izpolnjevati zahteve uporabnikov cest, saj se večja delež neposrednega in posrednega prispevka uporabnikov cest za njihovo gradnjo in vzdrževanje. Zahteve se navezujejo na varnost, udobnost, gospodarno vožnjo in trajnost zgrajenih cest. Voziščne konstrukcije praviloma dimenzioniramo na 20 let, pri čemer je prvi ukrep običajno predviden po 15 letih. V praksi se navedene roke največkrat doseže, v posameznih primerih pa so prvi ukrepi potrebni tudi prej. V tej dobi trajanja voziščne konstrukcije je za zagotovitev zgoraj naštetih zahtev treba upoštevati osnove za določitev dimenzij voziščnih konstrukcij. Te so prometna obremenitev, nosilnost podlage (geološke razmere), lastnosti in kakovost vgrajenih materialov ter klimatski in hidrološki pogoji. Nepoznavanje oziroma neupoštevanje osnov vodi v prehitre škodljive spremembe na asfaltnih vozni površinah ali v strukturi voziščnih konstrukcij.



Slika 2: Globoke in široke mrežaste razpoke po celotnem asfaltnem vozišču



Slika 3: Udarne jama, ki ogroža varnost prometa

### **3 VZROKI ZA NASTANEK POŠKODB VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ**

Poznavanje v nadaljevanju opisanih vzrokov za nastanek poškodb je ključno pri gospodarnem ukrepanju in izbiri ustreznega postopka popravila. Pri presoji se moramo zavedati, da vzroki lahko vplivajo eden na drugega, včasih nastopijo tudi istočasno. V praksi obstajajo številni postopki preiskav in meritev, ki so podlaga za strokovno analizo trenutnega stanja. Samo na tak način je lahko izbrani postopek popravila trajno uspešen. Skupni cilj vsem postopkom popravila je čimprejšnja zaustavitev širjenja poškodb, ki drugače naraščajo do uporabe, ki je za promet omejena in nevarna, in do končnega stanja – porušitve.

Vzroke za nastanek poškodb razdelimo na:

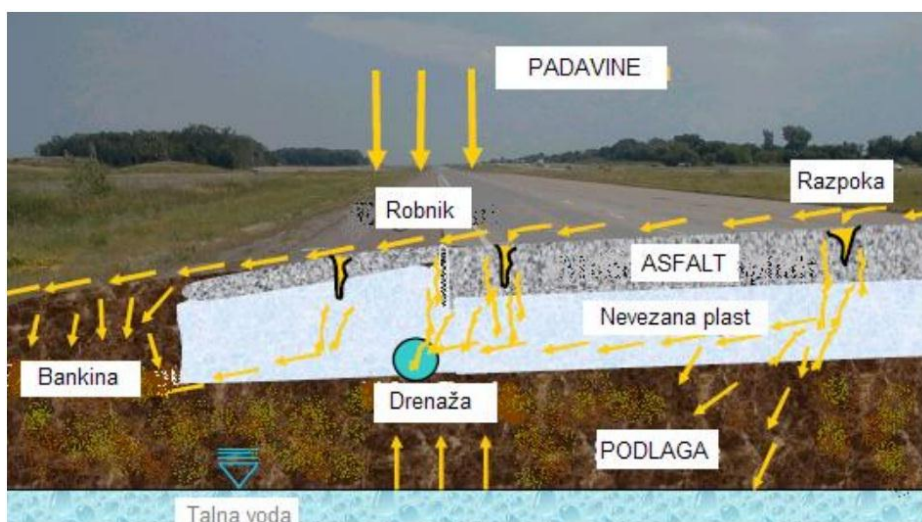
- zunanje vplive,
- pomanjkljivo načrtovanje,
- pomanjkljivo izvedbo,
- pomanjkljivo vzdrževanje,
- neprimerno uporabo.

#### **3.1 Zunanji vplivi**

Voziščne konstrukcije so izpostavljene različnim obremenitvam, najbolj pa prometnim in klimatskim. Vozila v prometu obremenjujejo z navpičnimi, horizontalnimi in sesalnimi silami. Vsaka sila pogojuje specifičen vpliv na materiale, vgrajene v voziščno konstrukcijo. Zaradi obremenitev se vezi v asfaltnih zmesih slabijo in pričenjajo trgati. Utrujanje materialov povzroči povečanje škodljivih sprememb, tudi če se obremenitev ne poveča. Še dodatno širjenje poškodb pospešuje izguba prvotne gibkosti bitumenskega veziva zaradi spremenjene strukture bituminizirane zmesi (staranje). Ob nepravilni prometni prognozi se zaradi preobtežitve pojavijo poškodbe še pred iztekom dobe trajanja.

Zaradi izgube elastične lastnosti bitumenskega veziva je poleti vpliv prometnih obremenitev na stanje asfaltnih vozniških površin povečan. Vgrajena bituminizirana zmes se do določene stopnje poškodovanosti plastično preoblikuje. V zimskem mrazu se zaradi krčenja bitumna poslabša adhezija bitumna z zrni, lahko pride tudi do ločitve. Sesalne sile avtomobilov iztrgajo delce iz vozišča, ki se vedno bolj odpira in izgublja celovito stabilnost. Nastale poškodbe pospešujejo njihovo večanje. Luknje in razpoke se pod prometno obremenitvijo s časom širijo in večajo. Zaradi odkrušitve in drobljenja asfaltnih kosov nastajajo udarne jame. Pri prehodu vozila preko udarnih jam in neravne vozne površine te povzročajo škodljive dodatne dinamične obremenitve, ki pospešujejo deformacije.

Klimatske obremenitve obravnavamo kot vplive nihanja temperatur, padavin, zmrzovanja, hidroloških razmer, vetra idr. Medtem ko prometna obremenitev vpliva predvsem na različna preoblikovanja vozne površine in utrujanje voziščne konstrukcije kot celote, povzročajo klimatski vplivi spremembe osnovnih materialov. Največje škodljive spremembe nosilnosti (togosti) povzroča voda. Ta prodre iz zalednega pobočja, s kapilarnim dvigom ali infiltracijo skozi bankine ali razpokano vozišče (slika 4). Da se v zimskih mesecih prepreči sprememba notranje zgradbe vgrajenega materiala zaradi zamrznitve vode, mora biti do globine prodiranja mraza vgrajen material, ki je odporen proti učinkom mraza. Kot ugodni ukrepi za zadovoljitev hidroloških pogojev se štejejo: dobro odvodnjavanje plitev ukop, nasip, visok najmanj 1,5 m, nivo talne vode, ki je nižji od globine zmrzovanja, iznad nivoja talne vode preprečeno dotekanje vode.



Slika 4: Prodiranje vode v vozišče (COST 351 – Watmove)

Kot zelo pomemben zunanji vpliv upoštevamo tudi značilnosti podlage (temeljna tla). Zagotoviti je treba nosilnost za prevzem prometnih obremenitev in odpornost na klimatske vplive. V odvisnosti od nosilnosti planuma podlage (CBR-test) se pri dimenzioniranju novogradnje določi dimenzijo nevezane nosilne plasti. Pogosto je podlaga iz vezljivih zemljin z visokim deležem drobnih zrn, ki so volumensko neobstojni. Neustrezna je tudi za prevzemanje velikih prometnih obremenitev. Rešitev je lahko ureditev odvodnjavanja, stabilizacija podlage in/ali izdelava posteljice na podlagi.

### 3.2 Pomanjkljivo načrtovanje

Škodljive spremembe voziščnih konstrukcij in spremembe na voziščih zaradi pomanjkljivosti načrtovanja nastanejo, ker pride do razlik med dimenzioniranimi in dejanskimi razmerami po izgradnji ceste. Pomanjkljivo lahko načrtujemo:

- prometne obremenitve,
- nosilnost podlage,
- lastnosti uporabljenih materialov,
- klimatske vplive.

To so osnovni parametri pri postopku določanja dimenzij voziščne konstrukcije. Strokovno opravljena predhodna analiza stanja in poznavanje prej naštetih parametrov sta pogoj za pravilno dimenzioniranje voziščne konstrukcije in določitev debelin posameznih plasti. Pogosto se zgodi, da je bila rast prometa na neki cesti ocenjena na manj, kot je bila dejanska po izgradnji, zato pride do preobtežbe na prešibko načrtovani voziščni konstrukciji. Pomembna ni samo gostota vozil, ampak tudi sprememba strukture vozil.

Zaradi konsolidacije lahko pride do razlik med načrtovanim in dejanskim posedanjem podlage. Velik vpliv na podlago igra tudi prisotnost vode, saj se lastnosti nosilnosti oz. podajnosti materiala v podlagi poslabšajo. Zaradi nepoznavanja nosilnosti podlage pri gradbenih vzdrževalnih ukrepih na obstoječih cestah je lahko odstopanje privzete nosilnosti podlage od dejanske veliko in temu primerne škodljive spremembe na zgrajeni voziščni konstrukciji in posledično tudi na vozišču.

### **3.3 Pomanjkljiva izvedba**

Osnovni pomanjkljivosti sta nepravilno vgrajevanje in nepravilno odvodnjavanje. Posledica je pospešen proces poškodovanja voziščne konstrukcije, podvržene prometnim in podnebnim obremenitvam. Pri preureditvah cest neprimerni materiali v podlagi niso v celoti odstranjeni, potrebna zgoščenost in nosilnost podlage nista doseženi. To se odraža v škodljivih spremembah stanja vozišč. Če je na območju cestnega telesa vgrajen tog element, bo zaradi različne podajnosti prišlo do škodljive spremembe na vozišču. Pri vgrajevanju in zgoščevanju imamo raje manj kakovostno, a homogeno plast, kot pa visokokakovostno neenakomerno plast. Škodljive spremembe nastanejo na asfaltnem vozišču tudi, če je promet pripuščen, ko temperatura vgrajene bituminizirane zmesi še omogoča preoblikovanje.

Osnovna naloga odvodnjavanja je preprečitev vstopa vode v voziščno konstrukcijo. Potrebna je čimprejšnja izvedba vseh ukrepov: preprečitev kapilarnega dviga, nagib bankin in vozišča za preprečitev infiltracije in preprečitev vdora zaledne vode. Na podlagi pod voziščno konstrukcijo so potrebni tudi primerni nagibi za odtekanje vode, saj je po navadi zgrajena iz bolj občutljivega materiala. Prav tako je potrebna opora krovnim asfaltnim plastem zagotovljena s primernim odvodnjavanjem bankin, predvsem na notranji strani vozišč v ostrejših krivinah.

### 3.4 Pomanjkljivo vzdrževanje

Nepravilna ali nepravočasna vzdrževalna dela na voznih površinah povzročijo povečevanje prvotnih majhnih poškodb, zato je nujno poškodbe cest čim prej po nastanku popraviti z ustreznim strokovnim ukrepom. Minimalni ukrepi, ki so pogosto izbrani za reševanje trenutnega stanja, so praviloma najmanj gospodarni in trajni, čeprav so morda v tehničnem pogledu popolnoma ustrezni. Zaradi premajhnih finančnih vlaganj v vzdrževanje obstoječega cestnega omrežja ponudba cest ne ustreza današnjim potrebam.

Klasični vzroki poškodb, ki jih pripisujemo pomanjkljivemu vzdrževanju, so med drugim tudi previsoke ali prenizke bankine (slika 5), neprimerno krpanje udarnih jam, neprimerna obdelava razpok in zanemarjeno (neočiščeno) odvodnjavanje.



Slika 5: Dodatnemu vlaženju zaradi slabega odvodnjavanja sledi porušitev vozišča

### 3.5 Neprimerna uporaba

Na asfaltnih obrabnih plasteh vozišč med drugim nastanejo škodljive spremembe zaradi snežnih verig na težkih vozilih, zaradi neprimerno opremljenih gradbenih strojev, razlitij vplivnih tekočin, prekomerne osne obremenitve motornih vozil in vlačjenja težkih predmetov po vozišču.

## **4 POSTOPKI ZA POPRAVILO VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ**

### **4.1 Uvod**

V skladu s tehničnimi in pravnimi predpisi se organizirajo vzdrževalna dela na cestah tako, da je zagotovljena udobna, gospodarna in varna uporaba čim dalj časa njihovega trajanja. Ta se izvajajo vestno in po strokovnih postopkih, z uporabo sodobnih tehnologij in mehanizacije ter z usposobljenimi izvajalci. Z vzdrževanjem hočemo doseči primerno uporabnost cestnega omrežja in zadovoljiti uporabnikova pričakovanja. Ločimo dve skupini vzdrževanj:

- redno vzdrževanje in
- gradbeno vzdrževanje.

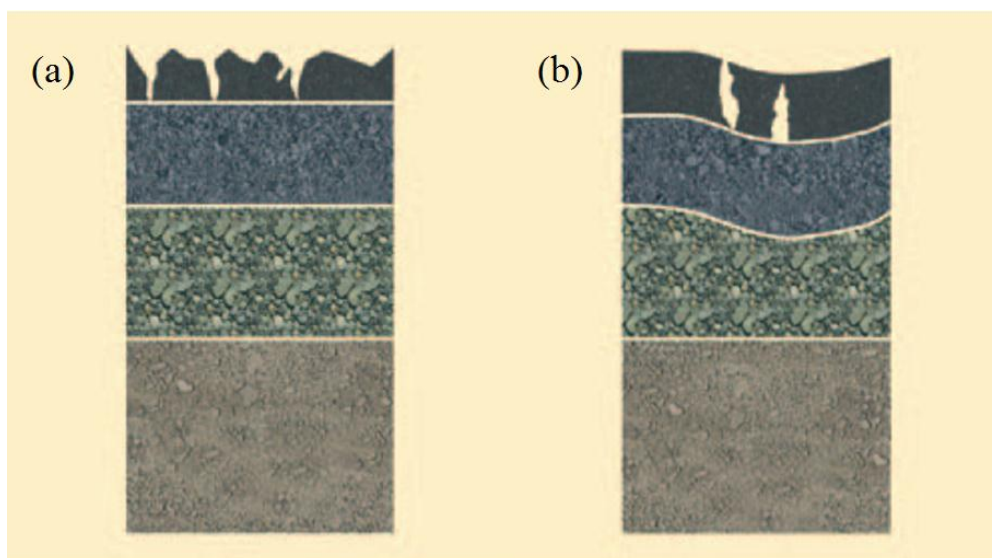
Glavna razlika med tema dvema skupinama je v obsegu del. Redno vzdrževanje opredelimo kot skupni pojem za hitre ukrepe manjšega obsega za ohranitev uporabnosti ceste v vseh razmerah skozi celo leto. Gre predvsem za rutinska dela, ki morajo biti izvedena takoj, ko na cesti nastanejo škodljive spremembe. Z ustreznimi meritvami in preskusi predhodno preučimo in ocenjujemo vzroke za nastale spremembe. Na podlagi tega izberemo ukrepe. Pri izbiri postopka izberemo takšnega, da bo doba trajanja izvršenega popravila čim daljša ob čim manjših stroških. Tako se prepreči razgradnja v voziščnih konstrukcijah vgrajenega materiala in s tem večje poškodbe.

Med gradbena vzdrževanja spadajo zahtevnejša in obširnejša vzdrževalna dela, ki jih opredeljujemo kot obnavljanje cest. Izvajamo jih, ko z rednim vzdrževanjem ne ohranjamo več potrebne uporabnosti. Njihov cilj je ponovna vzpostavitev prvotne uporabnosti. To storimo z izboljšanjem lastnosti voziščne konstrukcije (nosilnost, odpornost proti preoblikovanju in učinkom zmrzovanja, odvodnjavanje), izboljšanjem prometne varnosti, izboljšanjem zaščite okolja in izboljšanjem vozne površine (hrapavost, ravnost).

Za ceste velja, da so izpostavljene stalno naraščajočim prometnim obremenitvam, zato je treba stanje cest optimalno prilagoditi trenutnim in predvidenim povečanim zahtevam prometa. Kadar načrtujemo obnovo voziščne konstrukcije, nas predvsem zanimata dva vhodna podatka. Definirati je treba poškodbeni mehanizem in dobo trajanja, ki jo hočemo s posegom zagotoviti na tej cesti. S pomočjo podrobne analize lahko dobimo objektivno oceno stanja vozne površine in voziščnih konstrukcij ter razloge za škodljive spremembe. Vizualno oceno jakosti in obsega značilnih škodljivih sprememb upoštevamo le delno, ker ni dovolj natančna in objektivna.



Pri določanju poškodbenega mehanizma je pomembno ugotoviti, ali je poškodovana samo površina ceste ali pa je prišlo do strukturne poškodbe v voziščni konstrukciji (slika 6). Pri časovni dobi pa nas zanima, ali je popravilo samo začasni ukrep ali pa ukrep za daljše časovno obdobje.



Slika 6: Voziščni konstrukciji se razlikujeta po vrsti poškodbe: (a) poškodba omejena na krovno plast ceste, (b) strukturna poškodba (Wirtgen, 2010)

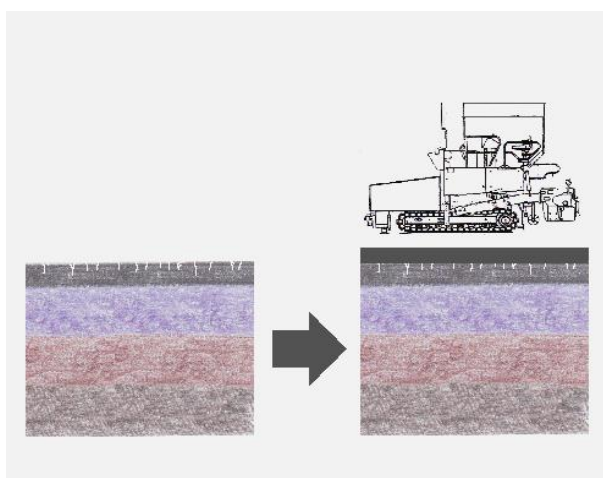
#### 4.2 Popravila omejena na krovno plast

Tu so poškodbe na vozni površini po navadi od 50 do 100 mm globoke. Materiali pod asfaltno plastjo niso deformirani in še vedno lahko opravljajo svojo nalogo. Poškodbe nastanejo zaradi nepravilne uporabe, staranja bitumna in/ali temperaturnih vplivov, ki razpokajo asfaltno plast. Pravočasni ukrep prepreči prodiranje vode skozi razpoke do občutljivih materialov in prepreči nastanek večjih strukturnih poškodb. Začasna minimalna popravila z rednim vzdrževanjem niso zadostna, ker ne povrnejo izgubljene uporabnosti. Potrebni so obsežnejši postopki za trajnejšo ureditev nastalih poškodb. Postopke razdelimo na:

- nadgradnjo obstoječe vozne površine z novo plastjo (angl. overlay),
- zamenjavo poškodovane asfaltne plasti (angl. remove & replace),
- reciklažo poškodovane asfaltne plasti (površinska reciklaža).

#### 4.2.1 Nadgradnja obstoječe vozne površine z novo plastjo (angl. overlay)

Postopek vgrajevanja nove asfaltne plasti na obstoječo obrabno plast velja za najenostavnejšo rešitev (slika 7). Z novo obrabno plastjo zagotovimo varnost, gospodarnost in udobnost uporabe. Teh lastnosti stara obrabna plast ne zagotavlja več. Prepričati se moramo, da so razne nepravilnosti in poškodbe na obstoječi obrabni plasti ustrezno sanirane pred preplastitvijo. Tako se razpoke in preoblikovanja na starem vozišču ne bodo ponovno pojavila na novi plasti. Nadgrajena voziščna konstrukcija mora biti sposobna prenesti predvidene prometne obremenitve. Postopek se izvaja relativno hitro.

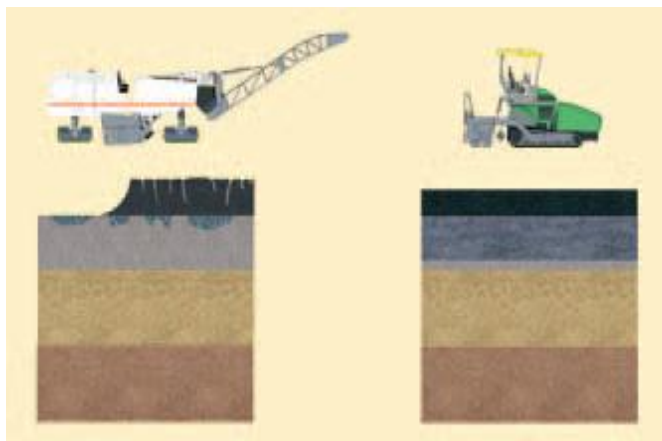


Slika 7: Shema nadgradnje z novo plastjo

#### 4.2.2 Zamenjava poškodovane asfaltne plasti (angl. remove & replace)

Kadar pride do večjih poškodb krovne plasti, je nadgradnja z novo plastjo nezadosten ukrep. Poškodovano asfaltno plast se z rezkanjem odstrani in nadomesti z novo plastjo (slika 8). Odstrani se lahko del ali pa celotna krovna plast. Niveleta vozišča je tako ohranjena ali povišana, če se zaradi povečanega prometa vgradi debelejša asfaltna plast.

Vzporedno z dimenzioniranjem asfaltnih plasti se kontrolira nosilnost podlage in nevezanih nosilnih plasti. Začasen ukrep je tudi ta, da po odstranitvi obrabne asfaltne plasti postane nova obrabna plast kar ena izmed obstoječih spodnjih asfaltnih plasti. To povzroči oslabitev voziščne konstrukcije, saj se plastične deformacije razvijajo še hitreje.



