

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Cvek, D. 2013. Rekonstrukcija ceste z uporabo hladne reciklaže z elektrofitrskim pepelom. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žmavc, J., somentor Hribar, D.): 83 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Cvek, D. 2013. Rekonstrukcija ceste z uporabo hladne reciklaže z elektrofitrskim pepelom. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žmavc, J., co-supervisor Hribar, D.): 83 pp.

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:

**DAVOR CVEK**

**REKONSTRUKCIJA CESTE Z UPORABO HLADNE  
RECIKLAŽE Z ELEKTROFILTRSKIM PEPELOM**

Diplomska naloga št.: 3302/PS

**COLD IN-PLACE RECYCLING WITH FLY ASH**

Graduation thesis No.: 3302/PS

**Mentor:**

prof. dr. Janez Žmavc

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

mag. Dejan Hribar, univ. dipl. inž. grad.

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 31. 05. 2013

## **IZJAVE**

Podpisani **Davor Cvek** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »**Rekonstrukcija ceste z uporabo hladne reciklaže z elektrofiltrskim pepelom**«.

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

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

Ljubljana, 6. 5. 2013

Podpis:



## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>625.7/.8(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Davor Cvek</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Janez Žmavc</b>
<b>Somentor:</b>	<b>mag. Dejan Hribar, univ.dipl.inž.grad.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Rekonstrukcija ceste z uporabo hladne reciklaže z elektrofiltrskim pepelom</b>
<b>Tipa dokumenta:</b>	<b>dipl. nal. - UNI</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>83 str., 26 pregl., 41 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>voziščna konstrukcija, elektrofiltrski pepel, hladna reciklaža, temeljna tla</b>

### **Izvleček**

V prvem delu naloge je opisana sestava voziščnih konstrukcij, izpostavljenost in različne poškodbe na krovnih plasteh vozišč. Poškodbe lahko saniramo z rednim ali pa z gradbenim vzdrževanjem, ki se med seboj razlikujeta po obsegu in zahtevnosti del ter finančni investiciji popravila. Hladna reciklaža z elektrofiltrskim pepelom spada pod sklop gradbenih vzdrževanj. Obravnavano tehnologijo pa izdeluje in razvija nemško podjetje Wirtgen. Elektrofiltrski pepel je stranski produkt pri pridobivanju premogovne energije. Deponiranje pepela mora biti urejeno na primernih odlagališčih. Vse pogosteje pa se pepel uporablja tudi v cestogradnji.

V drugem delu pa je predstavljena praktična uporaba elektrofiltrskega pepela pri postopku hladne reciklaže. Obravnavana je sanacija ceste Podrošt – Češnjica v občini Železniki, katera je bila zaradi poplav leta 2007 v razpadajočem stanju. Po prvotnem projektu je bila predvidena sanacija s klasično zamenjavo. Na prošnjo izvajalca za spremembo tehnologije pa je bila cesta sanirana s postopkom reciklaže. Temeljna tla so bila stabilizirana z elektrofiltrskim pepelom, posteljica pa je bila zgrajena iz rezkanega asfalta in nevezane nosilne plasti obstoječe voziščne konstrukcije. S takim načinom gradnje smo uspešno zmanjšali porabo in pripravo novega materiala. V nalogi so predstavljeni rezultati predhodnih raziskav, potek izvedbe del in analiza zaključnega poročila zunanje kontrole. Na koncu pa sem z ekonomsko analizo stroškov in okoljevarstveno analizo želel še preveriti, ali je postopek reciklaže res cenovno ugodnejši in okolju prijaznejši od klasičnega postopka zamenjave voziščne konstrukcije.