Slika 8: Zamenjava poškodovane asfaltne plasti (Wirtgen, 2010)

### 4.2.3 Reciklaža poškodovane asfaltne plasti

Vgrajeni asfaltni material je kljub dotrajanosti in utrujenosti še vedno dobre kakovosti, zato ga je z uveljavljenimi sodobnimi postopki reciklaže mogoče ponovno uporabiti. Z obdelavo teh materialov lahko dosežemo enako ali celo boljšo kakovost kot pri že uveljavljenih postopkih popravila. Odvoz starega in potreba po novem materialu sta minimalizirana. Reciklaža je prijaznejša do okolja, saj se vpliv nanj občutno zmanjša. Zmanjšata se poraba energije in izkoriščanje naravnih virov.

Glede na postopek obdelave vgrajenih plasti asfalta, s katerim pridobimo bituminizirane zmesi, ločimo dve večji skupini:

- z rezkanjem po vročem postopku in
- z rezkanjem ali izkopom in drobljenjem po hladnem postopku.

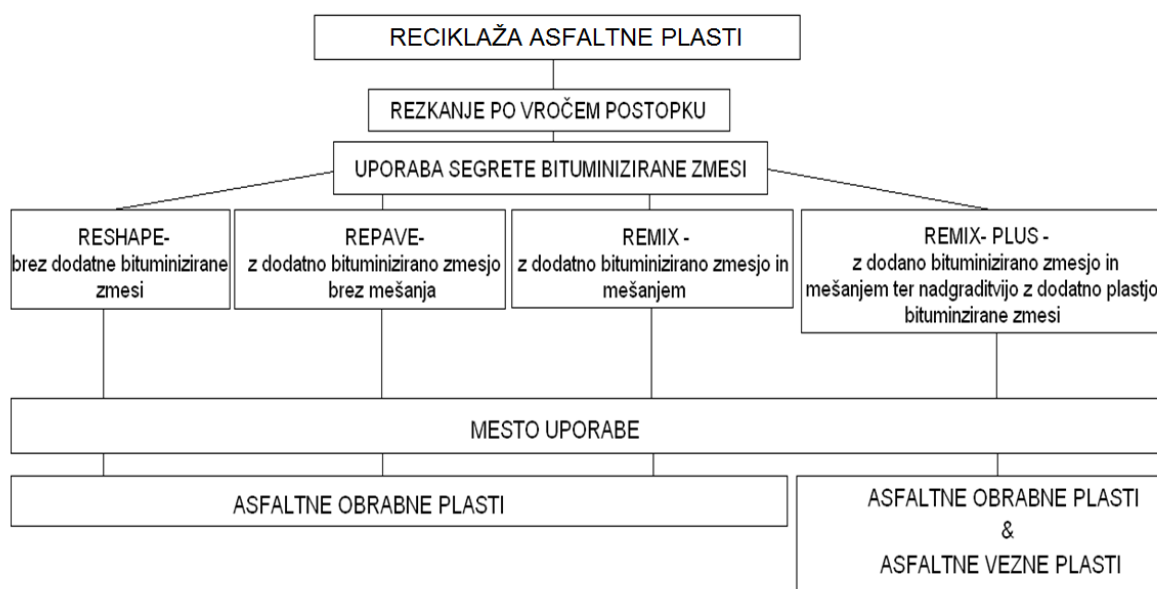
#### 4.2.3.1 Reciklaža po vročem postopku

Pridobljeno zmes z rezkanjem po vročem postopku se ponovno uporabi na mestu pridobitve. Tu gre za rahljanje segrete bituminizirane zmesi, kjer je zaradi nevarnosti zmanjšanja kakovosti veziva in omejenih možnosti segrevanja globina omejena na 5 cm. Sodobna strojna oprema za reciklažo ima velike zmogljivosti in omogoča izvedbo vseh faz postopka v zelo kratkih časovnih razmikih. Pogoji je kakovostna podlaga, ki je zmožna prenesti dodatne obremenitve, vključno z obremenitvami strojne opreme pri izvajanju. Uporaba je racionalna in ekonomično upravičena le na velikih površinah.

Po vročem postopku pridobljeno bituminizirano zmes se lahko ponovno uporabi na mestu vgraditve po štirih osnovnih postopkih:

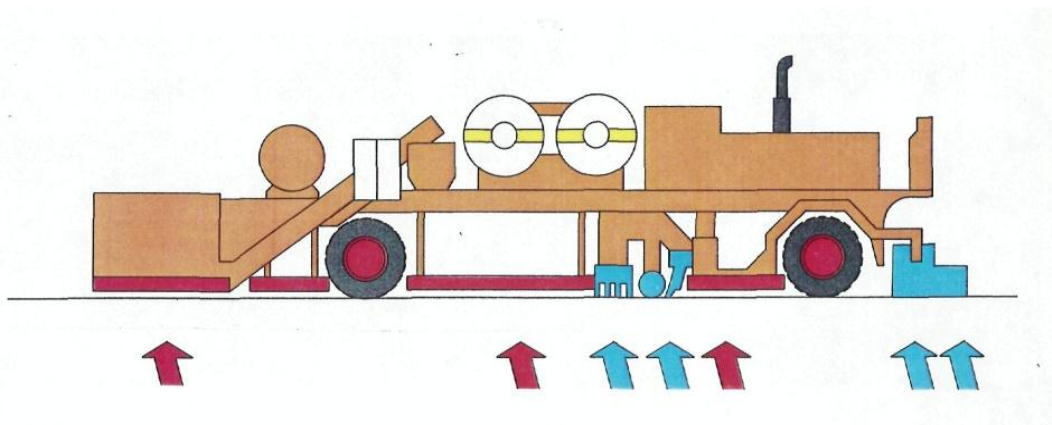
- reshape – brez dodane bituminizirane zmesi,
- repave – z dodano bituminizirano zmesjo brez mešanja,
- remix – z dodano bituminizirano zmesjo in mešanjem,
- remix plus – z dodano bituminizirano zmesjo in mešanjem ter nadgraditvijo z dodatno plastjo bituminizirane zmesi.

Preglednica 1: Metode površinske reciklaže s ponovno uporabo bituminiziranih zmesi po vročem postopku



#### 4.2.3.1.1 Reshape – brez dodane bituminizirane zmesi

Gre za uveljavljen postopek za ponovno oblikovanje ravnosti, če pride do škodljivih preoblikovanj asfaltnih površin (slika 9). Izvaja se s prehodom enega ali več strojev in brez dodatne bituminizirane zmesi. Z različnimi grelniki se obstoječo asfaltno površino segreje, da se lahko razrahlja ali odrezka predvideno debelino asfaltne plasti brez drobljenja zmesi zrn. Tako zrahljano bituminizirano zmes se brez dodatka izravna v profil, morebitni višek pa odstranimo in ga recikliramo v centralnem mešalnem obratu. Zgostitev izvedemo takoj, tako kot pri vgrajevanju običajnih bituminiziranih zmesih po vročem postopku.



Slika 9: Postopek za oblikovanje ravnosti vozne površine (TSC 06.800)

#### 4.2.3.1.2 Repave – z dodano bituminizirano zmesjo brez mešanja

Poleg izboljšanja ravnosti nam ta postopek omogoča še izboljšanje torne sposobnosti obstoječe obrabne asfaltne plasti. Izvedba je enaka kot pri postopku brez dodane bituminizirane zmesi, le da tu na izravnano asfaltno plast vgradimo novo bituminizirano zmes in nato zgostimo obe skupaj. Lastnosti reciklirane plasti se praviloma ne spremenijo. Stroj je opremljen z grelnikom, rahljalnikom in izravnalno desko. Z enim delovnim prehodom stroja segrejemo obrabno plast, jo zrahljamo, sprofiliramo in na sprofilirano reciklirano plast vgradimo nov obrabni sloj. Skupaj plasti ne mešamo. Količina nove obrabne plasti je odvisna od zahtev za obrabno plast, geometrijskih pogojev (priključkov, višina nivelete) in ugotovljene obrabe. Minimalna debelina dodatne asfaltne plasti je manjša kot debelina plasti pri posameznem vgrajevanju asfaltnih plasti.

#### 4.2.3.1.3 Remix – z dodano bituminizirano zmesjo in mešanjem

Postopek je podoben kot pri postopku z dodano bituminizirano zmesjo brez mešanja. Izboljšana je ravnost, torna sposobnost in deloma tudi nosilnost. Razlikuje se v tem, da se treba pridobljeno asfaltno zmes s predhodnim segrevanjem in rezkanjem premešati skupaj z novo zmesjo in jo nato vgraditi. Zgostitev plasti je treba izvesti takoj po vgraditvi. Tako so lahko lastnosti obstoječe bituminizirane zmesi glede na namen uporabe spremenijo. Pred pričetkom vsakega posega so potrebni predhodni laboratorijski preskusi obstoječe bituminizirane zmesi, namenjene za ponovno uporabo. Tako se zagotovi kakovost.

#### **4.2.3.1.4 Remix plus – z dodano bituminizirano zmesjo in mešanjem ter nadgraditvijo z dodatno plastjo bituminizirane zmesi**

Poleg vseh izboljšav, ki jih omogoči metoda remix, lahko pri tej dosežemo še večje izboljšanje nosilnosti voziščne konstrukcije. Potek obnove je podoben kot pri metodi remix z dodano bituminizirano zmesjo in mešanjem, le da na vrh nove reciklirane asfaltne površine naneseemo še dodatno novo obrabno plast asfalta. Za zagotovitev kakovosti so potrebne raziskave bituminizirane zmesi po mešanju kot tudi bituminizirane zmesi v dodatni plasti. Dodatna asfaltna plast je tanjša od predpisane pri vgrajevanju samostojnih plasti. Tako kot pri vseh prejšnjih opisanih postopkih mora tudi tu biti zgostitev celotne plasti izvedena takoj.

#### **4.2.3.2 Reciklaža po hladnem postopku**

Izraz hladna reciklaža se nanaša na pripravo ponovne rabe brez dodajanja toplote. Iz odsluženih in poškodovanih asfaltnih plasti z rezkanjem ali izkopavanjem in drobljenjem po hladnem postopku pridobivamo asfaltni granulati. Ta material se lahko ponovno uporabi kot nevezani material ali pa v sestavi nove bituminizirane zmesi, kjer ohrani vlogo veziva. Ključno je poznavanje vrste in sestave obstoječe zmesi, namenjene za odstranitev. Primernost odstranjenega asfaltne granulate za ponovno uporabo je treba preskusiti. Ugotoviti moramo ustreznost in enakomerno kakovost materiala, tako da je kakovost proizvedene nove bituminizirane zmesi z dodanim asfaltnim granulatom v mejah dovoljenih odstopanj za nove bituminizirane zmesi. Če asfaltni granulati različnih izvorov ni ločeno deponiran, je treba opraviti preizkuse kakovosti na reprezentativnem homogeniziranem vzorcu.

Iz krovne plasti odstranjen asfaltni granulati je mogoče ponovno uporabiti na več načinov:

- v proizvodnji vročih bituminiziranih zmesi,
- v hladnih bituminiziranih zmesih,
- pri uporabi brez dodanih materialov.

Pri vseh postopkih velja, da je treba ugotoviti vpliv bituminizirane zmesi na okolje. Preveriti je treba snovi, ki lahko škodljivo vplivajo na okolje.

#### **4.2.3.2.1 Uporaba v bituminiziranih zmesih, proizvedenih po vročem postopku v mešalni opremi**

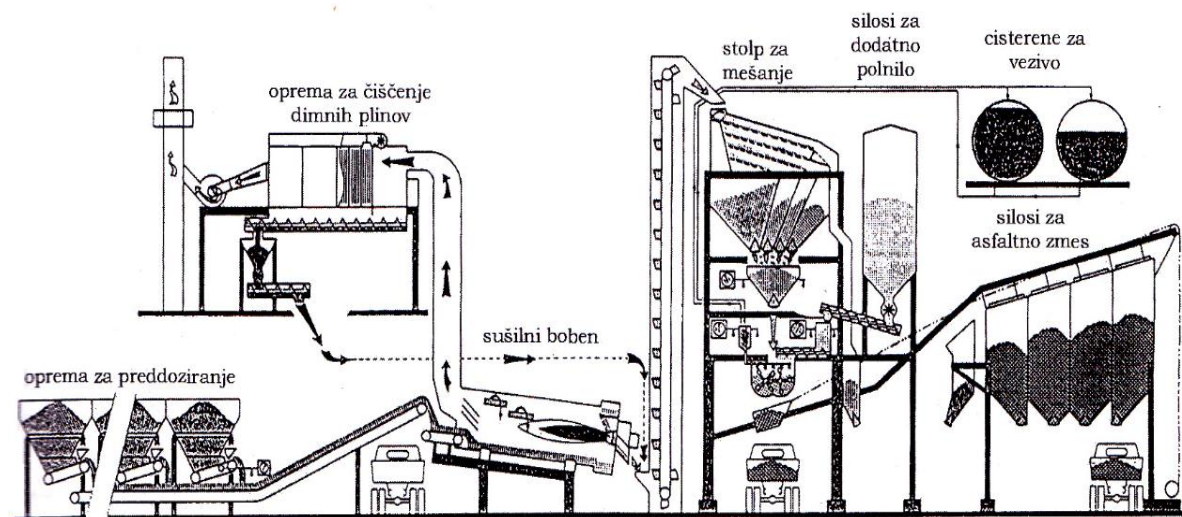
Asfaltni granulati iz obstoječih voziščnih vezanih slojev najbolje izkoristimo, če ga uporabimo pri proizvodnji vroče bituminizirane zmesi, da vezivo ohrani vlogo. Po rezkanju materiala sledi odvoz v asfaltno bazo, kjer se ga uporabi pri proizvodnji vročih bituminiziranih zmesi s pomočjo mešalne

naprave. Pridobljeni asfaltni granulati mora imeti enakomerno sestavo in čistost, dodajati in vmešati ga je treba v predhodno določenih deležih. Pri skladiščenju pa ga je treba ščititi pred klimatskimi vplivi. Pridobljena zmes mora ustrezati vsem tehničnim zahtevam, kot veljajo za asfaltne zmesi, ki ne vsebujejo tako dodanega asfaltne granulata.

Glede na način dodajanja asfaltne granulata v mešalno napravo za proizvodnjo vročih bituminiziranih zmesi ločimo:

- šaržni postopek in
- neprekinjeni oz. kontinuirani postopek.

Za zahtevnejše bituminizirane zmesi je obvezna proizvodnja s šaržnim postopkom (slika 10).



Slika 10: Centralni obrat za šaržno proizvodnjo bituminizirane zmesi  
z mešanjem po vročem postopku (Žmavc, 2007)

#### 4.2.3.2.2 Uporaba v hladnih bituminiziranih zmesih

Z razvojem mehanizacije in s številnimi izkuštvami se je ta postopek uspešno uveljavil. S hladno reciklažo na mestu vgrajena zmes, katere osnovni material je pridobljeni asfaltni granulati, služi kot stabilizirana nosilna plast ali pa jo uporabimo na manj pomembnih vozniških površinah. Asfaltnemu granulatu z mešanjem dodajamo materiale, kot so zmesi kamnitih zrn, bitumenske emulzije, penjeni bitumen, voda in cement. Količina in način dodajanja sta odvisna od namena uporabe. Metodo uporabimo takrat, ko popravilo krovne plasti ni več ekonomsko upravičeno in ko je problematična šibka nevezana nosilna plast. S strojem posegamo tudi v sloje pod asfaltnimi plastmi, zato metoda spada v skupino popravil strukturnih poškodb voziščne konstrukcije.

#### 4.2.3.2.3 Uporaba brez dodatnih materialov

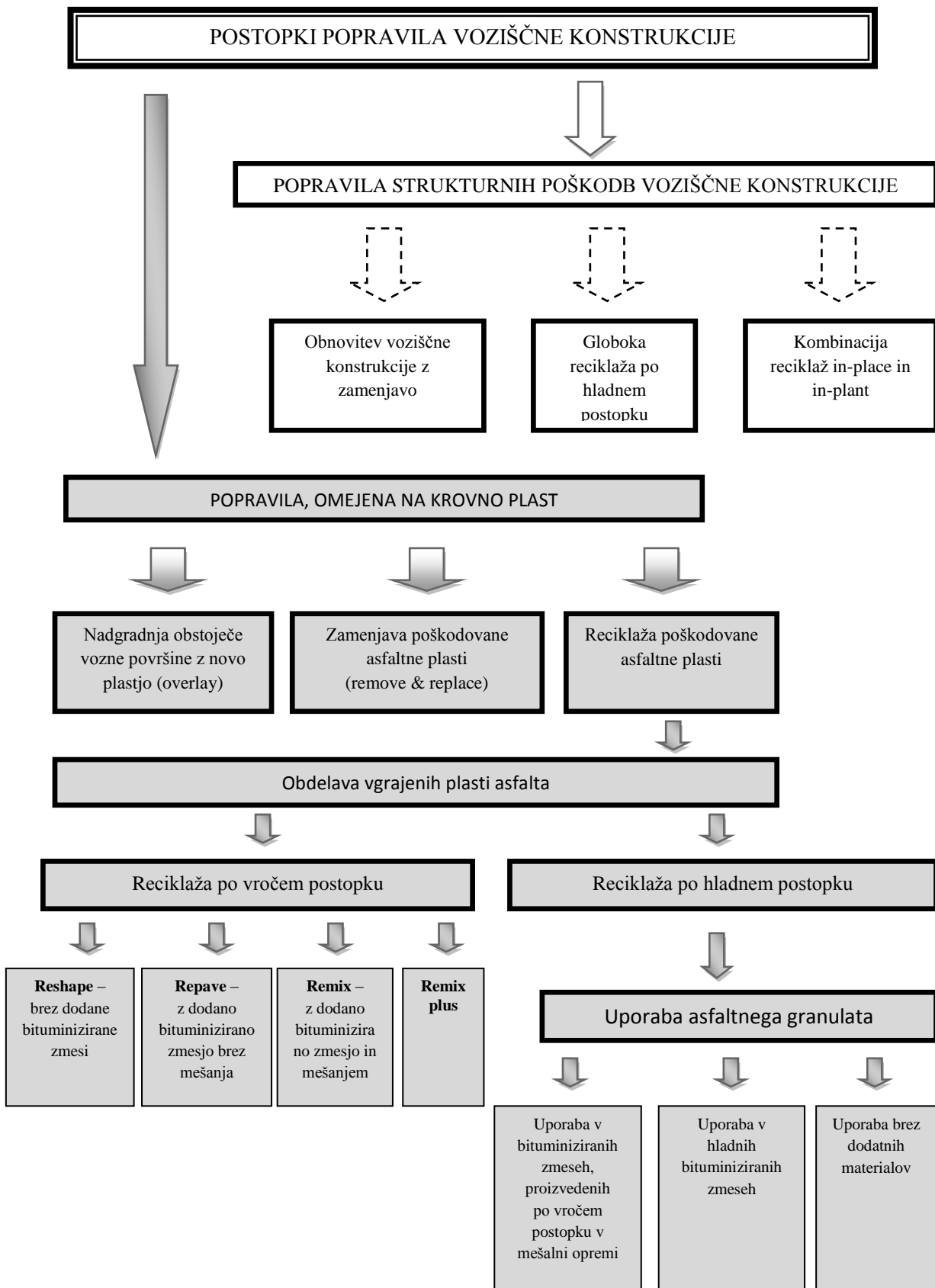
Asfaltni granulati se uporabljajo za manj pomembne namene, ko uporaba v sestavi nove bituminizirane zmesi ni mogoča. Lahko ga uporabimo za utrditev manj pomembnih vozniških površin in v nevezani nosilni plasti (slika 11). V primerjavi z zmesjo kamnitih zrn se asfaltni granulati razlikujejo po vgradljivosti in obstojnosti. Bitumen, ki ima funkcijo veziva, kljub staranju ohrani delež kohezije, kar otežuje zgostitev v hladnem stanju. Pod dinamično obtežbo prometa pa se lahko pojavi naknadna zgostitev. Ena izmed možnosti uporabe odstranjenega asfalta je tudi kot nasipni material. Da se izognemo škodljivim posledicam nasipa, je treba zrnavost materiala prilagoditi postopoma vgraditve in zgostitve.



Slika 11: Uporaba asfaltnega granulata na manj pomembnih vozniških površinah



Preglednica 2: Razdelitev popravil voziščne konstrukcije



### 4.3 Popravilo strukturnih poškodb voziščnih konstrukcij

Za ceste s strukturnimi deformacijami velja, da te zaradi prevelike razpokanosti, preoblikovanosti ali prekomerne podajnosti niso več varne in gospodarne. Globina prodiranja mraza pogosto sega do zmrzljivo neodpornih materialov v podlagi. Rezultat so nepopravljive poškodbe zaradi zmrzali, ki jih slabi hidrološki pogoji samo še povečujejo.

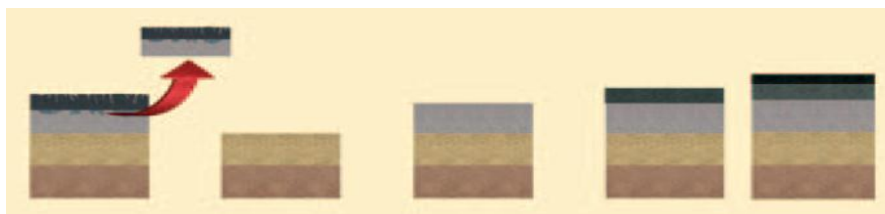
V primerjavi s prej opisanimi površinskimi poškodbami tu deformacije niso omejene samo na površino. S temi popravili ne bi dosegli dolgoročne učinkovitosti, saj bi se poškodbe hitro reflektirale skozi obnovljeno asfaltno plast.

Pri strukturnih poškodbah postopamo podobno kot pri dimenzioniranju novogradenj, zato je vselej treba preveriti stanje podlage in njene nosilne zmožnosti, prometno obremenitev, klimatske in hidrološke pogoje in višino nivelete. Postopke razdelimo v tri glavne skupine:

- obnovitev voziščne konstrukcije z zamenjavo,
- globoko recikliranje po hladnem postopku,
- kombinacija reciklaž in-place in in-plant.

#### 4.3.1 Obnovitev voziščne konstrukcije z zamenjavo

Poškodovane plasti voziščne konstrukcije se odstrani in nadomesti z novimi. Zamenjava voziščne konstrukcije praktično pomeni novogradnjo. Za ta postopek se odločimo, ko pride do hudih strukturnih poškodb, kadar zahteve za nosilnost podlage niso izpolnjene, pri visoki stopnji dotrajanosti in utrujenosti vgrajenih materialov, neprimerni varnost idr. Izmed vseh metod je postopek z zamenjavo najzamudnejši in najdražji. Potrebni je veliko odvozov, ustreznih odlagališč, strojne opreme in novih materialov. Vse večjo prednost bodo imeli inovativnejši postopki z recikliranjem, ker izkazujejo večjo skrb za okolje in so bolj ekonomični.



Slika 12: Obnovitev voziščne konstrukcije z zamenjavo (Wirtgen, 2010)

### 4.3.2 Globoka reciklaža po hladnem postopku

Hladna reciklaža s pomičnim reciklatorjem (in-place) je opisana v naslednjem poglavju, tu pa omenimo še možnost reciklaže z mešalno napravo (in-plant). Porezkan material se ne stabilizira na mestu odvzema, ampak se ga odpelje na odlagališče pri mešalni napravi (slika 13). Čeprav ima postopek in-place številne prednosti, postane in-plant v nekaterih primerih zanimiv in primernejši za uporabo. Omogočeno je bolj kontrolirano mešanje in doziranje različnih materialov, tako da dobimo bolj homogeno mešanico z manj spremenljivo kakovostjo kot s terenskim recikliranjem. Zgodi se, da je zaradi prevelike trdnosti vgrajenih materialov ustrezno drobljenje s reciklatorjem na mestu uporabe oteženo ali celo onemogočeno.

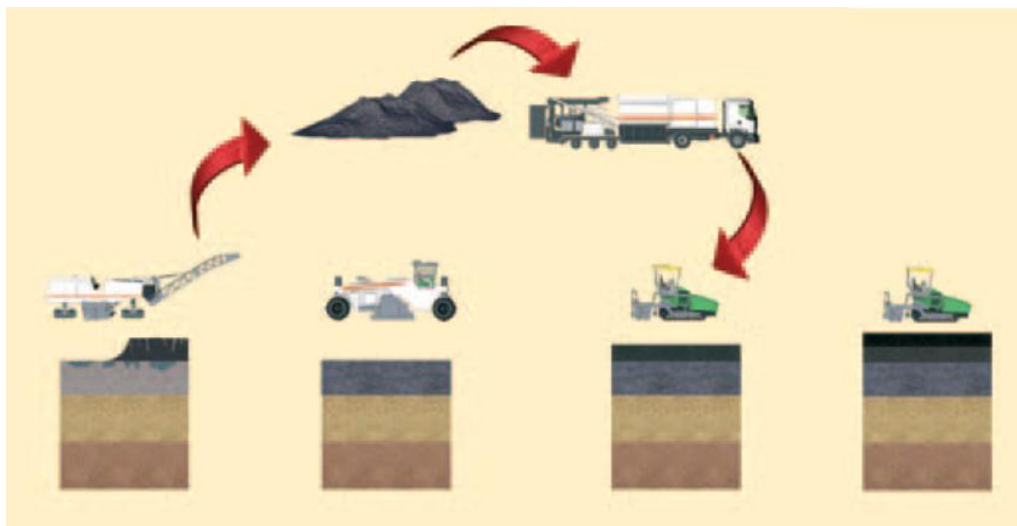


Slika 13: Izvajanje reciklaže v mešalni opremi (in-plant) (Wirtgen, 2010)

### 4.3.3 Kombinacija reciklaž in-place in in-plant

S kombinacijo reciklaže na mestu popravila in reciklaže v centralni mešalni napravi povečamo sanirano globino voziščne konstrukcije. V prvi fazi z rezkarjem porezkamo asfaltne plasti in material odpeljemo na deponijo, spodnje dotrajane nevezane sloje pa z metodo hladne reciklaže na mestu stabiliziramo z različnimi vezivi (slika 14).

Odstranjeni asfaltni granulati zgornjih slojev z in-plant metodo uporabimo za pripravo dodatne stabilizirane plasti, s katero lahko prilagajamo želeno višino nivelete. Po dovozu nazaj na gradbišče jo vgradimo na že reciklirano prvo plast. Na končani dvojni reciklirani plasti vgradimo nosilno in/ali obrabno asfaltno plast.



Slika 14: Kombinacija reciklaž in-place in in-plant (Wirtgen, 2010)

## 5 GLOBOKA RECIKLAŽA PO HLADNEM POSTOPKU

### 5.1 Uvod

Globoka reciklaža po hladnem postopku na mestu uporabe (in-place) je sodobna in zanesljiva metoda obnove dotrajanih cest, ki ima številne prednosti pred konvencionalnimi postopki obnove. Globino recikliranja izberemo tako, da s postopkom dosežemo sloje s strukturnimi napakami. Za izboljšanje lastnosti dodajamo različna stabilizacijska veziva. Tako recikliran in stabiliziran material je veliko bolj nosilen in zmrzlinško odporen.

### 5.2 Mehanizacija

To sodobno tehnologijo reciklaže že vrsto let izvaja tudi Skupina Primorje. Osnovni stroj predstavlja reciklator WR 2500 S podjetja Wirtgen Group (slika 15). Gre za sodoben in zmogljiv stroj, ki obstoječe materiale iz voziščne konstrukcije odrezka in homogeno premeša s stabilizacijskimi vezivi. Operacija je tipična enofazna, saj reciklažni stroj le enkrat zapelje čez izpostavljena temeljna tla. Ta ostanejo ves čas nedotaknjena. Delovna hitrost reciklatorja je od 5 do 15 m/min, kar pri širini 2,5 m in debelini recikliranja 25 cm predstavlja od 190 m<sup>3</sup> do 560 m<sup>3</sup> na uro.



Slika 15: Obnova cest s hladno reciklažo na licu mesta (vir: Primorje)

Srce reciklatorja je rezkalno-mešalni boben, ki celotno odrezkano bituminizirano zmes premeša skupaj z zmesjo zrn iz nevezane nosilne plasti s stabilizacijskim vezivom in dodatnim drobljencem. Frakcije finega (drobnega) peska (0–4 mm) oz. tamponskega drobljenca dodamo, v kolikor je potrebno zagotoviti ustrezno granulacijo reciklirane zmesi ali pa za povečanje debeline vezane nosilne plasti. Orodje za rezkanje je praviloma rezkalni valj z noži za izkop, ki se vrti navzgor (slika 16). V odvisnosti od pogojev reciklaže lahko opremo rezkanja prilagajamo. Teoretično je možna reciklažna globina 500 mm, vendar je zaradi zagotavljanja homogenosti plasti globina omejena na 300 mm. Večje globine so možne le pri stabiliziranju zemljin.



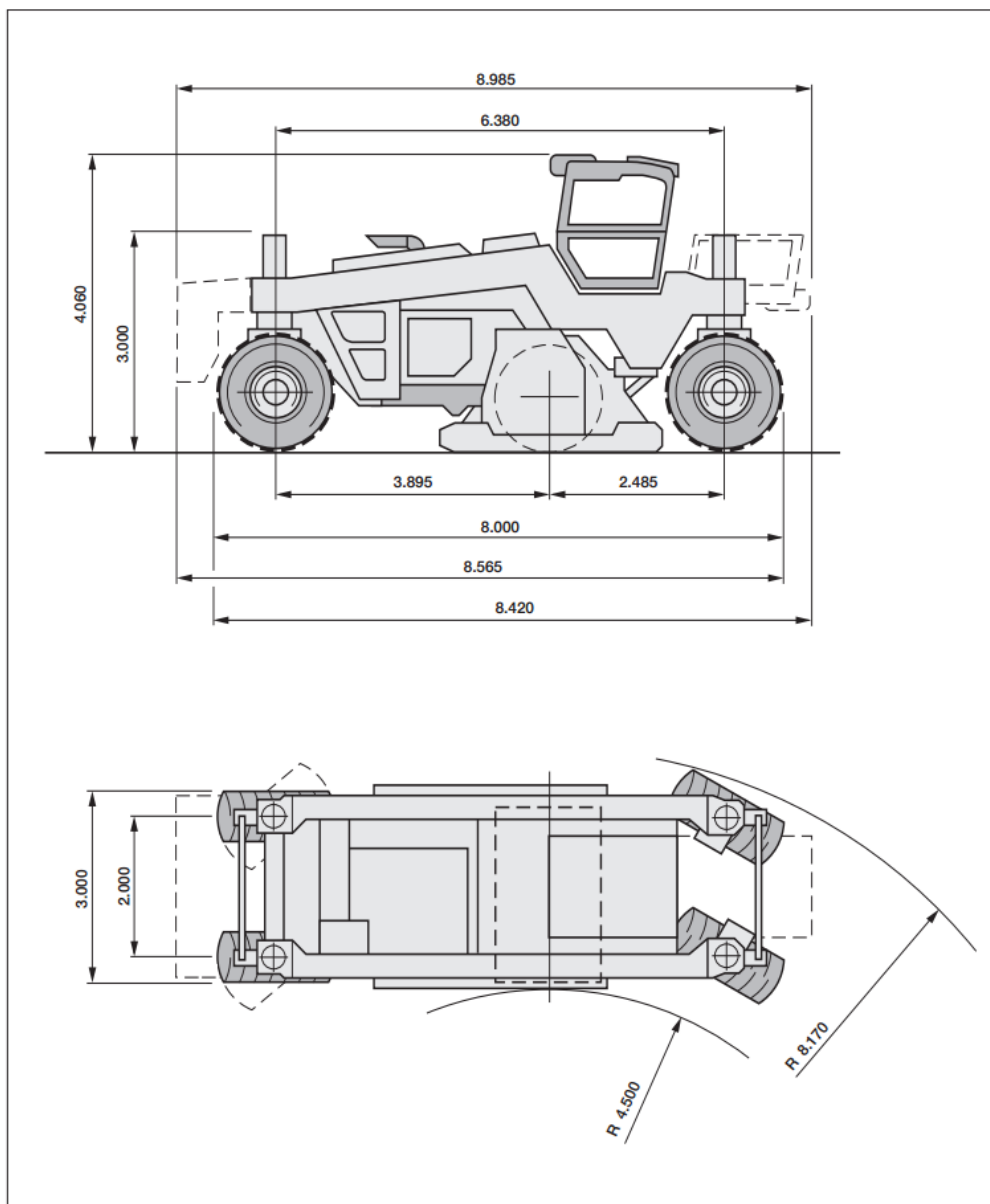
Slika 16: Rezkalni valj z noži za izkop (Wirtgen, 2010)

Rezkalno-mešalni boben je povezan s sistemi dovajanja. To so mikroprocesorsko nadzorovane črpalke, s kateri se regulirano dovajajo zahtevane količine vode in stabilizacijskega veziva (penjenega bitumna, bitumenske emulzije in cementa). Ti dodatki so vnaprej določeni s pripravljeno recepturo. Cement lahko dodajamo tudi s posipanjem na vozišče, preden čez zapelje reciklažni niz. V preglednici 3 so prikazane najpomembnejše tehnične lastnosti reciklatorja WR 2500 S.

Preglednica 3: Najpomembnejše tehnične lastnosti reciklatorja WR 2500 S

MOTOR		REZKALNO-MEŠALNI BOBEN	
IZDELOVALEC	MARCEDES BENZ	DELOVNA ŠIRINA ( mm )	2438
HLAJENJE	VODNO	DELOVNA GLOBINA ( mm )	0 - 500
ŠTEVILO VALJEV	12	RAZMIK NOŽEV ( mm )	30
NAZIVNA MOČ ( kW / KM )	500/670	ŠTEVILO NOŽEV ZA IZKOP	224
PORABA ( l / uro )	120	MASA	
TANK ZA GORIVO ( l )	1500	MASA MED DELOM ( t )	32
HITROST		DIMENZIJE STROJA	
MED RECIKLIRANJEM ( m/min )	5 - 15	dolžina / širina / višina ( mm )	8985 / 3000 / 4060

Na sliki 17 so vidne osnovne dimenzije reciklatorja WR 2500 S.



Slika 17: Dimenzije reciklatorja WR 2500 S (Wirtgen, 2010)

Pred pričetkom reciklaže je pomembna priprava vseh strojev. Reciklažni niz je odvisen od postopka reciklaže in od veziva, ki ga uporabimo pri reciklaži. Naenostavnejša sestava niza je ta, da reciklator pred seboj potiska samo cisterno vode. Skupaj sta povezana s potisnimi drogovi. Z reguliranim dovajanjem vode zagotovimo optimalno vlago za vgrajevanje. Ustrezna količina cementa je posuta pred niz in zmešana v mešalnem bobnu. Druga možnost je mešanje cementa in vode v posebnem mešalniku, ki se ga v reciklažnem nizu postavi pred reciklator. Mešalnik sam regulira doziranje sestavin, cementno mleko se v reciklator dovaja prek dovajalnih črpalk.

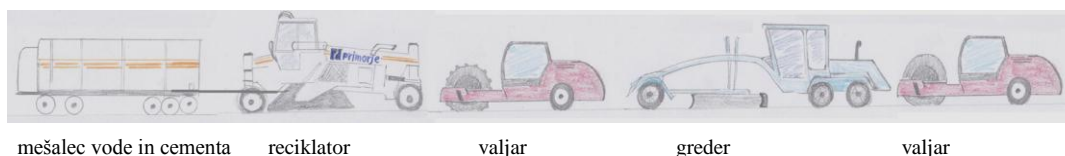
Reciklažni niz se ponovno spremeni, če je v postopek hladne reciklaže dodano še bitumensko stabilizacijsko vezivo, ne glede na to, ali je to penjeni bitumen ali pa bitumenska emulzija. Če je cement raztresen na cesto pred reciklažo, je reciklator povezan neposredno s cisterno z bitumnom. Cisterna z vodo je postavljena pred njima in je prva v vrsti. Ko je cement dodan skupaj z vodo, pa je mešalnik za cementno mleko tisti, ki je postavljen neposredno pred reciklator. V tem primeru je cisterna z bitumnom prva v nizu.

Takoj za reciklatorjem je potrebna zgostitev recikliranega materiala. Po prvem valjanju začnemo z grederjem planirati prečne in vzdolžne nagibe. Na koncu je potrebno še končno valjanje, da reciklirano plast zgostimo v celoti. Po vsem naštetem sledi polaganje asfaltne krovne plasti. Najpogostejše možnosti, ki se lahko pojavijo v reciklatorskem nizu, so predstavljene na sliki 18.

#### PRIMER 1



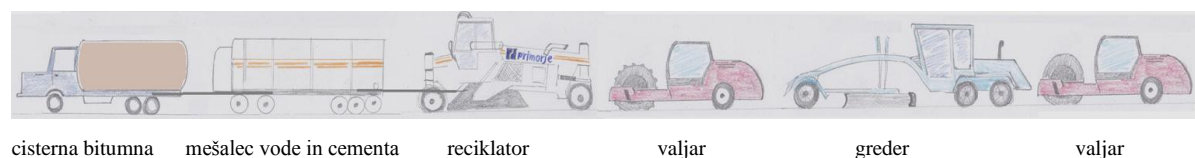
#### PRIMER 2



#### PRIMER 3



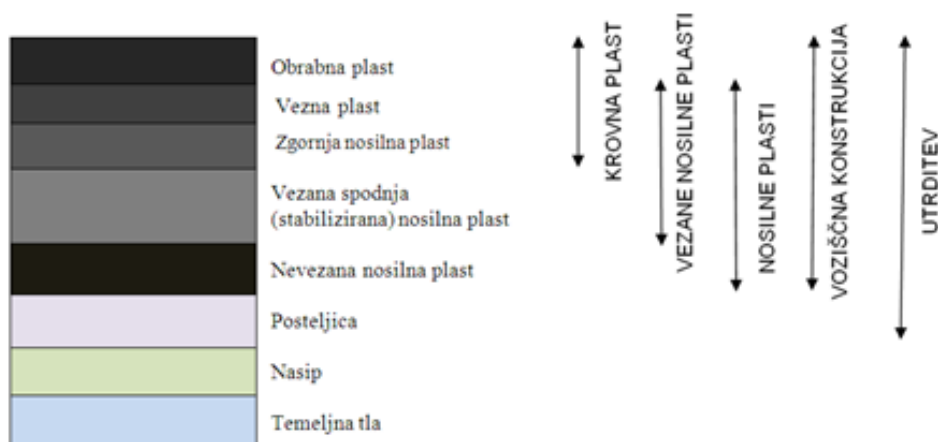
#### PRIMER 4



Slika 18: Najpogostejši reciklažni nizi strojev za hladno reciklažo

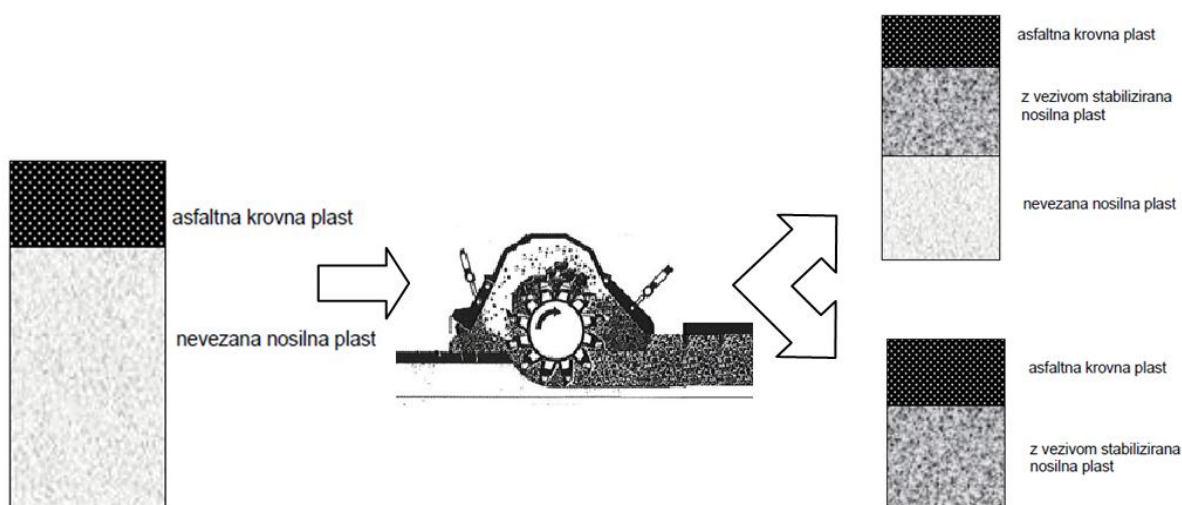


### 5.3 Sprememba plasti v voziščni konstrukciji zaradi globoke reciklaže



Slika 19: Pregled vseh plasti v prerezu voziščne konstrukcije

Na sliki 19 so predstavljene vse možne plasti, ki lahko sestavljajo voziščno konstrukcijo. Pri dimenzioniranju voziščnih konstrukcij moramo upoštevati lastnosti in kakovost vgrajenih materialov, nosilnost podlage, klimatske in hidrološke pogoje ter prometne obremenitve za dobo trajanja. Na podlagi teh znanj določimo kakovost in debelino posameznih plasti materialov, vgrajenih v voziščno konstrukcijo. Osnovna oblika asfaltne voziščne konstrukcije je največkrat uporabljena za ceste z majhno in srednjo prometno obremenitvijo. Sestavlja jo asfaltna krovna plast in spodnja nevezana nosilna plast. Pogosto je material v nosilni plasti neoporen proti zmrzovanju, ker je zaglinjen in neustrezne debeline, zaradi povečanja prometne obremenitve v času uporabe pa premalo nosilen. S postopkom globoke reciklaže po hladnem postopku se prerez voziščne konstrukcije spremeni, saj pridobimo stabilizirano nosilno plast, ki je lahko tudi edina nosilna plast, če globina reciklaže doseže temeljna tla (slika 20).