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

**UDC:** 625.7/.8(043.2)  
**Author:** Davor Cvek  
**Supervisor:** prof. Janez Žmavc, Ph.D.  
**Cosupervisor:** Dejan Hribar, M.ScE.  
**Title:** Cold in-place recycling with fly ash  
**Document type:** graduation thesis – university studies  
**Scope and tools:** 83 p., 26 tab., 41 fig.  
**Keywords:** pavement structure, fly ash, cold in-place recycling, subgrade soil

### **Abstract**

The first part of the thesis describes layers of pavement structure, exposure and distress of surface layers. Pavements can be maintained either by surface or structural rehabilitation. The main difference is in complexity and financial costs of maintenance. Cold in-place recycling with fly ash is a part of structural rehabilitation. The technology of recycling is produced by the German company Wirtgen. Fly ash is a by-product of coal combustion. Depositing of fly ash must be provided on suitable depots. In present time, usage of fly ash is increasing in road construction.

The second part of the thesis describes practical application of fly ash to cold in-place recycling. The case study was the reconstruction of Podrošt – Češnjica road in Železniki municipality. The road was severely damaged in the flood of 2007. Initially, the project predicted that mill and replace of pavement structure would be implemented, but the contractor applied for technology change to cold recycling. In the process, subgrade soil was stabilized with fly ash and granular base was built of milled asphalt. Using new technology, we successfully reduced material consumption and much less newly manufactured material was needed. The thesis also presents preliminary researches of existing pavement, construction procedure and analysis of external supervisor's report. In conclusion I tried to analyze the economic and environmental aspects of mill and replace of pavement structure and cold in-place recycling; furthermore, I tried to ascertain that cold in-place recycling is more economic and environmentally friendly than mill and replace of pavement structure.





## **ZAHVALA**

Za pomoč in usmerjanje se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Janezu Žmavcu in somentorju mag. Dejanu Hribarju. Za potrpežljivost in nasvete pri nastajanju praktičnega dela se zahvaljujem Janezu Šuštarju, inž. grad. in Marku Bebru, inž. grad.

Zahvaljujem se tudi družini in prijateljem, ki so mi tekom študija vedno stali ob strani.



## KAZALO VSEBINE

<b>IZJAVE .....</b>	<b>I</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBSTOJEČE IN PRIČAKOVANO STANJE SLOVENSКИH CEST.....</b>	<b>2</b>
<b>3 SESTAVA VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE .....</b>	<b>3</b>
3.1 Posteljica .....	4
3.2 Nevezane nosilne plasti.....	5
3.3 Vezane nosilne plasti .....	5
3.3.1 Spodnje vezane nosilne plasti.....	6
3.3.2 Zgornje vezane nosilne plasti .....	7
3.4 Asfaltna vezna plast .....	7
3.5 Obrabne in zaporne plasti .....	8
3.5.1 Nevezane obrabne plasti.....	8
3.5.2 Vezane obrabne in zaporne plasti.....	9
3.5.2.1 Asfaltna obrabne in zaporne plasti .....	9
3.5.2.2 Cementnobetonske krovne plasti.....	10
3.5.2.3 Tlakovane obrabne plasti.....	10
<b>4 IZPOSTAVLJENOST IN POŠKODBE NA VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJAH.....</b>	<b>11</b>
4.1 Vzroki za nastanek poškodb .....	12
4.1.1 Vpliv naravne .....	12
4.1.1.1 Podnebni vplivi .....	12
4.1.1.2 Voda .....	12
4.1.2 Vpliv človeka .....	13
4.1.2.1 Prometne obremenitve.....	13
4.1.2.2 Pomanjkljivo načrtovanje.....	13
4.1.2.3 Pomanjkljiva izvedba .....	13