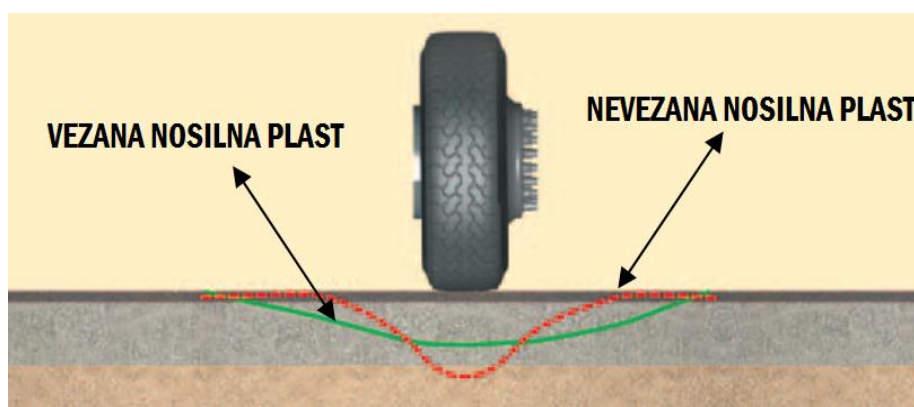


Slika 20: Sprememba plasti v voziščni konstrukciji zaradi globoke reciklaže (TSC 06.800)

#### 5.4 Pomen stabilizirane plasti

S postopkom stabilizacije želimo z vezivom izboljšati dotrajane materiale obstoječih voziščnih konstrukcij za ponovno uporabo. Izboljšajo se mehanske, fizikalne in kemične lastnosti materiala. S stabiliziranjem materiala je zmanjšana možnost spremembe granulacije, ki bi nastopila v plasti voziščne konstrukcije zaradi spremenjene strukture materiala kot posledica utrujenosti oziroma notranje porušitve. Granulacijske spremembe notranje porušenega materiala so namreč osnovni vzrok njegove zmanjšane obstojnosti oziroma odpornosti proti zunanjim vplivom. Namen izvedbe stabilizirane nosilne plasti je predvsem naslednji:

- da je dražja asfaltna nadgradnja zaradi tega lahko tanjša,
- da je v voziščnih konstrukcijah za lažje prometne obremenitve lahko vgrajena kot edina vezana nosilna plast,
- da zaradi sposobnosti prevzema upogibno-nateznih napetosti zagotovi povečan raznos prometnih obremenitev in delno premostitev lokalno slabše nosilnih mest (slika 21),
- da se s povezavo zrn in povečanjem stičnih površin zmanjša specifična obremenitev posameznih zrn v zmesi oziroma mešanici,
- da je omogočena uporaba rabljenih materialov, ki bi sicer zaradi prekomernega deleža drobnih zrn (zaglinjenosti) ali/in utrujenosti bili primerni za odstranitev,
- da zagotavlja kakovostno kontinuiteto voziščne konstrukcije, ki je predpogoj za pravilno izkoriščenost posameznih vgrajenih materialov.
- 



Slika 21: Raznos obremenitev v voziščni konstrukciji z vezano in nevezano nosilno plastjo (Wirtgen, 2010)

## 5.5 Veziva za stabilizacijo

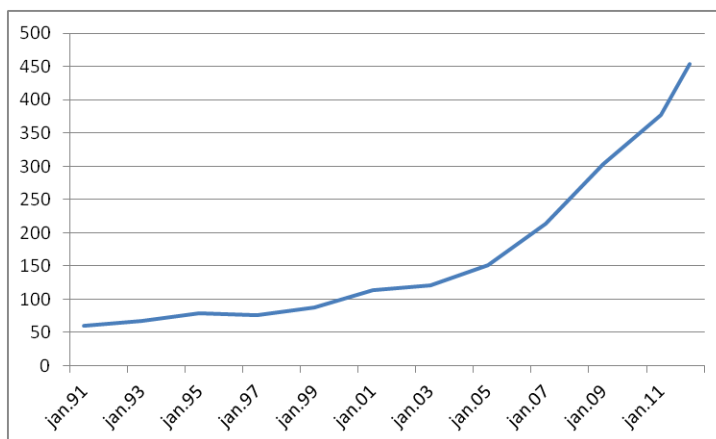
Prve stabilizacije z apnom so izvajali že Rimljani. Dandanes je takšnih veziv, s pomočjo katerih gradimo nove ali recikliramo stare ceste, ogromno. Z dodatkom ustreznega stabilizacijskega veziva izboljšamo pomanjkljivosti materiala, vgrajenega v obstoječe voziščne konstrukcije, in tako preprečimo njegovo zamenjavo. Cilj vseh veziv je s povezavo zrn in ustvaritvijo večjih stičnih površin povečati mehanske in fizikalne lastnosti materiala (trdnost, togost, odpornost na vremenske vplive in trajnost).

Optimalnega veziva, ki bi bilo najbolj primerno za vse materiale in vse razmere, ni. Tako je na primer apno bolj učinkovito od cementa pri stabilizaciji vezljivih zemljin. Tudi splošnega navodila za stabiliziranje materiala ni. Vsak material je treba posebej obdelati in iz vrste rezultatov izbrati postavljenim zahtevam vsestransko najprimernejšo rešitev. Dejavniki, ki vplivajo na izbiro veziva in postopka so:

- cena (slika 22),
- razpoložljivost veziva,
- karakteristike materiala,
- državna zakonodaja in predpisi,
- pogoji uporabe,
- razpoložljiva mehanizacija.

Današnja veziva, ki jih uporabljamo pri postopkih recikliranja, delimo na organska in anorganska. Največ stabilizacij, preizkusov in izkušenj imamo s cementom in z bitumnom. Razlogi so razpoložljivost teh veziv povsod po svetu in standardizirane metode zagotavljanja kakovosti. Cementna stabilizacija izboljša togost nosilne plasti, z bitumnom pa je plasti dodana kohezija, kar poveča odpornost na dinamične vplive prometa.

Predvsem v zadnjem času se veliko vloga v raziskovanje in razvijanje novih veziv ter postopkov stabilizacije. Med glavnimi razlogi sta v zadnjem času ekološka nepriljubljenost bitumenskega veziva in neustavljiva rast cene nafte. Cestogradbeni bitumen pridobivamo z destilacijskim procesom v rafinerijah iz določenih vrst surove nafte. Cena bitumna in ostalih naftnih derivatov je tako odvisna neposredno od cene črnega zlata. Zato so inovacije, ki bi nadomestile bitumen v postopku reciklaže, dobrodošle.



Slika 22: Rast cene bitumna v evrih na eno tono (Department of Transportation, 2011)

### 5.5.1 Anorganska veziva

Anorganska veziva so fino zmleti materiali, ki po mešanju z vodo kemično reagirajo. Nastala pasta postopoma prehaja v otrdelo stanje in vrsto kamna. Po strditvi ostane takšen kamen tudi pod vodo trden in stabilen. Rezultat stabilizacije z anorganskimi vezivi je toga plast, ki se ji zaradi povečanega notranjega trenja stabiliziranega materiala povečata trdnost in nosilnost.

Za stabiliziranje z anorganskimi vezivi imamo na voljo več različnih vrst anorganskih veziv:

- cement,
- apno,
- pucolane,
- žlindro visokih peči,
- elektrofiltrske pepele.

Osnova cementa je portland cementni klinker. Cementi lahko vsebujejo različne mineralne dodatke, ki so v procesu hidratacije aktivni (granulirane plavžne žlindre, naravni ali umetni pucolani) ali pa kemijsko popolnoma inertni (apnenec), vendar pa ugodno vplivajo na fizikalne lastnosti svežega cementna. Dodatki, kot so sadra ali sadrovec, regulirajo vezanje. Na sliki 23 je prikazan predhodni posip cementa s strojno opremo, ki jo uporablja podjetje Primorje.



Slika 23: Posipavanje cementa (vir: Primorje)

Pri izvedbi stabilizacije s kakovostnim cementom predstavlja problem enakomerno vmešavanje majhne količine veziva v reciklirani material. Enakomernejšo mešanico bi zagotovili z večjim deležem veziva, ampak to bi povzročilo tudi velike trdnosti in najverjetneje razpoke. V fazi vezanja oziroma krčenja stabilizirana plast sicer manjkrat počni, vendar pa so razpoke širše. Te skrajšujejo življenjsko dobo ceste. Rešitev so lahko veziva, ki z večjim deležem od cementa zagotovijo homogenost z majhno trdnostjo. To so sestavljena oz. kompleksna veziva, npr. zmesi cementa in elektrofiltrskega pepela. Kompleksna veziva pa zagotavljajo tudi počasnejše naraščanje trdnosti, kar omogoča delno sproščanje nastalih napetosti že v fazi strjevanja mešanic. Manjši premiki pa pomenijo tudi manjše razpoke.

Za določitev optimalne količine in vrste hidravličnega veziva se mora pred pričetkom del izdelati predhodna sestava stabilizacijske mešanice. Optimalno količino je treba za zahtevano enosno tlačno trdnost določiti na osnovi ugotovljenih odvisnosti enosnih tlačnih trdnosti stabilizacijskih mešanic od deleža vsebovanega hidravličnega veziva. Najmanjša priporočena količina dodanega hidravličnega veziva po TSC 06.320:2004 je  $50 \text{ kg/m}^3$  zmesi kamnitih zrn. Če je dokazano enakomerno vmešavanje veziva v zmes kamnitih zrn in zagotovljena pogojena minimalna enosna tlačna trdnost oziroma odpornost stabilizirane mešanice proti zmrzovanju, je dovoljena tudi manjša količina. Ista regulativa določa enosno tlačno trdnost, ki mora po 7 dneh praviloma znašati  $3,5 \text{ MN/m}^2$ , najmanjša posamična vrednost je  $2,5 \text{ MN/m}^2$ , priporočena največja vrednost pa ne več kot  $4,5 \text{ MN/m}^2$ .

Nekaterih potrebnih lastnosti cementa brez kemijskih dodatkov sploh ni mogoče zagotoviti. Kemijski dodatki cementom s fizikalnim in kemijskim delovanjem v veliki meri spremenijo lastnosti cementne paste, bodisi sveže ali v otrdelem stanju. Vse bolj uporabljeni so dodatki za cement, ki ga uporabimo pri hladni reciklaži za stabilizacijo. To so belkasti praški, sestavljeni iz različnih alkalnih in zemeljsko-alkalnih elementov, ki pospešujejo postopke cementne hidratacije. Dodajajo jih predvsem cementom tipa I in II. Po navedbah proizvajalcev se zaradi preoblikovanja v strukturi z dodatnimi novimi tvorbami mineralov med cementno hidratacijo povečajo fizikalno-mehanske lastnosti: tlačne trdnosti, moduli elastičnosti, upogibno-natezne trdnosti in odpornost na zmrzovanje. V eksperimentalnem delu so bile te izboljšave materiala preverjene.



Slika 24: Priprava mešanice s cementom in kemijskim dodatkom

### 5.5.2 Organska veziva

Najpogosteje je bitumensko vezivo uporabljeno kot bitumenska emulzija ali penjeni bitumen. Stabilizirane plasti z anorganskimi vezivi težav s krčenjem in pokanjem nimajo. Nastale zmesi so gibke in odporne proti utrujanju. Zaradi kohezije se poveča tudi odpornost na dinamične vplive prometa. Slabosti bitumna sta slab oprijem veziva na onesnažena zrna in občutljivost na vodo, ker z vodo ovit material izgublja trdnost.

### 5.5.2.1 Penjeni bitumen

Hladna reciklaža z dodajanjem hidravličnega veziva in penjenega bitumna na kraju obnove velja za sodobno in učinkovito obnovo dotrajanih ali poškodovanih cest. Postopek je idealen na cestah, kjer je treba izboljšati zmrzlinško odpornost, povečati nosilnost in obnoviti asfaltno podlago. Začetek tehnologije penjenega bitumna sega v leto 1956, ko so idejo za penjeni bitumen dobili z vbrizgavanjem pare v vroč bitumen. Kasneje so metodo izpopolnjevali pri podjetjih Mobil Oil in Wirtgen. Leta 1990 nastane metoda vbrizgavanja bitumna v ekspanzijski komori z dodajanjem vroče vode in segretega zraka. Sčasoma je penjeni bitumen postal zanesljivo vezivo za hladne mešanice z nesporno kakovostjo in z uporabo predvsem pri obnovi dotrajanih vozišč in izboljšanju gradbenih materialov za ceste (slika 25). Danes postopek hladne reciklaže s penjenim bitumnom tudi v Sloveniji dosega dobre rezultate in uspehe.

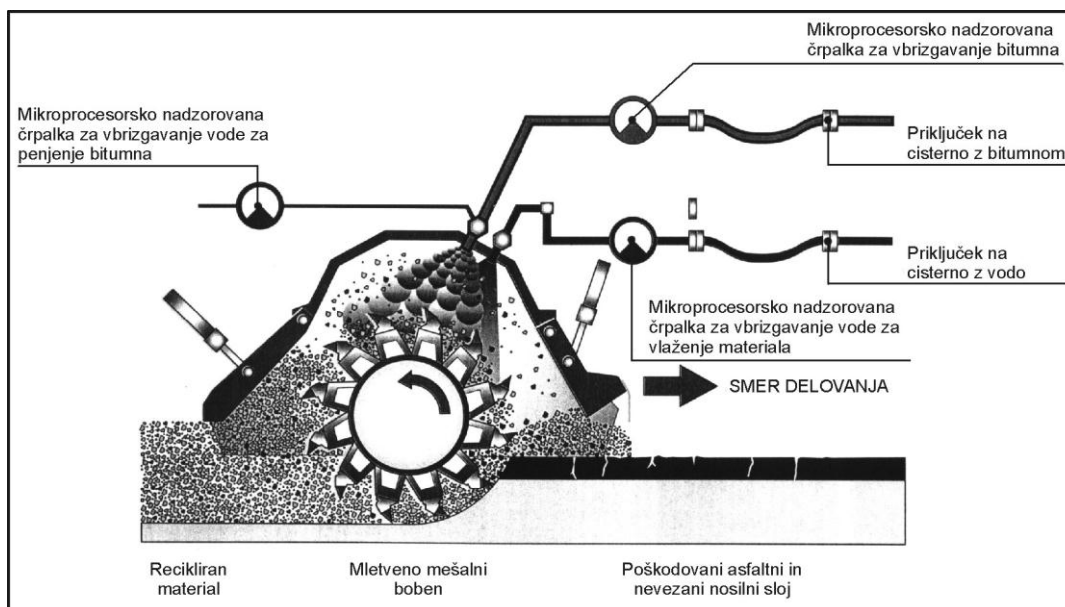
Penjeni bitumen je mešanica vročega bitumna, zraka in vode s tipičnim razmerjem 98 % bitumna in 2 % vode. V komorah oz. penilnih šobah, kjer je zrak stisnjen, vročemu bitumnu (160 do 200 °C) dodamo hladno vodo (okoli 20 °C). Nastala para se širi v bitumen in tvori mehurčke, ki jih zaznavamo kot peno. Pri postopku recikliranja se penjeni material vbrizgava v rezkalno-mešalni boben preko mikroprocesorsko nadzorovanih črpalk, ki omogočajo regulirano doziranje.

Mešanje s hladnim mletim materialom je z zmanjšanjem viskoznosti bitumna lažje. Pena iz bitumna pri mešanju obda predvsem fine delce s premerom pod 0,063 mm ter tako ustvari povezano mrežo delcev v bitumenski matriki. Pena se pri mešanju hitro sesede in večina vode izpari v obliki pare. Bitumen je enakomerno porazdeljen po materialu. Nastane elastičen in zelo nosilen stabiliziran gradbeni material za ceste. Na reciklirano plast položimo nosilno in/ali obrabno asfaltno plast.

Pri tehnološkem postopku recikliranja se poleg penjenega bitumna, ki je mu je treba posvetiti največ pozornosti, dodajajo še drugi materiali. Dodana zmes drobljenih kamnitih zrn omogoča ustrezno granulometrijsko sestavo reciklirane zmesi in popravljanje vzdolžnih in prečnih nagibov nivelete vozišča. Največkrat se dodaja drobljenec zrnivosti 0/32 mm in 0/2 mm. Hidravlično vezivo, dodano z nalogo stabilizatorja, zagotavlja primerne lastnosti nosilne plasti. Pogosto je za zagotovitev zadostne količine frakcije polnila, na katero se veže večina penjenega bitumna, treba dodajati cement, apno, kameno moko, žlindro ali elektrofiltrski pepel. Zaradi teh finih delcev se poveča posredna natezna trdnost recikliranega materiala.

Poleg finih frakcij ima v zmesi pomembno vlogo tudi pesek, ki poveča posredno natezno trdnost. Z zmanjšanjem praznin se povečuje kontaktna površina med zrnimi materiala. Mastiks, ki ga tvorita penjen bitumen in fina frakcija, je med zgoščevanjem stisnjen med zrna peska in tvori malto, ki povezuje

večja zrna v zmesi. To poveča sprijetost veziva in mineralnih zrn ter razpršenost veziva. Princip izboljševanja lastnosti zmesi s penjenim bitumnom z minimiziranjem količine votlin lahko s polnila in peska razširimo na celotno mešanico.



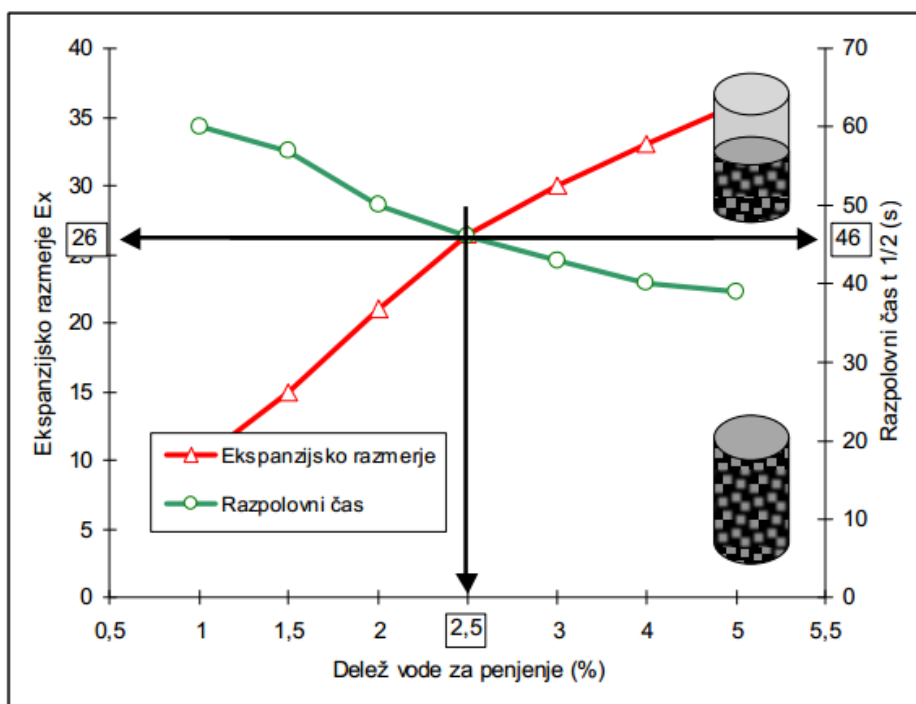
Slika 25: Proizvodnja hladne bituminizirane zmesi s penjenim bitumnom (TSC 06.800)

### 5.5.2.2 Izdelava recepture

Za izdelavo ustrezne recepture zmesi hladne reciklaže s penjenim bitumnom je bistveno poznavanje karakteristik penjenja in delež uporabljenega bitumna ter kakovost materiala. Vse iskane parametre pridobimo s predhodno (laboratorijsko) preiskavo.

Optimalne karakteristike penjenja so povezane s temperaturo bitumna, razpolovno dobo, ekspanzijskim razmerjem in deležem vode (slika 26). Ekspanzijsko razmerje, ki je merilo viskoznosti pene, določa, kako dobro se bo vezivo razporedilo v zmesi. Izračunano je kot razmerje med maksimalnim volumnom pene in začetnim volumnom bitumna. Razpolovna doba pa pove, kako stabilna je pena in nakazuje, koliko se bo pena med mešanjem sesedla. Parametra sta medsebojno odvisna in oba sta odvisna od vrste bitumna. S pomočjo naprave WLB 10 lahko iz grafa določimo optimalne karakteristike penjenja bitumna. Te se po navadi na grafu nahajajo tam, kjer je vrednost ekspanzijskega razmerja in razpolovne dobe večja od vrednosti 10.





Slika 26: Določitev karakteristik penjenega bitumna (Cotič, 2006)

Analizo in preiskavo materiala, ki je vgrajen v voziščno konstrukcijo, opravimo na vzorcih, odvzetih na trasi, kjer je reciklaža predvidena. Zanimajo nas granulacijska sestava, optimalna vlažnost (po modificiranem Proctorjevem postopku) in mehansko-fizikalne lastnosti. Pri granulacijski sestavi je treba zagotoviti 5 m.-% finih delcev pod 0,065 mm za potrebe vezanja s penjenim bitumnom, zato dodajamo tudi cement kot polnilo. Na osnovi dimenzioniranja in z upoštevanjem tehnoloških zahtev je v laboratoriju določena granulometrična delovna sestava. Na tako pripravljenem materialu se nadalje izvedejo preiskave maksimalne prostorninske mase in optimalne vlage ter določitev deleža bitumna.

Optimalni delež bitumna določimo s posredno natezno metodo. Pripravljen sestavo zmesi zrn zmešamo skupaj z zahtevano količino vode, cementa in penjenega bitumna ob pogojih optimalnega penjenja. Po navadi se naredi 5 vrst vzorcev z različnim deležem bitumna in se s posredno nateznim preizkusom ugotovi optimalni delež bitumna. Ta metoda se uporablja za testiranje vzorcev tako v suhih kot mokrih pogojih. Delež bitumna, pri katerem je mokra ITS največja, se smatra za optimalni delež.

## 5.6 Prednosti obnove dotrajanih voziščnih konstrukcij po postopku hladne reciklaže

**Varovanje okolja.** Predelava in uporaba sekundarnih materialov odpravi potrebo po odlagališčih. Količina novega materiala, pridobljenega z izkopi, je minimalna, zato se posegi v okolje zmanjšajo. Odpiranje kamnolomov ali peskokopov predstavlja velik poseg in breme za okolje in lokalno prebivalstvo.

**Promet.** S hladno reciklažo se izboljšata varnost in oviranje prometa. Celotni reciklažni niz lahko obratuje le na enem voznem pasu, zato javni promet poteka izmenično enosmerno. Krajši čas sanacije za uporabnike cest posredno pomeni veliko prednost, ker je omejitev prometa manjša. Minimalizirajo se tudi prevozi na deponijo in transport novih materialov na gradbišča. Uničevalni učinek prevozov na cestno omrežje se zmanjša.

**Homogenost plasti.** Ustvarjena debela in utrjena plast, homogena po globini, ne vsebuje šibkih vmesnih ploskev med tanjšimi plastmi voziščne konstrukcije kot na primer v konvencionalno izdelanih voziščnih konstrukcijah. Znano je, da 30 cm debela stabilizirana plast prenese več obtežbe kot pa dva 15 cm debela sloja, ki ležita eden na drugem.

**Čas izvedbe.** Reciklaža je enofazna operacija, saj reciklator le enkrat zapelje čez voziščno konstrukcijo, zato je čas sanacije krajši. Delovna hitrost reciklatorja je od 5 do 15m/min, kar pri širini 2,5 m in debelini recikliranja 20 cm predstavlja od 150 m<sup>3</sup> do 450 m<sup>3</sup> na uro.

**Predelava odpadnega materiala.** Material, ki sestavlja voziščne konstrukcije, je kljub dotrajanosti še vedno iz najkakovostnejših materialov (asfalt). Pri rekonstrukciji ceste z zamenjavo voziščne konstrukcije se ta material odstrani in zamenja z novim. S pravilno predelavo postane kakovosten del nove voziščne konstrukcije.

**Nosilnost in zmrzljinska odpornost.** Najpogostejši vzrok za slabo stanje ceste je vgrajeni material, ki ni zmrzljinsko odporen, ni nosilen ali je utrujen. S tehnološkim postopkom recikliranja material postane odpornejši na zmrzal in bolj nosilen. Stabilizacija s cementom zagotavlja izboljšanje togosti plasti, penjeni bitumen pa reciklirani zmesi doda kohezijo in s tem poveča odpornost na dinamične obremenitve. V primeru gradbenih materialov za ceste, stabiliziranih s cementom, lahko ob preobremenitvi voziščne konstrukcije in šibkih spodnjih nosilnih slojih pride do razpok, medtem ko material, stabiliziran s penjenim bitumnom, ostane elastičen in relativno dobro odporen na tvorjenje razpok.

**Temeljna tla.** Ker je hladna reciklaža enofazni postopek, gre oprema le enkrat čez izpostavljena temeljna tla. Ta ostanejo nedotaknjena in nepoškodovana. Pri uporabi običajne opreme pa so temeljna tla izpostavljena ponavljajoči se obremenitvi, kar lahko povzroči poškodbe in deformacije. Potrebna je zamenjava poškodovanega materiala.

**Ekonomičnost.** Če je vgrajeni material pravilno obdelan in vgrajen ter nadgrajen s tanko obrabno plastjo vroče bituminizirane zmesi, lahko z minimalno količino novega materiala in nizkimi stroški naredimo vozišče, ki bo zdržalo še zelo dolgo. Z recikliranjem lahko vplivamo na racionalno porabo energije, ki v veliki meri prispeva h končni ceni izvedenega projekta. Vse navedene prednosti, ki jih prinaša hladna reciklaža na kraju obnove, izkazujejo ekonomičnost postopka. Za enak učinek je to najcenejši postopek.

**Vpliv vremenskih razmer.** Izvajanje hladne reciklaže lahko poteka v manj ugodnih vremenskih razmerah. Po navadi se delo ne izvaja, če je temperatura zraka manj kot 2 °C ali če je material v vozliščni konstrukciji zmrznjen. Najbolj je odporen material, recikliran po hladni reciklaži z uporabo penjenega bitumna, ki lahko takoj po izvedbi prenese zelo močan dež.

## 6 EKSPERIMENTALNI DEL

### 6.1 Uvod

Reciklaža z uporabo penjenega bitumna predstavlja veliko pridobitev za obnovo dotrajanih vozišč. Rezultat celotnega postopka je nosilen in fleksibilen sloj, ki je odporen na deformacije. Gre za inovativni postopek, ki rešuje vprašanja glede varovanja okolja, oviranja udeležencev v prometu, zmanjšanja stroškov in potrebnega časa za izvedbo sanacije. Manjši negativen vpliv na okolje ima reciklaža tudi zaradi zmanjšanja gradbiščnega prometa. V Sloveniji je bila hladna reciklaža z uporabo hidravličnega veziva in penjenega bitumna prvič izvedena leta 2000. Zaradi nepoznavanja in neizkušenosti je ta postopek najprej predstavljal alternativni ukrep. Skozi leta in številne projekte pa se je dokazal za primernejšega, saj so zamenjave celotnih plasti voziščnih konstrukcij zahtevnejše, dražje in manj ugodne za promet.



Slika 27: Reciklator WIRTGEN WR 2500 S pri izvedbi hladne reciklaže z uporabo penjenega bitumna (Primorje, 2006)

### 6.2 Cilji

Kakovosti hladne reciklaže s penjenim bitumnom kot vezivom so bile podrobno predstavljene v prejšnjih poglavjih. Številni vzroki so prisilili v iskanje novih in racionalnejših rešitev. Med glavnimi razlogi je neustavljiva rast cene nafte, zato so novosti, ki bi nadomestile bitumen v postopku reciklaže, dobrodošle. V eksperimentalnem delu naloge je bilo iskano hidravlično vezivo za stabilizirano plast, ki bi imelo enake ali boljše lastnosti od konvencionalno izdelanih plasti. Potek reciklaže ostane nespremenjen, le da v reciklažnem nizu ni več cisterne z bitumnom in reciklator ne dozira bitumna v

mešalni boben. Kljub izločitvi penjenega bitumna mora biti stabilizirana plast odporna proti vplivom prometnih obremenitev ter proti škodljivim klimatskim in hidrološkim vplivom.

Cilj je bil poiskati novo tehnološko rešitev reciklaže cestnega omrežja dotrajanih regionalnih in glavnih cest z majhno prometno obremenitvijo. Cestno podjetje Nova Gorica (CPG), ki je član Skupine Primorje, vzdržuje 674 km državnih in 457 km lokalnih cest. V družbi ocenjujejo, da jih je kar približno 50 % nevarnih zaradi neustreznega drsnega trenja in/ali poškodovanosti površine. S pomočjo izdelave predhodne sestave stabilizacijske mešanice je bila omogočena določitev optimalne količine hidravličnega veziva ter klasifikacija po dveh trdnostnih sistemih in primerjava z zahtevami posameznih držav Evrope.

### 6.3 Metode dela

Metoda globokega recikliranja je zelo podobna oziroma enaka metodi stabilizacij materialov, ki jih vgrajujemo v vezane spodnje nosilne plasti. Namen obeh plasti v voziščni konstrukciji je zagotoviti povečan raznos obremenitev, omogočiti uporabo manj primernih materialov, izboljšati zmrzlinško odpornost in z ustvaritvijo večjih stičnih ploskev zmanjšati specifično obremenitev posameznih zrn v mešanici.

Prav zaradi podobnosti se je raziskava izvajala po zahtevah serije standardov SIST EN 14227. Izdelava preskušancev, izvedba preskusov in vrednotenje rezultatov so bili opravljeni skladno s to serijo standardov. Ta je razdeljena na 10 delov (preglednica 4), izmed katerih je za nas zanimivih prvih 5. Te specifikacije obravnavajo s hidravličnimi vezivi stabilizirane naravne in reciklirane zmesi kamnitih zrn, medtem ko se ostale navezujejo na izboljšavo zemljin.

#### Preglednica 4: Razdelitev standarda SIST EN 14227

SIST EN 14227-1, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije – 1. del: S cementom stabilizirane mešanice
SIST EN 14227-2, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije – 2. del: Žlindraste vezane zmesi
SIST EN 14227-3, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije – 3. del: Z elektrofiltrskim pepelom vezane zmesi
SIST EN 14227-4, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije – 4. del: Elektrofiltrski pepel za hidravlično vezane zmesi
SIST EN 14227-5, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije – 5. del: S hidravličnimi vezivi vezane zmesi
SIST EN 14227-10, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije - 10. del: Izboljšanje zemljin s cementom
SIST EN 14227-11, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije - 11. del: Izboljšanje zemljin z apnom
SIST EN 14227-12, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije - 12. del: Izboljšanje zemljin z granulirano plavžno žlindro
SIST EN 14227-13, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije - 13. del: Izboljšanje zemljin s hidravličnim vezivom za nosilne plasti
SIST EN 14227-14, Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije - 14. del: Izboljšanje zemljin z letečim pepelom

Naloga je bila osredotočena na laboratorijsko (predhodno) sestavo stabilizacijske mešanice. Uporabljena so bila hidravlična veziva, ki se pogosto uporabljajo v praksi stabilizacije pri nas in v tujini, ter taka, ki še niso bila nikoli preizkušena. Glavna iskana končna lastnost stabilizacijske mešanice je bila 7- in 28-dnevna odvisnost trdnosti od deleža hidravličnega veziva, za katero je iz literature znano, da v splošnem narašča linearno. Možna je bila tudi primerjava z različnimi zahtevami v sosednjih in drugih evropskih državah, kjer se kriteriji razlikujejo od naših.

Za vsako različno vezivo in različni delež je bila s po tremi preskušanci ugotovljena enosna tlačna trdnost in neposredna natezna trdnost po 7 in 28 dneh. Za izbrane preskušance, ki so glede na rezultate trdnostnih karakteristik izkazovali optimalni delež uporabljenega veziva, je bil določen še modul elastičnosti po 28 dneh. Rezultati mehanskih lastnosti so omogočili medsebojno primerjavo, določitev optimalne količine hidravličnega veziva in klasifikacijo, predstavljeno v standardu SIST EN 14227-1.

Vsi preizkusi so bili opravljeni z materiali iz obstoječe voziščne konstrukcije na lokalni cesti Idrija–Idrijska Bela. Za potrebe raziskav je bilo z rezkarjem odvzetega ca. 7 m<sup>3</sup> materiala in nato pripeljanega v laboratorij Vrtojba (asfaltna baza CPG, slika 28). Reciklirani material je bil iz obstoječe asfaltne plasti in nevezane nosilne plasti. Bitumen v asfaltne granulat je zaradi starosti in oksidiranja v novonastali stabilizirani mešanici izgubil funkcijo aktivnega veziva, zato je bil v nadaljnjem postopku asfaltni granulat upoštevan le v vlogi zmesi zrn. Velikost kamnitih zrn v zmesi, ki jih zmelje reciklator, je praviloma omejena na 32 mm. Na ta način je bila dobljena enaka zmes zrn, kot se uporablja pri hladni reciklaži s penjenim bitumnom.



Slika 28: Laboratorij Vrtojba ob asfaltni bazi CPG

#### 6.4 Obstoječe stanje vozišča na cesti Idrija–Idrijska Bela

Za eksperimentalni del naloge je bila izbrana lokalna cesta Idrija–Idrijska Bela. Gre za cesto z dotrajano voziščno konstrukcijo (neravno, razpokano in deformirano vozišče, premajhne debeline nevezanega materiala ne zagotavljajo odpornosti proti zmrzovanju, na posameznih mestih so se pojavljale udarne jame, dvig nivelete ni možen). Obstoječa voziščna konstrukcija je sestavljena iz povprečno 10 cm debele nosilne in obrabne asfaltne plasti in povprečno 15 cm (od 10 do 20 cm) debele plasti tamponskega drobljenca (zrnivosti 0/45 mm) z deležem delcev velikosti do 0,063 mm povprečno 7 m.-%. Temeljna tla na obravnavanem območju sestavljajo glineno peščeni materiali. Vrednosti nosilnosti CBR temeljnih tal pri ugodnih hidroloških pogojih znašajo od 5 do 7 %. Globina zmrzovanja je 70 cm.

Za trajno rešitev bi bila verjetno potrebna prometno neugodna in zamudna zamenjava voziščne konstrukcije. Zaradi visokih stroškov izvedbe zamenjave in majhnih prometnih obremenitev predstavlja ugodnejšo rešitev postopek hladne reciklaže.



Slika 29: Hranjenje zmesi zrn pri laboratoriju za asfalte Vrtojba



Slika 30: Reciklirana zmes zrn pred mešanjem z vezivi

#### 6.5 Vrsta in sestava zmesi zrn

Na cesti Idrija–Idrijska Bela je bila voziščna konstrukcija strojno zdrobljena do globine 20 cm. Tako je bilo v zmesi zrn poleg 10 cm asfaltne plasti vključenih še 10 cm plasti zaglinjenega drobljenca. Dodatnih frakcij kamnitih zrn ni bilo. Pri hladni reciklaži s penjenim bitumnom se pogosto dodaja

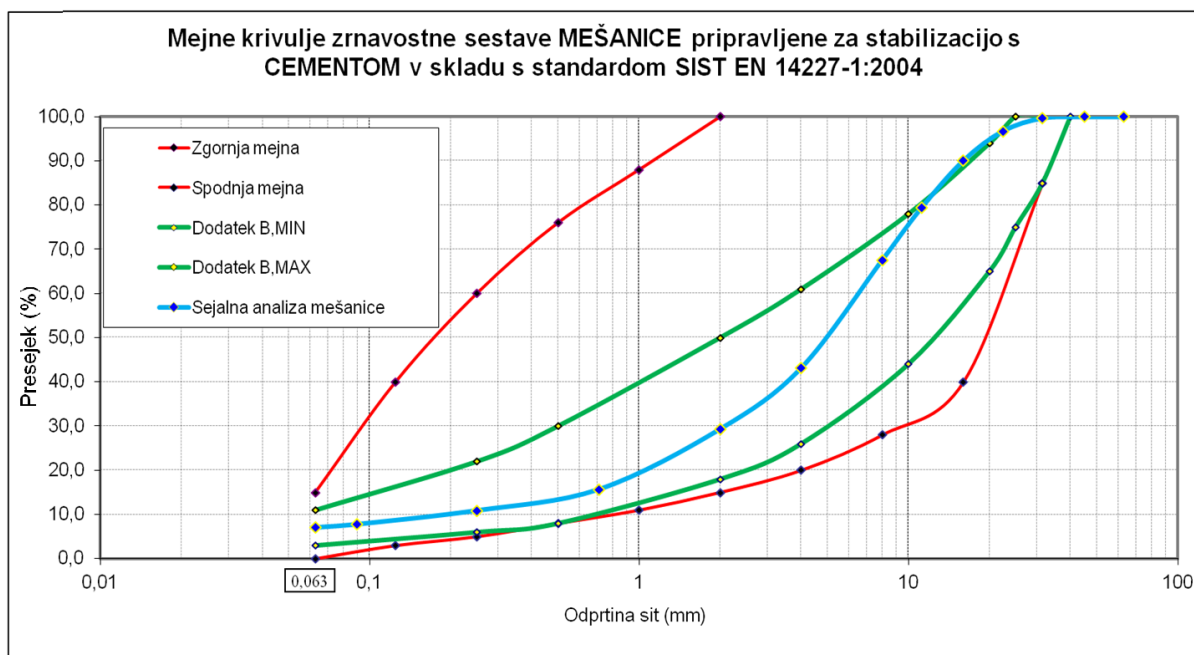
pesek zrnivosti 0/2 mm za izboljšanje granulometrijske sestave ter za izravnavanje obstoječih neravnin vozišča. Frakcija peska zmanjšuje količino votlin v zmesi, povečujejo pa se stiki med zrni materiala. Posredna natezna trdost materiala se zato občutno poveča.

Zrnavostne karakteristike zmesi zrn nam določijo njeno uporabnost. Sestava zmesi za nosilne plasti, stabilizirana s hidravličnimi vezivi, mora biti čim bolj enakomerna. Grafični prikaz presejne krivulje ne sme presegati mejnih krivulj, sicer stabilizacijska mešanica ne ustreza zahtevam (slika 31).

Zrnavostna sestava se je spremljala v celotnem obdobju eksperimentalne naloge. Vsakič, ko je bila iz kupa odvzeta zmes zrn za izdelavo preskušancev, je bila izvedena še sejalna analiza. Tako je bila kontrolirana enakomernost sestave zmesi zrn ter možnost segregiranja zmesi zrn pri dovozu s tovornjakom na odlagališče v laboratoriju Vrtojba (slika 29). Rezultirajočo presejno krivuljo (preglednica 5) se je primerjalo z različnimi zahtevami.

Preglednica 5: Določitev sestave zmesi zrn

SITO ( mm )	0,063	0,09	0,25	0,71	2,0	4,0	8,0	11,2	16	22,4	31,5	45	63
PRESEJNA KRIVULJA	7,0	7,8	10,9	15,7	29,3	43,2	67,6	79,2	90,1	96,8	99,7	100,0	100,0



Slika 31: Mejne krivulje v skladu s standardom SIST EN 14227-1:2005



V preglednici 6 so po standardu SIST EN 14227-1:2005 podane mejne krivulje zrnavostne sestave s cementom stabilizirane mešanice (rdeči zunanji črti). Strožji kriterij prepušča standard nacionalnim regulativam posameznih držav. V informativnem dodatku B omenjenega standarda so podane mejne krivulje zrnavostne sestave agregata, ki so se že izkazale za ustrezne na nekaterih lokacijah.

Preglednica 6: Mejne vrednosti presejkov zmesi zrn 0/31,5 (aneks B, SIST EN 14227-1:2005)

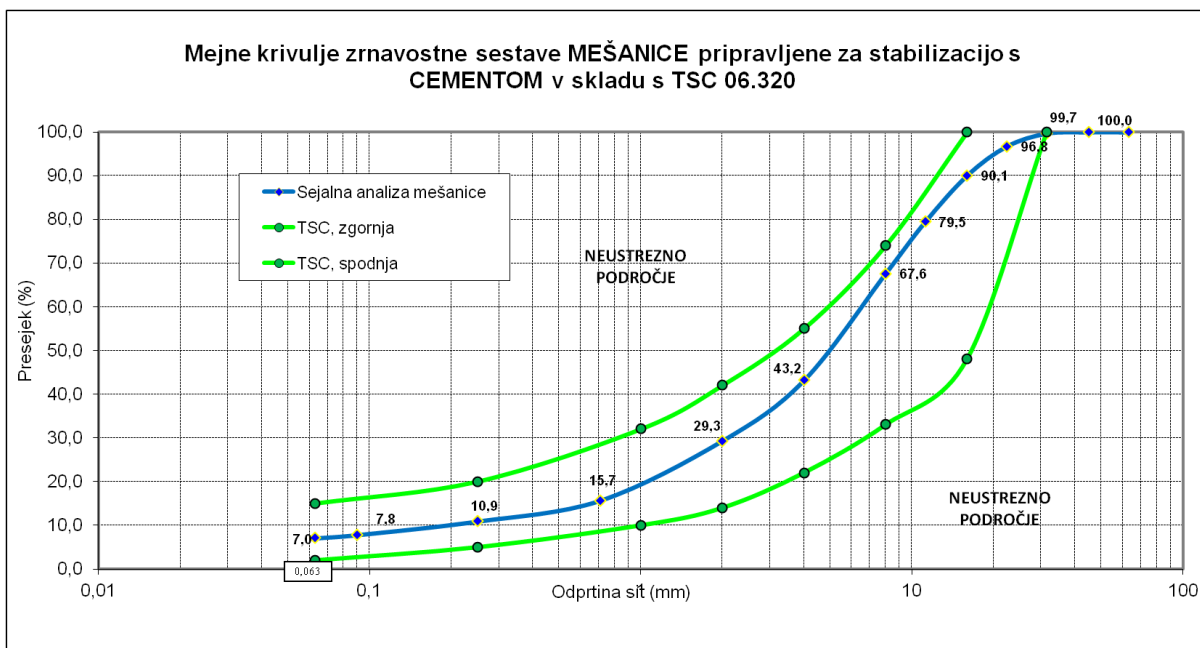
Sito mm	Mejne vrednosti presejkov	
	min	max
40	100	
31,5	85	100
25	75	100
20	65	94
10	44	78
4	26	61
2	18	50
0,5	8	30
0,25	6	22
0,063	3	11

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.320 določa tehnične pogoje in način gradnje vezanih spodnjih nosilnih plasti voziščnih konstrukcij s hidravličnimi vezivi. Sestava zmesi zrn je določena z mejnimi vrednostmi presejkov (preglednica 7). Če zmes kamnitega materiala vsebuje več kot 15 % zrn, manjših od 0,063 mm, je potrebna kontrola odpornosti proti zmrzovanju in tajanju. Če se odpornost s preskusom dokaže, so dopustne tudi mejne vrednosti presejkov v zadnjem stolpcu.

Presejna krivulja te raziskave zmesi kamnitih zrn je ustrezala zahtevam TSC-ja, saj leži v območju mejnih krivulj (slika 32).

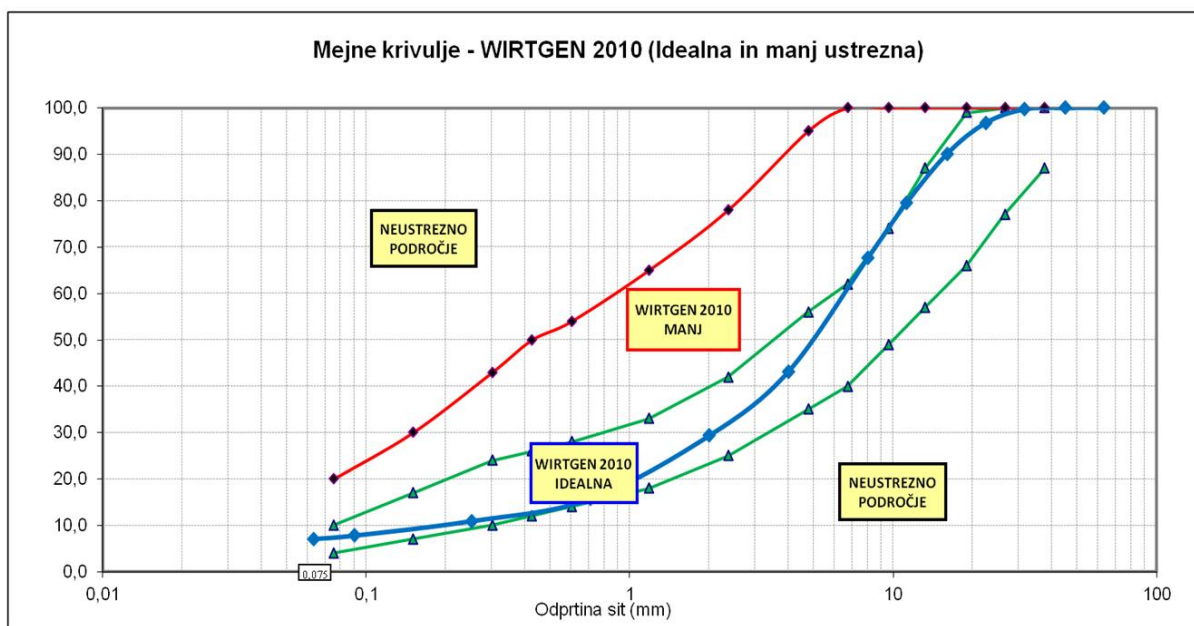
Preglednica 7: Mejne vrednosti presejkov zmesi zrn po TSC 06.320

Sito mm	Mejne vrednosti presejkov		
	od	do (m.-%)	izjemoma do *
0,063	2	15	35
0,25	5	20	42
1,0	10	32	54
2,0	14	42	65
4,0	22	55	78
8,0	33	74	100
16,0	48	100	100
31,5	100	100	100
63,0	100	-	-



Slika 32: Mejne krivulje v skladu s tehnično specifikacijo za ceste TSC 06.320

Primerjava sestave zmesi zrn z mejnimi zrnastostmi, ki jih priporoča Wirtgen v svojem priročniku za hladno reciklažo s penjenim bitumnom, je pokazala, da so izpolnjene tudi te zahteve (slika 33). Z dodajanjem posameznih frakcij kamnitega agregata lahko popravljamo presejno krivuljo in tako izboljšamo uporabnost zmesi zrn.