4.1.2.4	Pomanjkljivo vzdrževanje .....	14
4.1.2.5	Neprimerna uporaba .....	14
4.2	Vrste poškodb.....	14
4.2.1	Asfaltna vozišča.....	14
4.2.1.1	Preoblikovanja .....	15
4.2.1.2	Razpoke .....	16
4.2.1.3	Razgraditve.....	17
4.2.1.4	Poškodbe površine.....	18
4.2.2	Cementnobetonska vozišča.....	19
4.2.2.1	Razpoke, rege, stiki .....	19
4.2.2.2	Odlomi vogalov, poškodbe robov.....	19
4.2.2.3	Poškodbe površine.....	19
4.2.2.4	Razmiki in stopnje .....	19
4.2.3	Tlakovana vozišča .....	20
<b>5</b>	<b>POPRAVILA POŠKODB – VZDRŽEVANJE.....</b>	<b>21</b>
5.1	Redno vzdrževanje .....	23
5.1.1	Preoblikovanja .....	23
5.1.2	Razpoke .....	24
5.1.3	Razgraditve.....	24
5.1.4	Poškodbe površine.....	24
5.2	Gradbeno vzdrževanje.....	24
5.2.1	Popravila krovnih plasti.....	25
5.2.1.1	Nadgradnja.....	25
5.2.1.2	Zamenjava .....	26
5.2.1.3	Reciklaža .....	26
5.2.2	Sanacija strukturnih poškodb voziščne konstrukcije.....	29
5.2.2.1	Zamenjava .....	30
5.2.2.2	Globoka reciklaža .....	30
5.2.2.3	Kombinacija in-place in in-plant reciklaže.....	33
<b>6</b>	<b>ZGODOVINSKI PREGLED HLADNE RECIKLAŽE.....</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>HLADNA RECIKLAŽA Z ELEKTROFILTRSKIM PEPELOM.....</b>	<b>35</b>
7.1	Uvod.....	35
7.2	Elektrofiltrski pepel.....	35
7.2.1	Pridobivanje.....	36

7.2.2	Kemijska sestava .....	36
7.3	Okoljevarstveni vidik uporabe elektrofiltrskega pepela .....	37
7.3.1	Izluževanje .....	38
7.3.2	Sevanje .....	39
7.3.3	Raztros.....	39
7.4	Elektrofiltrski pepel kot stabilizator v kombinaciji z cementom ali apnom .....	40
7.5	Tehnologija .....	40
7.5.1	Reciklažni niz.....	40
7.5.2	Reciklator .....	42
7.6	Preiskave in določitev recepture .....	43
<b>8</b>	<b>PRAKTIČNI PRIMER.....</b>	<b>45</b>
8.1	Predstavitev gradbišča.....	45
8.2	Predhodne raziskave .....	46
8.2.1	Laboratorijske preiskave .....	47
8.2.1.1	Preiskave zemljine.....	47
8.2.1.2	Zemljina stabilizirana s 5 m.-% elektrofiltrskega pepela .....	48
8.2.2	Dimenzioniranje voziščne konstrukcije .....	49
8.2.2.1	Analiza prometnih obremenitev .....	49
8.2.2.2	Določitev dimenzij voziščne konstrukcije.....	51
8.2.2.3	Predlagana sestava voziščne konstrukcije .....	52
8.3	Izvedba – potek gradnje .....	53
8.4	Zaključno poročilo .....	55
8.4.1	Kemično stabilizirana temeljna tla .....	56
8.4.1.1	Meritve vlage in gostote z izotopsko sondo .....	56
8.4.1.2	Meritve dinamičnega deformacijskega modula.....	57
8.4.2	Nevezana nosilna plast .....	59
8.4.2.1	Meritve vlage in gostote z izotopsko sondo .....	59
8.4.2.2	Meritve dinamičnega deformacijskega modula.....	60
8.4.2.3	Meritve statičnega deformacijskega modula .....	61
8.4.3	Laboratorijske preiskave .....	62
8.4.4	Zaključek.....	62
8.5	Stroškovna analiza .....	63
8.6	Okoljevarstvena analiza .....	67
8.6.1	Transport mehanizacije .....	68
8.6.2	Obratovanje mehanizacije .....	69
8.6.3	Transport materiala .....	71