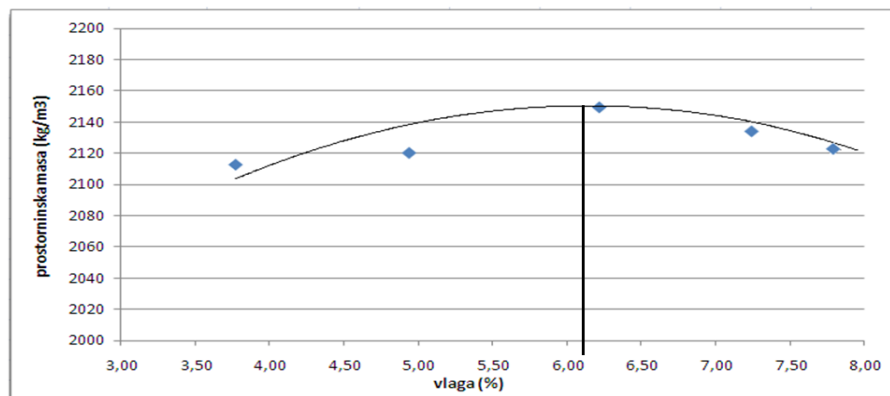
Slika 33: Mejne krivulje za hladno reciklažo s penjenim bitumnom (Wirtgen, 2010)

## 6.6 Optimalna vlažnost in največja prostorska masa

Prostorninska gostota in optimalna vlažnost materiala je bila določena po modificiranem Proctorjevem postopku, opredeljenem v SIST EN 13286-2. Za določitev modificirane prostorninske gostote zmesi kamnitih zrn je potrebno zgoščevalno delo  $A \approx 2,65 \text{ MN/m}^3$ .

Za recikliran material je bilo izdelanih pet vzorcev z različnimi deleži vode. Vzorci so bili z nabijalom zgoščeni po predpisanem postopku v kalupu določenih dimenzij. Rezultat preiskave je graf funkcijske odvisnosti suhe prostorninske gostote od različnega deleža vode (slika 34). Optimalni delež vode v recikliranem materialu je 6,1 % in največja prostorninska gostota suhega materiala je  $2150 \text{ kg/m}^3$ .

V eksperimentalnem delu naloge so bila uporabljena različna veziva ter različni deleži veziv. Mešanice zmesi kamnitih zrn, hidravličnega veziva in vode so morale biti z ustreznim postopkom mešanja homogenizirane. Za doseganje optimalne vlažnosti je bila pri izdelavi mešanic uporabljena terenska kontrola »kepe« (slika 35). Pri tem se je držalo mej med  $-2 \%$  in  $+1 \%$  optimalne vlage.



Slika 34: Soodvisnost prostorninske gostote suhega materiala in deleža vode v recikliranem materialu



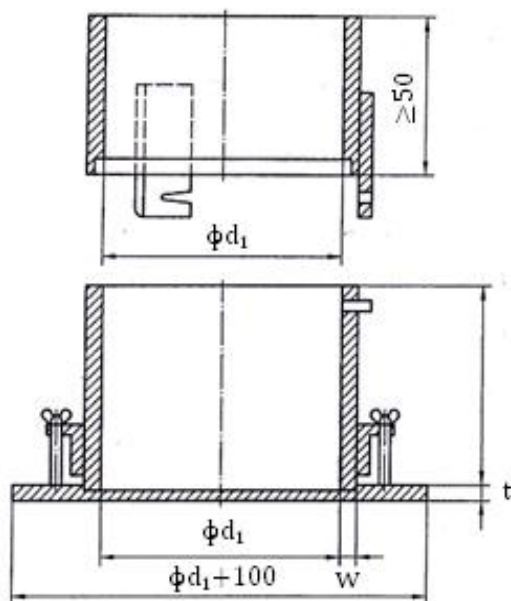
Slika 35: Kontrola vlage s kepo mešanice

## 6.7 Izdelava preskušancev

Standard SIST EN 14227 za izdelavo preskušancev dovoljuje več metod:

- po Proctorjevem postopku skladno s SIST EN 13286-50,
- z vibracijskem kladivom po SIST EN 13286-51,
- z vibracijskim zgoščevalnikom po SIST EN 13286-52,
- z uporabo osnega zgoščevanja po SIST EN 13286-53.

Glede na razpoložljivo opremo v laboratoriju Vrtojba in izkušnje iz prejšnjih preiskav je bil izbran Proctorjev postopek, ki je opisan v standardu SIST EN 13286-50. Valjasti testni preskušanci morajo biti pripravljene z uporabo Proctorjevih kalupov, ki so v skladu s SIST EN 13286-2 (slika 36). Ustrezno homogenizirano sestavo mešanic zgostimo po določenih pogojih zgoščevanja s Proctorjevim nabijalom do vnaprej določene gostote. Postopek je enak postopku za določitev modificirane prostorninske gostote po Proctorju (slika 37).



Slika 36: Shema dimenzij Proctorjevega kalupa  
(SIST EN 13286-2:2005)

Slika 37: Izdelava preskušancev po Proctorju

V standardu SIST EN 13286-2:2005 je opisanih šest postopkov zgoščevanja, ki se med seboj razlikujejo po maksimalni velikosti kamnitih zrn v zmesi, dimenzijah kalupov in tipu testiranja.

Navadni (standardni) Proctorjev postopek uporablja nabijalo z maso 2,5 kg. Pri modificiranem Proctorjevem postopku je zgoščevalno delo večje, ker se uporabljajo težja nabijala (4,5 kg ali 15 kg) in/ali večja višina nabijanja na tanjše plasti. Standardni Proctorjev postopek (SPP) je primeren predvsem za vezljive zemljine, medtem ko modificiran Proctorjev postopek (MPP) uporabljamo izključno za zmesi kamnitih zrn.

V tabeli iz standarda SIST EN 13286-2:2005 so prikazane dimenzije treh kalupov (preglednica 8). Standard dovoljuje uporabo kalupov drugačnih dimenzij pod pogojem, da je vloženo zgoščevalno delo enako. Pri izbiri tipa kalupa si pomagamo s formulo:

$$d_1 \geq 4 \times D \quad (1)$$

kjer pomeni:

$d_1$  – premer kalupa (mm)

$D$  – premer največjega zrna v zmesi (mm)

Glede na velikost zrn recikliranega materiala je bil izbran Proctorjev kalup tipa B.

Preglednica 8: Dimenzije Proctorjevih kalupov (SIST EN 13286-2:2005)

TIP KALUPA	PREMER $d_1$ (mm)	VIŠINA $h_1$ (mm)	DEBELINA KALUPA $w$ (mm)	DEBELINA PODLOŽNE PLOŠČE $t$ (mm)
A	100,0±1,0	120,0±1,0	7,5±0,5	11,0±0,5
B	150,0±1,0	120,0±1,0	9,0±0,5	14,0±0,5
C	250,0±1,0	200,0±1,0	14,0±0,5	20,0±0,5

Po izbranem tipu kalupa je sledila še določitev postopka zgoščevanja. Osnovne podatke za izvedbo razberemo iz preglednice 9 (SIST EN 13286-2). Preskušanci morajo imeti obliko valja z višino  $h = 120$  mm in premerom  $d = 150$  mm. Pripravljene morajo biti z optimalno količino vode in zgoščeni v petih plasteh s po 56 udarci bata z maso 4,5 kg, ki pada z višine 45,7 cm na vsako posamezno plast. Njihova zgoščenost pa mora biti povprečno 100 % in najmanj 97 %.

Preglednica 9: Osnovni podatki postopkov zgoščevanja (SIST EN 13286-2:2005)

TIP TESTA	KARAKTERISTIKE TESTA	SIMBOL	DIMENZIJA	TIP KALUPA		
				A	B	C
SPP	MASA NABIJALA	$m_R$	kg	2,5	2,5	15,0
	PREMER NABIJALA	$d_2$	mm	50	50	125,0
	VIŠINA NABIJANJA	$h_2$	mm	305	305	600
	ŠTEVILO PLASTI	-	-	3	3	3
	ŠTEVILO UDARCEV NA PLAST	-	-	25	56	22
MPP	MASA NABIJALA	$m_R$	kg	4,5	4,5	15,0
	PREMER NABIJALA	$d_2$	mm	50	50	125,0
	VIŠINA NABIJANJA	$h_2$	mm	457	457	600
	ŠTEVILO PLASTI	-	-	5	5	3
	ŠTEVILO UDARCEV NA PLAST	-	-	25	56	98

## 6.8 Hranjenje preskušancev

Pripravljene valjaste preskušance je treba ves čas do preizkusov trdnosti in elastičnega modula hraniti na ustrezni temperaturi in vlagi. Evropski standard EN 14227:2004 predlaga več režimov staranja, ki so prikazani v preglednici 10. Tudi nacionalne regulative različnih evropskih držav imajo določene zahteve glede hranjenja preskušancev, ki pa se med seboj razlikujejo.

Preglednica 10: Primeri različnih režimov staranja preskušancev, ki jih predlaga standard SIST EN 14227-1:2005

REŽIM STARANJA	ČAS STARANJA (DNEVI)				
	STARANJE V KALUPU PRI (20±5)°C	STARANJE V KALUPU PRI 90 %–100 % VLAGI IN (20±2)°C	STARANJE V KALUPU IN PLASTIČNI VREČI PRI (20±2)°C	STARANJE PRI 90 %–100 % VLAGI IN (20±2)°C	STARANJE V VODI PRI (20±2)°C
A	1			27	
B	1				27
C	1			24	3
D		28			
E			28		

Po končanem nabijanju so se preskušanci skupaj s kalupom en dan starali v vlažni komori z 100 % vlago in temperaturo  $20 \pm 2$  °C (slika 38). Po enem dnevu so bili preskušanci razkalupljeni ter do preskusov trdnosti in elastičnega modula po 7 in 28 dneh spet hranjeni v komori pri enakih pogojih. Pred vsakim preskusom so bili vsi preskušanci stehtani in kontrolirani, da izguba vlage med režimom staranja ni bila večja od 2 % (slika 39).



Slika 38: Hranjenje preskušancev v komori



Slika 39: Razkalupljanje po enem dnevu

## 6.9 Klasifikacija stabiliziranih mešanic

Serijski standard SIST EN 14227 omogoča klasifikacijo s hidravličnimi vezivi stabilizirane mešanice v trdnostne razrede po dveh sistemih:

- glede na tlačno trdnost  $R_C$  (sistem 1),
- glede na kombinacijo natezne trdnosti  $R_t$  in modula elastičnosti  $E$  (sistem 2).

Oba sistema sta med sabo neodvisna, zato kakršna koli zveza med sistemoma ni možna. Za stabilizirane mešanice z žlindro kot vezivom, ki jih obravnava drugi del serije standardov, je mogoča še klasifikacija s CBR-om. Te klasifikacije v tej eksperimentalni nalogi niso bile uporabljene.

### 6.9.1 Sistem 1

Za ugotavljanje tlačne trdnosti s hidravličnimi vezivi vezanih mešanic sledimo zahtevam standarda SIST EN 13286-41. Preskušanci so lahko kocke ali valji. Enoosna tlačna obremenitev mora biti izvajana s kontinuirano obremenitvijo do porušitve preskušanca. Ta mora nastopiti v 30 do 60 sekundah po začetku obremenjevanja. Preskusi morajo biti opravljeni čim prej po odvzemu preskušancev iz komore, da ne pride do izgub vlage. Pred testom vedno preskušance še stehamo in kontroliramo, da je izguba mase vedno pod 2 %. Tlačno trdnost izračunamo po enačbi:

$$R_C = F/A_C \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

kjer pomeni:

F – odčitana porušitvena sila ( N )

A<sub>C</sub> – površina preskušanca ( mm<sup>2</sup> )

Tlačno trdnost hidravlično stabilizirane mešanice vedno določa povprečje treh preskušancev. V kolikor ena vrednost odstopa od povprečja za 20 %, se ta izloči. Tlačna trdnost je povprečje ostalih dveh. Trdnostni razred določimo iz preglednice 11.

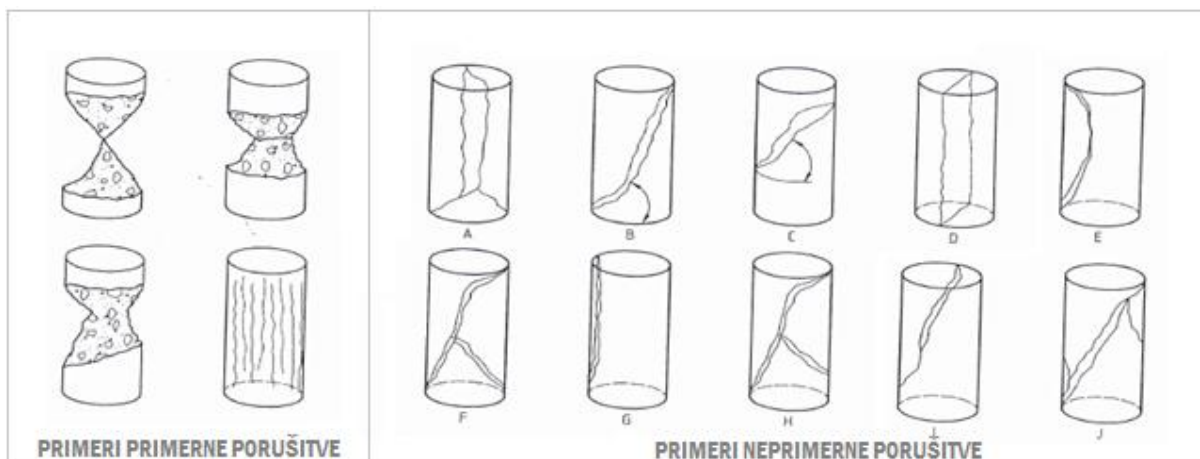
Preglednica 11: Klasifikacija s hidravličnimi vezivi stabilizirane mešanice glede na tlačno trdnost (SIST EN 14227-1:2005)

	TLAČNA TRDNOST MPa		TRDNOSTNI RAZRED
	valj H/D <sup>a</sup> = 2,0	valj ali kocka H/D <sup>a</sup> = 1,0 <sup>b</sup>	
1	-	-	C <sub>0</sub>
2	1,5	2,0	C <sub>1,5/2,0</sub>
3	3,0	4,0	C <sub>3/4</sub>
4	5,0	6,0	C <sub>5/6</sub>
5	8,0	10,0	C <sub>8/10</sub>
6	12	15	C <sub>12/15</sub>
7	16	20	C <sub>16/20</sub>
8	20	25	C <sub>20/25</sub>

<sup>a</sup> H/D = razmerje med višino in premerom preskušanca  
<sup>b</sup> H/D = 0,80 do 1,21



Standard predlaga tudi določitev tipa porušitve. Slikovno prikazuje zadovoljive in nezadovoljive tipe porušitev, s katerimi je treba označiti preskušance (slika 40). Za neprimerne porušitve je po navadi vzrok nepravilnost ali premajhna pozornost pri izdelavi ali testiranju preskušancev. Vzrok je lahko tudi napaka stroja. Primera primerne porušitve je na sliki 41.



Slika 40: Tipi primernih in neprimernih porušitev preskušancev (SIST EN 13286-41:2004)



Slika 41: Primera primerne porušitve preskušancev po enoosni tlačni obremenitvi

## 6.9.2 Sistem 2

Laboratorij v Vrtojbi je opremljen z napravo za posredno natezno trdnost. Natezne trdnosti  $R_t$  so bile določene posredno iz posrednih nateznih trdnosti  $R_{it}$  z zvezo  $R_t = 0,8 \cdot R_{it}$ , ki jo določa standard SIST EN 14227-1. Ugotavljanje posredne natezne trdnosti s hidravličnimi vezivi stabiliziranih mešanic je bilo izvedeno v skladu z navodili standarda SIST EN 13286-42. Vzorce se je obremenjevalo kontinuirano do porušitve z obtežbo, ki ni presejala 0,2 MPa/s. Preskusi so morali biti opravljeni čim

prej po odvzemu preskušancev iz komore, da ni prišlo do izgub vlage. Pred testom so bili zaradi kontrole preskušanci še stehtani, ker izguba mase ne sme presegati 2 %. Posredno natezno trdnost  $R_{it}$  izračunamo po enačbi:

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

kjer pomeni:

F – odčitana porušitvena sila (N)

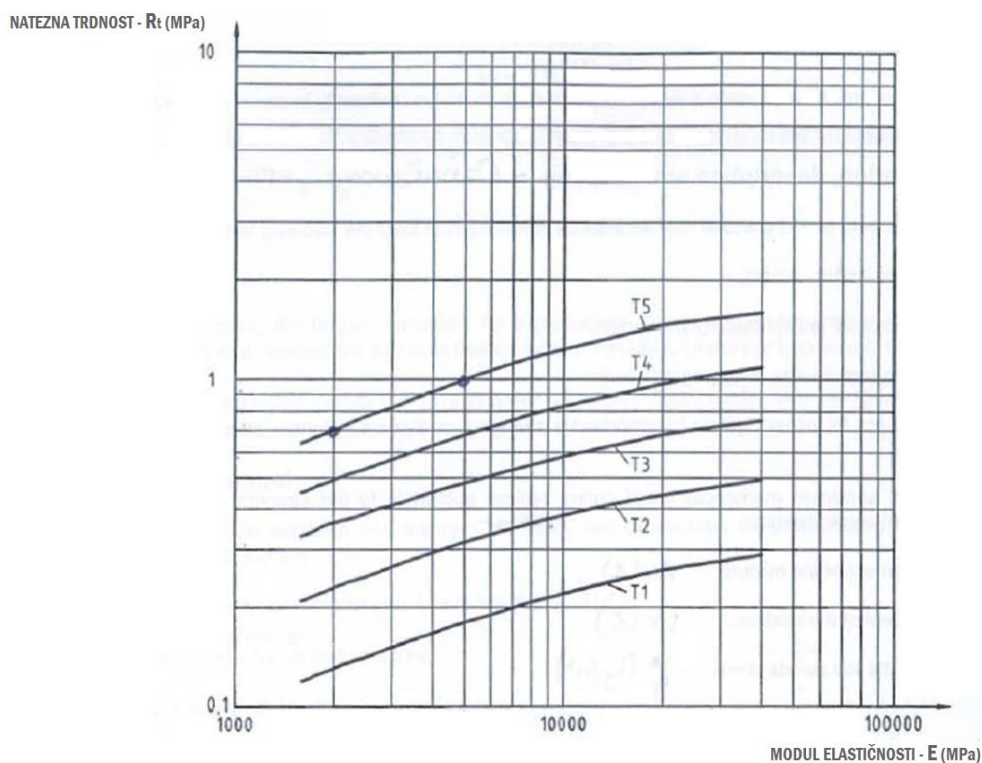
H – višina preskušanca (mm)

D – premer preskušanca (mm)

Posredno natezno trdnost stabilizirane mešanice vedno določa povprečje treh preskušancev. Če ena vrednost odstopa od povprečja za 20 %, se ta izloči. Posredna natezna trdnost je povprečje ostalih dveh. Trdnostni razred določimo s kombinacijo vrednosti natezne trdnosti in modula elastičnosti iz preglednice 12.

Preglednica 12: Klasifikacija s hidravličnimi vezivi stabilizirane mešanice glede na modul elastičnosti in natezno trdnosti (SIST EN 14227-1:2005)

Modul elastičnosti E (MPa)	1600	2000	5000	10000	20000	40000
KATEGORIJA	Natezna trdnost – $R_t$ (MPa)					
T5	0,64	0,70	1,00	1,23	1,46	1,59
T4	0,45	0,49	0,68	0,83	0,97	1,09
T3	0,33	0,36	0,48	0,58	0,68	0,75
T2	0,21	0,23	0,32	0,38	0,44	0,49
T1	0,12	0,13	0,18	0,22	0,22	0,29



Slika 42: Grafičen prikaz klasifikacije po sistemu 2 (EN 14227-1:2005)

Stiskalnica za preizkušanje posredne natezne trdnosti in primera primerne porušitve sta prikazana na slikah 43 in 44. Preiskave modula elastičnosti so bile izvedene na Inštitutu za gradbene materiale (Igmata, d. d., Ljubljana - Polje).



Slika 43: Stiskalnica za preizkušanje posredne natezne trdnosti



Slika 44: Primer primerne porušitve preskušanca



Slika 45: Preiskave modula elastičnosti je izvedel Igmtat, d. d., Inštitut za gradbene materiale

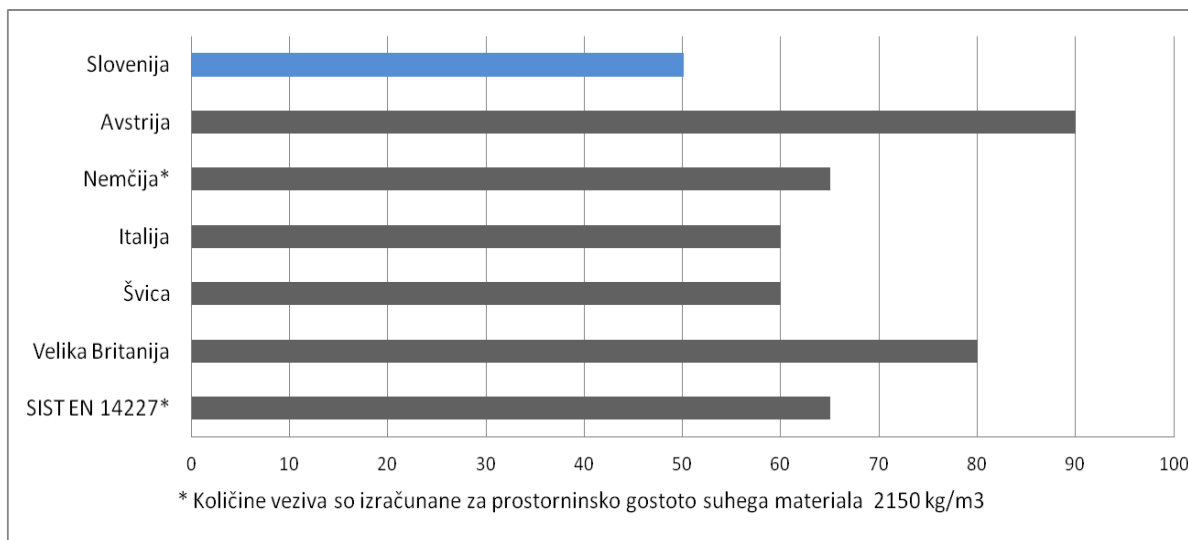
## 6.10 Rezultati meritev trdnosti in modula elastičnosti

V raziskavi v sklopu diplomskega dela je bilo preizkušenih pet različnih veziv, ki so označena z velikimi tiskanimi črkami.

Vsa veziva spadajo v skupino hidravličnih veziv, s katerimi se izdelujejo s hidravličnimi vezivi stabilizirane mešanice po zahtevah serije standardov SIST EN 14227. Po definiciji so to fino zmleti neorganski materiali, ki se po mešanju z vodo strdijo na zraku in v vodi ter po strditvi ostanejo tudi pod vodo trdni in stabilni. Sestava, zahteve in merila skladnosti veziv so bili privzeti iz standardov SIST EN 13282 (Hidavlična veziva za ceste) in SIST EN 197-1 (Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente).

Z vezivom A je bilo pripravljenih 5 serij mešanic s po tremi preskušanci za tlačno in posredno natezno trdnost po 7 in 28 dneh. Slovenija ima v primerjavi z drugimi evropskimi državami glede doziranja minimalne količine dodanega hidravličnega veziva najmanjšo zahtevo. Podatki nekaterih držav so zbrani v preglednici 13. Iz tehnične specifikacije TSC 06.320:2004 izhaja, da je najmanjša količina hidravličnega veziva  $50 \text{ kg/m}^3$ . V kolikor je dokazana možnost enakomernega vmešavanja in zagotovljena pogojena minimalna enoosna tlačna trdnost, pa je količina dodanega veziva lahko še manjša. To je bil razlog, da je bil izbran velik razpon deleža veziva ( $25 \text{ kg/m}^3$ ,  $50 \text{ kg/m}^3$ ,  $75 \text{ kg/m}^3$ ,  $100 \text{ kg/m}^3$  in  $125 \text{ kg/m}^3$ ), ki je bil hkrati izbran kot naš etalon.

Preglednica 13: Minimalna količina dodanega veziva nekaterih držav Evrope

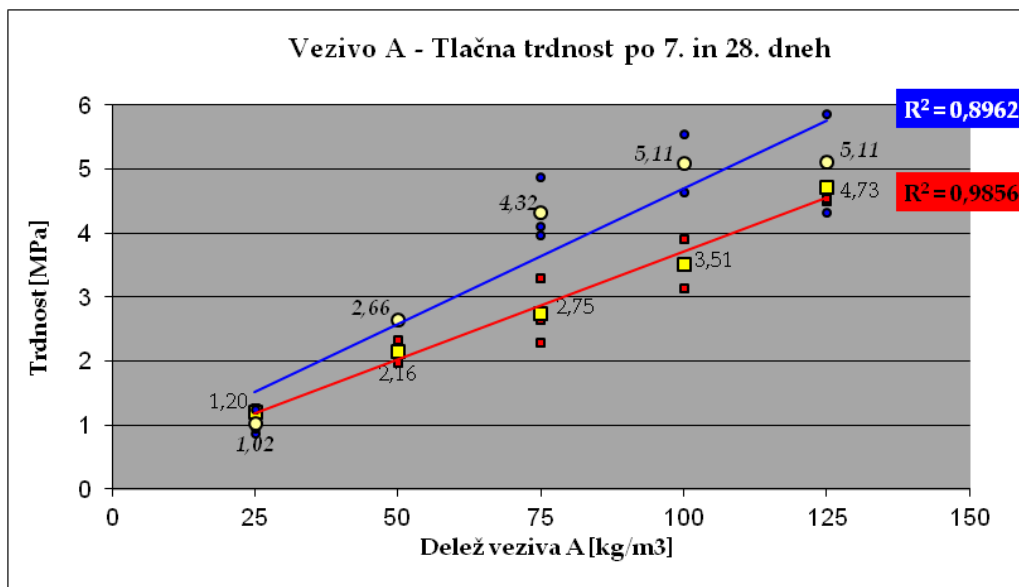


Rezultati preiskav z vezivom A so zbrani v preglednici 14. Izvrednotene 7-dnevne tlačne in posredne natezne trdnosti so povprečne vrednosti trdnosti treh preskušancev. Zaradi omejenega števila kalupov (12 namesto 15) so 28-dnevne trdnosti in modul elastičnosti povprečja dveh preskušancev. Pri vseh vzorcih so bile kontrolirane izgube vlage, ki ne sme biti večja od 2 %. Povprečna izguba mase preskušancev po 7 dneh je bila 0,7 %, po 28 dneh pa je povprečje zraslo na 1,15 %. Za klasifikacijo s hidravličnimi vezivi stabilizirane mešanice po sistemu 2 je v preglednici 14 dodan stolpec z neposredno natezno trdnostjo po 28 dneh. Vrednosti so bile izračunane z zvezo  $R_t = 0,8 \cdot R_{it}$ .

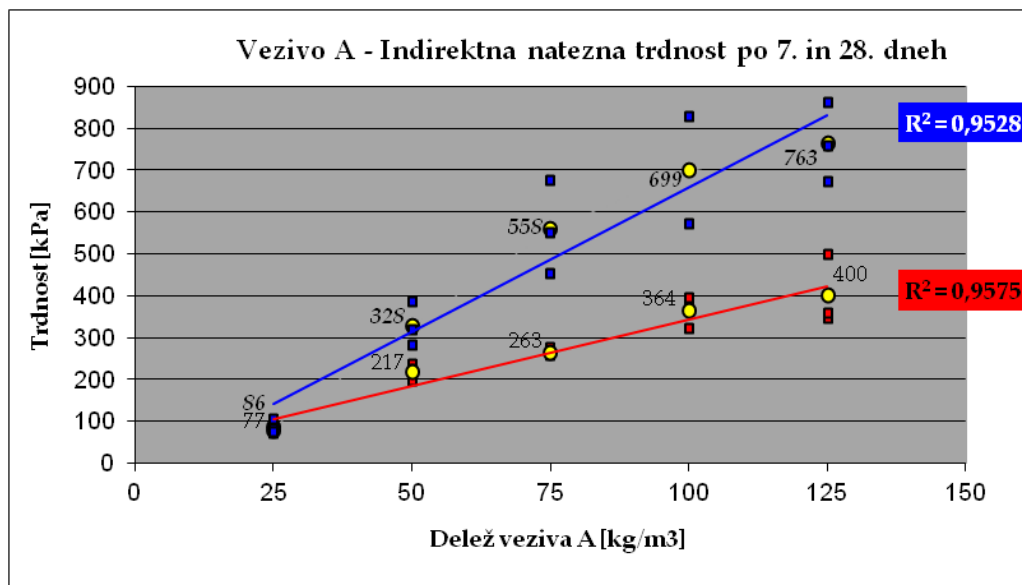
Preglednica 14: Mehanske lastnosti mešanice z vezivom A in klasifikacija po sistemu 1 in 2

VEZIVO A		Končne lastnosti stabilizirane mešanice						Trdnostni razred		
		$R_c$ = Tlačna trdnost (MPa)		$R_{it}$ = Indirektna natezna trdnost (kPa)		E (MPa)	$R_t$ (MPa)	SISTEM 1 $R_c$		SISTEM 2 $R_t / E$
Delež [kg/m <sup>3</sup> ]	Delež [m.-%]	7 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni
25	1,16	1,2	1,02	77	86	-	69	C0	C0	-
50	2,33	2,16	2,66	217	328	2420	262	C <sub>1,5/2</sub>	C <sub>1,5/2</sub>	T2
75	3,49	2,75	4,33	263	558	-	447	C <sub>1,5/2</sub>	C <sub>3/4</sub>	-
100	4,65	3,51	5,11	364	699	3630	559	C <sub>1,5/2</sub>	C <sub>3/4</sub>	T3
125	5,81	4,73	5,11	400	763	-	610	C <sub>3/4</sub>	C <sub>3/4</sub>	-

Na slikah 46 in 47 je predstavljena odvisnost tlačne in posredne natezne trdnosti mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni. Posamezne tri vrednosti po enem tednu so vrisane z rdečimi kvadrati, njihovo povprečje pa z rumenim kvadratom. Vrednosti po 28 dneh so obarvane z modro barvo. Odvisnost je predstavljena z linearnim trendom.



Slika 46: Odvisnost tlačne trdnosti stabilizirane mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend)

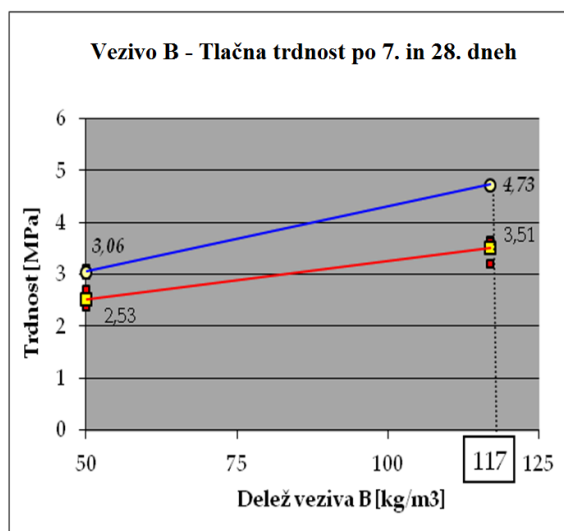


Slika 47: Odvisnost posredne natezne trdnosti stabilizirane mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend)

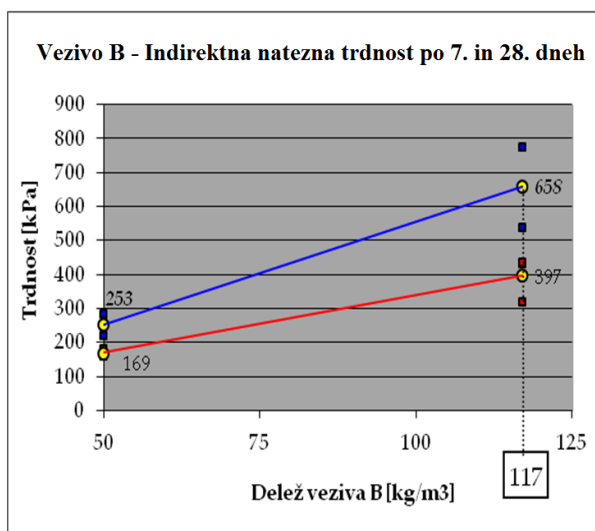
Razlika med vezivom A in vezivom B je v tem, da vezivo B vsebuje večji delež portland cementnega klinkerja. Tlačna trdnost, posredna natezna trdnost in modul elastičnosti so bili preiskani na preskušancih s  $50 \text{ kg/m}^3$  in  $117 \text{ kg/m}^3$  dodanega hidravličnega veziva B (preglednica 15). Količina  $50 \text{ kg/m}^3$  je bila izbrana kot povprečna najpogosteje uporabljena količina v dosedanji praksi izdelave stabilizacij. S količino  $117 \text{ kg/m}^3$  pa je bila omogočena primerjava z vezivom C, opisanim v nadaljevanju.

Preglednica 15: Mehanske lastnosti mešanic z vezivom B in klasifikacija po sistemu 1 in 2

VEZIVO		Končne lastnosti stabilizirane mešanice						Trdnostni razred		
		$R_c$ = Tlačna trdnost (MPa)		$R_{it}$ = Indirektna natezna trdnost (kPa)		E (MPa)	$R_t$ (MPa)	Sistem 1 $R_c$		Sistem 2 $R_t / E$
Delež [kg/m <sup>3</sup> ]	Delež [m.-%]	7 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni
50	2,33	2,53	3,06	169	252	3400	202	C1,5/2	C1,5/2	T1
117	5,44	3,51	4,73	397	658	3000	526	C1,5/2	C3/4	T3



Slika 48: Odvisnost tlačne trdnosti stabilizacijske mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend)



Slika 49: Odvisnost posredne natezne trdnosti stabilizacijske mešanice od deleža veziva pri starosti 7 in 28 dni (linearni trend)

Vezivu B je bil nato dodan kemijski dodatek. Novo dobljeno vezivo je bilo označeno kot vezivo C. S tem vezivom so bile raziskane lastnosti preskušancev samo s  $117 \text{ kg/m}^3$  dodanega veziva (preglednica 16). Količina izhaja neposredno iz projekta, izvedenega v tuji državi. Projektant je predpisal mehanske lastnosti stabilizirane nosilne plasti in cement za izvedbo (preglednica 17). Za hitro pripustitev javnega

prometa bi morala skladno s projektom vgrajena stabilizirana plast dosegati zahteve po 16 in 24 urah. Z vezivom C so se te zahteve poskušale doseči.

Preglednica 16: Mehanske lastnosti mešanic z vezivom C in klasifikacija po sistemu 1 in 2

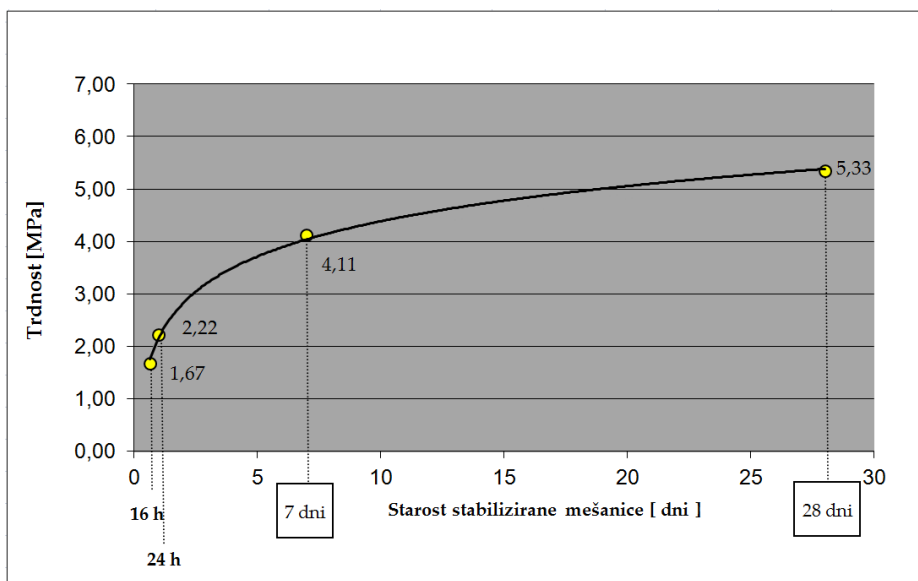
VEZIVO C		Končne lastnosti stabilizirane mešanice										Trdnostni razred		
		Rc = Tlačna trdnost (Mpa)				Rit = Indirektna natezna trdnost (kPa)				E (MPa)	Rt (MPa)	Sistem 1 Rc		Sistem 2 Rt / E
Delež [kg/m <sup>3</sup> ]	Delež [m.-%]	16h	24h	7 dni	28 dni	16h	24h	7 dni	28 dni	28 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni
117	5,44	1,67	2,22	4,11	5,33	91	134	439	734	3300	587,2	C <sub>3/4</sub>	C <sub>3/4</sub>	T3

Preglednica 17: Primerjava projektnih zahtev in doseženih vrednosti z vezivom C

		Zahteve iz projekta	Z vezivom C	Ustreznost
Rc	16h	≥ 2,0 MN/m <sup>2</sup>	1,67 MN/m <sup>2</sup>	×
	24h	≥ 3,5 MN/m <sup>2</sup>	2,22 MN/m <sup>2</sup>	×
	7 dni	4,0 - 5,5 MN/m <sup>2</sup>	4,11 MN/m <sup>2</sup>	✓
	28 dni	5,5 - 7,0 MN/m <sup>2</sup>	5,33 MN/m <sup>2</sup>	×
Rit	28 dni	0,7 - 1,2 MN/m <sup>2</sup>	734 MN/m <sup>2</sup>	✓
E	28 dni	7000 - 12500 MN/m <sup>2</sup>	3300 MN/m <sup>2</sup>	×

Iz preglednice 17 je razvidno, da vezivo C ne izpolnjuje vseh zahtev, predpisanih v projektu. Ker je rast (tlačne) trdnosti stabilizirane mešanice na začetku prepočasna, nista bili doseženi že prvi zahtevi, po katerih bi morala biti zagotovljena ustrezna trdnost stabilizirane mešanice po 16 in 24 urah. Prav tako nista bili izpolnjeni zahtevi za modul elastičnosti in tlačne trdnosti po 28 dneh. Zato prometa ne bi bilo mogoče pripustiti na vozišče z nosilno plastjo, stabilizirano z 117 kg/m<sup>3</sup> dodanega veziva C. Rešitev bi lahko bila povečana količina stabilizacijskega veziva ali njegova zamenjava. Časovni razvoj tlačne trdnosti z vezivom C stabilizirane mešanice prikazuje slika 50.





Slika 50: Časovni razvoj tlačne trdnosti z vezivom C stabilizirane mešanice

Po treh cementnih vezivih različnih vrst in z dodatki so bile preizkušene hidravlične sposobnosti dveh različnih vrst veziv, ki sta dobili oznako vezivo D in vezivo E. Preskušanci niso dosegli mehanskih lastnosti prvih treh veziv (preglednica 18). Uporabljeni vezivi ne moremo obravnavati kot vezivi za stabiliziranje. Kvečjemu ju lahko v prihodnjih raziskavah uporabimo kot dodatek k cementu ali sestavljenemu vezivu.

Preglednica 18: Mehanske lastnosti mešanic z vezivom D in E ter klasifikacija po sistemu 1 in 2

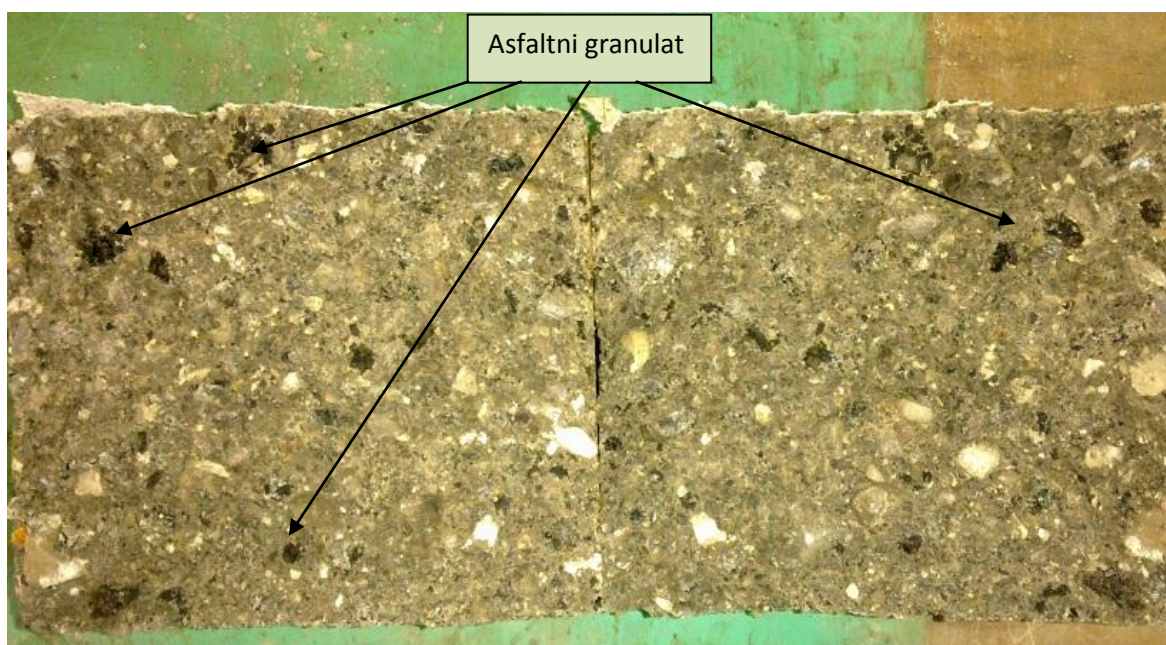
		Končne lastnosti stabilizirane mešanice					Trdnostni razred	
VEZIVO D		$R_c$ = Tlačna trdnost (MPa)		$R_{it}$ = Indirektna natezna trdnost (kPa)		$R_t$ (MPa)	Sistem 1 $R_c$	
Delež [kg/m <sup>3</sup> ]	Delež [m.-%]	7 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni	7 dni	28 dni
322,5	15	1,03	1,68	36	80	28,8	C0	C0
645	30	1,22	2,11	68	135	54,4	C0	C1,5/2

		Končne lastnosti stabilizirane mešanice					Trdnostni razred	
VEZIVO E		$R_c$ = Tlačna trdnost (MPa)		$R_{it}$ = Indirektna natezna trdnost (kPa)		$R_t$ (MPa)	Sistem 1 $R_c$	
Delež [kg/m <sup>3</sup> ]	Delež [m.-%]	7 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni	7 dni	28 dni
322,5	15	0,68	1,33	31	60	24,8	C0	C0
645	30	1,22	2,36	48	173	38,4	C0	C1,5/2

## 7 ANALIZA REZULTATOV

### 7.1 Uvod

Vse raziskave so bile narejene z zmesjo zrn, pridobljeno po metodi hladne reciklaže. Zaradi strojnega rezkanja (drobljenja in mešanja) materialov obstoječe voziščne konstrukcije do projektne globine zmes zrn vsebuje tudi asfaltni granulata. Sestava odrezkanega materiala se razlikuje od zmesi zrn, ki je po navadi uporabljena v proizvodnji stabilizacijskih mešanic s hidravličnimi vezivi. Primerjava ugotovljenih tlačnih trdnosti s tlačnimi trdnostmi stabilizacijskih mešanic, proizvedenih po postopkih dosedanje prakse, omogoča zanimivo ugotovitev. Zaradi prisotnosti asfaltne granulata (slika 51) reciklirana zmes zrn doseže pri enakem deležu dodanega hidravličnega veziva v stabilizacijskih mešanicah nižje tlačne trdnosti. Zato je za doseg enakih tlačnih trdnosti treba vmešavati večjo količino veziva, kar pa hkrati pomeni podražitev postopka reciklaže. Po drugi strani pa večje količine dodanega veziva omogočajo pri izvedbi na terenu boljše homogenizacijo mešanic. Zmanjša se območje nihanja rezultatov tlačnih trdnosti in posledično se zmanjša število poškodb voziščne konstrukcije, ki se pri previsokih trdnostih odražajo kot razpoke v voziščni konstrukciji, pri prenizkih tlačnih trdnostih pa vezana nosilna plast ne more v celoti izpolniti svojih funkcij.

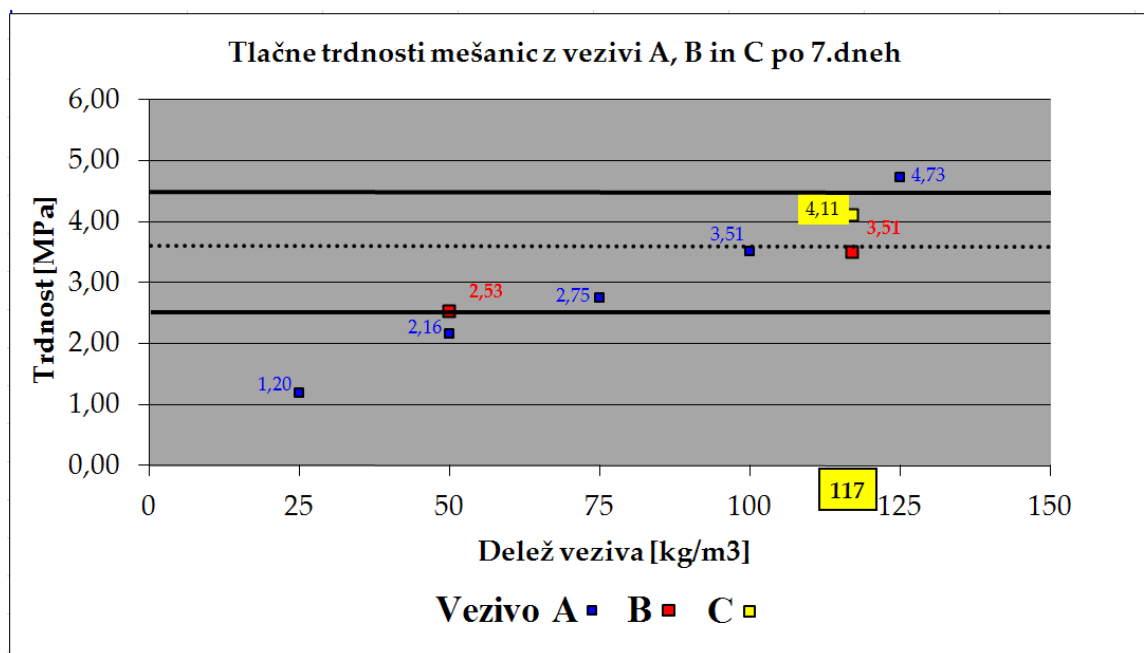


Slika 51: Prikaz asfaltne granulata v prerezu vzorca stabiliziranega materiala

## 7.2 Določitev optimalne količine hidravličnega veziva

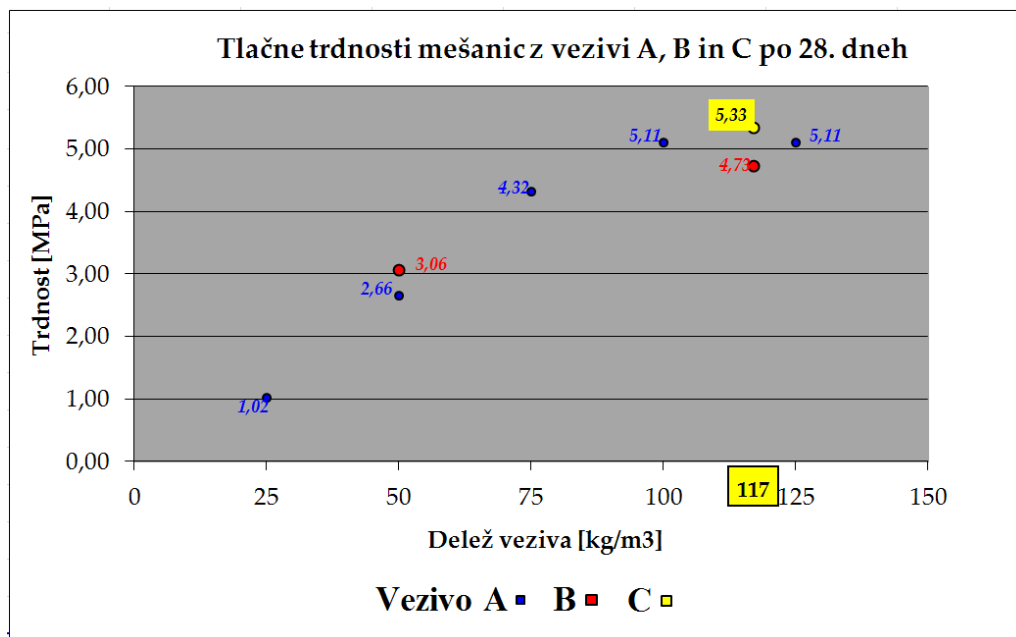
Količino hidravličnega veziva za pripravo stabilizacijske mešanice za vezano nosilno plast je treba za zahtevano enosno tlačno trdnost določiti na osnovi ugotovljenih odvisnosti enosnih tlačnih trdnosti od deleža vsebovanega veziva. Tehnična regulativa TSC 06.320:2004 pravi: povprečna enosna tlačna trdnost treh preskušancev, pripravljenih z enako količino hidravličnega veziva za določitev predhodne sestave stabilizacijskih mešanic, mora praviloma po 7 dneh znašati  $3,5 \text{ MN/m}^2$ , najmanjša posamična vrednost  $2,5 \text{ MN/m}^2$ , priporočena največja vrednost pa ne več kot  $4,5 \text{ MN/m}^2$ . Zahteva za izbiro deleža veziva je bila v prejšnji izdaji te specifikacije manjša, saj je bila tlačna trdnost  $3,5 \text{ MPa}$  zahtevana šele pri starosti 28 dni.

Na sliki 52 so vrisane vse 7-dnevne tlačne trdnosti prvih treh preizkušenih veziv. Z debelo črto sta označeni mejni vrednosti, s črtkano črto pa pričakovana tlačna trdnost ( $3,5 \text{ MN/m}^2$ ) tehnične specifikacije. Vezivi D in E zaradi preskromnih trdnosti nista vključeni.



Slika 52: Tlačne trdnosti stabiliziranih mešanic z različnimi deleži veziv A, B in C po 7 dneh

Za vezivo A je bila izbrana optimalna količina  $100 \text{ kg/m}^3$ , za vezivo B pa  $117 \text{ kg/m}^3$ . Tudi v drugih evropskih državah se zahteve nanašajo na tlačno trdnost. Dimenzije, načini izdelave in režimi staranja preskušancev pa se v državah razlikujejo. Standard SIST EN 14227-1 klasifikacijo glede na tlačno trdnost zajema v sistemu 1.



Slika 53: Tlačne trdnosti stabiliziranih mešanic z različnimi deleži veziv A,B in C po 28 dneh

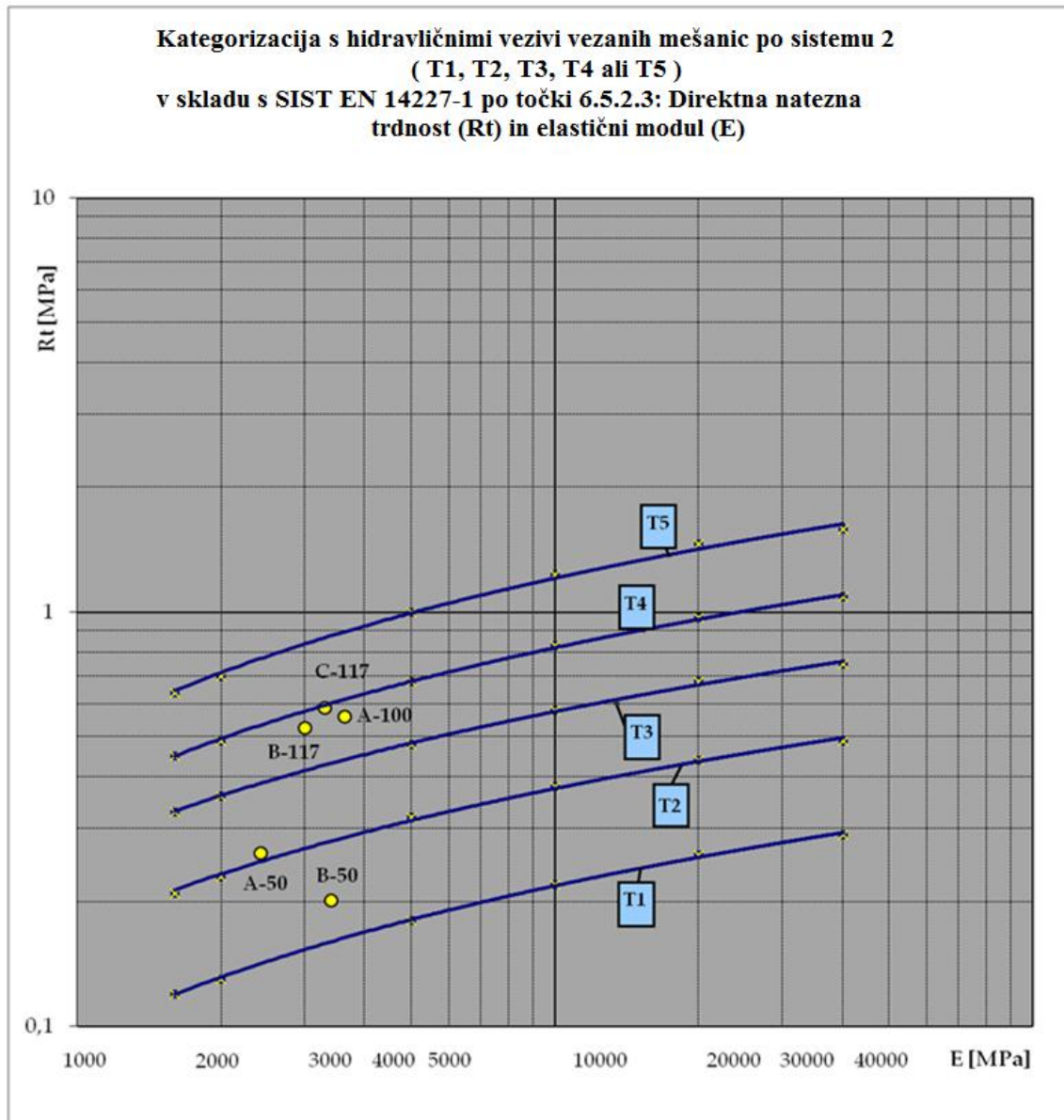
Za z vezivom A stabilizirano mešanico je v preglednici 19 omogočena kontrola skladnosti z zahtevami v predpisih drugih držav, ki se nanašajo na stabilizirano nosilno plast.

Preglednica 19: Primerjava zahtev evropskih držav in vrednosti za z vezivom A stabilizirano zmes zrn (količina veziva 100 kg/m<sup>3</sup>)

Zahteve za končne lastnosti stabilizirane mešanice	Tlačna trdnost [ Mpa ]		Indirektna natezna trdnost [ Mpa ]		Elastični modul [ Mpa ]
	7 dni	28 dni	7 dni	28 dni	28 dni
VEZIVO A	3,51	5,11	0,364	0,699	3630
SLOVENIJA	≥ 2,5 - 4,5	-	-	-	-
AVSTRIJA	≥ 2,5 - 3,5	-	-	-	-
NEMČIJA	-	≥ 3,5	-	-	-
ITALIJA	≥ 3,5 - 6,5 MPa	-	≥ 0,35 MPa	-	-
ŠVICA	≥ 2,0 - 4,0 MPa	-	-	-	-
HRVAŠKA	≥ 1,5 - 5,5 MPa	≥ 2,5 - 6,0 MPa	-	-	-

Primerjava nam pokaže, da bi naša stabilizirana nosilna plast ustrezala zahtevam v vseh navedenih državah. V Avstriji bi morali dodatno pozornost nameniti zgornji meji, da tlačne trdnosti ne bi postale previsoke.

Ker pa smo poleg tlačne trdnosti merili še modul elastičnosti in natezno trdnost (posredno iz rezultatov posredne natezne trdnosti), nam je omogočena tudi klasifikacija po sistemu 2 (slika 54). Zahteve, ki bi se nanašale na zvezo modul elastičnost–natezna trdnost, niso bile ugotovljene v nobeni državni specifikaciji. Izjema je lahko le Italija, ki predpisuje vrednosti posredne natezne trdnosti. V nacionalni specifikaciji Norme Tecniche CNR BU n.29 je naveden predpis, da mora biti posredna natezna trdnost po 7 dneh  $\geq 0,35$  MPa.



Slika 54: Grafični prikaz rezultatov klasifikacije po sistemu 2 izbranih deležev veziv A, B in C

### 7.3 Odpornost mešanice proti škodljivim vplivom vremena

S hidravličnim vezivom stabilizirane zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti morajo poleg prometnim obremenitvam kljubovati tudi neugodnim klimatskim pogojem. Mešanice morajo biti odporne proti učinkom mraza, torej tudi proti škodljivi zamrznitvi vode v njih. Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.320 določa pogoje, kdaj je odpornost treba preveriti:

- če zmes kamnitega materiala vsebuje
  - več kot 15 m.-% zrn, manjših od 0,063 mm in/ali
  - več kot 10 m.-% krhkih zrn ali
- če je potrebna količina hidravličnega veziva manjša od 2 m.-%

Preskus odpornosti proti škodljivim vplivom vremena, tj. proti zmrzovanju in tajanju, izvedemo z izpostavitvijo preskušancev dvanajstim ciklom zamrznjenja in tajanja. Preskušance hranimo izmenično 24 ur v zamrzovalni komori s temperaturo  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$  in 24 ur v vlažni komori na temperaturi  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kjer morajo biti vzorci postavljeni na podlago, zasičeno z vodo. Količnik odpornosti je razmerje povprečnih vrednosti enosnih tlačnih trdnosti preskušancev, izpostavljenih zmrzovanju in tajanju, ter preskušancev, izpostavljenih po enakem času vzdrževanja samo postopku preskusa po točki 5.2.4 specifikacije TSC 06.320:2004. Ta količnik mora znašati najmanj 0,7. Podoben postopek uporabljajo tudi v Avstriji in na Hrvaškem, kjer je zahteva za količnik odpornosti 0,8. Nobena naša mešanica ni izpolnjevala zgornjih zahtev, zato kontrola ni bila potrebna.

Zanimiv kriterij zasledimo v britanski specifikaciji glede odpornosti hidravlično vezanih mešanic proti zmrzovanju. Ta je zagotovljena, če mešanica, stara 28 dni, doseže trdnostni razred C3/4 po klasifikacijskem sistemu 1, ali pa je njena posredna natezna trdnost najmanj 250 kPa. Seveda so podnebne razmere v tej državi popolnoma drugačne kot v Sloveniji.

## 8 ZAKLJUČEK

Za potrebe raziskovalne naloge je bila voziščna konstrukcija lokalne ceste odrezkana do globine 20 cm. Pri odvzetih vzorcih rezkanca smo najprej preverili zrnastostne karakteristike zmesi zrn, ki so nam določile uporabnost materiala. Presejna krivulja zmesi zrn se je izkazala kot zelo dobra, celo predobra. Želje pri obnovi ceste so, da bi bila stabilizirana nosilna plast z odpornostjo proti zmrzovanju čim debelejša. Pri debelini recikliranja 30 cm bi rezkanec vseboval več glinenih delcev, kar bi zahtevalo zahtevnejšo obdelavo. Ker smo pri raziskavah vmešavali precej večjo količino (celo do 100 %) hidravličnega veziva kot znaša najmanjša priporočena količina dodanega veziva, bi bilo koristno spremljati izboljšavo zmesi zrn – rezkanca slabše kakovosti od naših.

## **VIRI**

Cotič, Z., Čotar, M. 2006. Obnova državnih cest s ponovno uporabo materialov iz voziščne konstrukcije.

<http://www.drc.si/Portals/1/Referati/T4-Cotic.pdf> (Pridobljeno 2.2.2012.)

Hevka, P. 2010. Obnova dotrajanih vozišč – reciklaža z uporabo penjenega bitumna.

<http://www.drc.si/Portals/6/prispevki/III/527-542.pdf> (Pridobljeno 3.3.2012.)

Jurjavčič, P. 2006. Stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Jurjavčič): 113 str.

Read, J., Whiteoak, D., Shell Bitumen. 2003. The Shell Bitumen Handbook. 5. Izdaja. London, Thomas Telford Publishing: 460 str.

Šircelj, M., Cezar, J. 2006. Sanacija cest – od načrtovanja do izvedbe reciklaže z uporabo penjenega bitumna.

<http://www.drc.si/Portals/1/Referati/T6-Sircelj.pdf> (Pridobljeno 2.2.2012.)

Vlada Republike Slovenije. 2009. Akcijski načrt za zeleno javno naročanje za obdobje 2009–2012. Ljubljana, Vlada Republike Slovenije: 45 str.

Wirtgen. 2010. Cold Recycling Manual. 3. izdaja. Windhagen, Wirtgen GmbH: 339 str.

Žmavc, J. 2007. Gradnja cest – voziščne konstrukcije, 2. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 357 str.

Žmavc, J. 2010. Vzdrževanje cest, 1. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 289 str.

## **Standardi**

SIST EN 13286-41:2004. Nevezane in hidravlično vezane zmesi. Del 41: Preskusna metoda za ugotavljanje tlačne trdnosti hidravlično vezanih zmesi. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.



SIST EN 13286-42:2004. Nevezane in hidravlično vezane zmesi. Del 42: Preskusna metoda za ugotavljanje posredne natezne trdnosti hidravlično vezanih zmesi. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 14227-2:2004. Hidravlično vezane zmesi. Specifikacije. Del 2: Žlindraste vezane zmesi. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 13286-2: 2005. Nevezane in hidravlično vezane zmesi. Del 2: Preskusne metode za določanje laboratorijske referenčne gostote in vlage. Proctorjev preskus. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 13286-50:2005. Nevezane in hidravlično vezane zmesi. Del 50: Postopek za pripravo preizkušancev iz hidravlično vezanih zmesi, zgoščenih po Proctorjevem postopku ali vibracijsko mizo. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

SIST EN 14227-1:2005. Hidravlično vezane zmesi. Specifikacije. Del 1: S cementom stabilizirane mešanice za vezane spodnje nosilne plasti. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

TSC 03.325: 2003. Tehnična specifikacija za javne ceste. Maloprometne ceste. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.320: 2004. Tehnična specifikacija za javne ceste. Vezane spodnje nosilne plasti s hidravličnimi vezivi. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.800: 2009. Tehnična specifikacija za javne ceste. Smernice in teh. pogoji za ponovno uporabo materialov v cestogradnji. Recikliranje. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste.

### **Ostali viri**

Obnova državnih cest s ponovno uporabo materialov iz voziščne konstrukcije. 2006.  
[http://www.primorje.si/mma\\_bin.php?id=2008022708344585](http://www.primorje.si/mma_bin.php?id=2008022708344585) (Pridobljeno 2.2.2012.)

Direkcija Republike Slovenije za ceste v letu 2010. 2010.  
[http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/LP\\_DRSC\\_2010\\_SLO\\_WEB.pdf](http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/LP_DRSC_2010_SLO_WEB.pdf)  
(Pridobljeno 12.2.2012.)