---

8.6.4	Priprava materiala.....	74
8.6.5	Primerjava rezultatov.....	75
<b>9</b>	<b>PREDNOSTI IN SLABOSTI HLADNE RECIKLAŽE Z ELEKTROFILTRSKIM PEPELOM .....</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>78</b>
<b>VIRI .....</b>		<b>79</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Stanje slovenskih cest, ki jih upravlja DRSC, po metodi MSI (DRSC, 2010).....	2
Preglednica 2: Okvirna sestava elektrofiltrskih pepelov (Bernard, 1997, str. 7) .....	37
Preglednica 3: Rezultati analize izcednih vod pri izluževanju pepela (Vedenik-Novak, 1995, str. 108) (Uradni list RS, št 35. 1996, str. 2961-2963) .....	38
Preglednica 4: Tehnične specifikacije reciklatorja WR 2500 S (Wirtgen, 2009, str. 1) .....	43
Preglednica 5: Skupno število prehodov NOO 100 kN v 20-letnem obdobju (2010-2030) (Bebar, 2012a, str. 6).....	49
Preglednica 6: Nova voziščna konstrukcija ceste (Bebar, 2012a, str. 7).....	52
Preglednica 7: Rezultati meritev vlage in gostote z izotopsko sondo na stabilizirani plasti (Bebar, 2012b, str. 4) .....	56
Preglednica 8: Rezultati meritev dinamičnega deformacijskega modula na stabilizirani plasti (Bebar, 2012b, str. 4) .....	57
Preglednica 9: Korelacije vrednosti nosilnosti za značilne materiale v podlagi (TSC 06.520:2009, 2009, str. 5) .....	58
Preglednica 10: Rezultati meritev vlage in gostote z izotopsko sondo na nevezani nosilni plasti (Bebar, 2012b, str. 5) .....	59
Preglednica 11: Rezultati meritev dinamičnega deformacijskega modula na nevezani nosilni plasti (Bebar, 2012b, str. 6).....	60
Preglednica 12: Zahtevane vrednosti deformacijskih modulov na nevezanih nosilnih plasteh (TSC 06.200:2003, 2003, str. 11) .....	60
Preglednica 13: Rezultati meritev statičnega deformacijskega modula na nevezani nosilni plasti (Bebar, 2012b, str. 6).....	61
Preglednica 14: Laboratorijske preiskave (Bebar, 2012b, str. 7) .....	62
Preglednica 15: Postavke in popis del.....	65
Preglednica 16: Izračun izpustov CO <sub>2</sub> pri transportu mehanizacije, potrebne pri reciklaži .....	68
Preglednica 17: Izračun izpustov CO <sub>2</sub> pri transportu mehanizacije, potrebne pri zamenjavi .....	68
Preglednica 18: Obratovalne ure, potrebne za izvedbo reciklaže.....	69
Preglednica 19: Obratovalne ure, potrebne za izvedbo zamenjave .....	70
Preglednica 20: Izpusti CO <sub>2</sub> pri transportu materiala za izvedbo reciklaže z deponijo Prtovč .....	71
Preglednica 21: Izpusti CO <sub>2</sub> pri transportu materiala za izvedbo reciklaže z deponijo v Bistrici .....	72
Preglednica 22: Izpusti CO <sub>2</sub> pri transportu materiala za izvedbo zamenjave z deponijo v Bistrici .....	73
Preglednica 23: Izpusti emisij CO <sub>2</sub> pri pripravi materiala za reciklažo .....	74
Preglednica 24: Izpusti emisij CO <sub>2</sub> pri pripravi materiala za zamenjavo.....	74
Preglednica 25: Izpusti demperjev in nakladalnikov pri pripravi materiala za postopek reciklaže .....	74
Preglednica 26: Izpusti demperjev in nakladalnikov pri pripravi materiala za postopek zamenjave....	75

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Tipičen prerez voziščne konstrukcije (Združenje asfalterjev slovenije, 2010, str. 9) .....	3
Slika 2: Primer ceste v slabem stanju .....	11
Slika 3: Preoblikovanja na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 52) .....	15
Slika 4: Razpoke na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 55) .....	16
Slika 5: Razgraditve na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 58) .....	17
Slika 6: Poškodbe površine na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 60) .....	18
Slika 7: Delitev vzdrževanja cest.....	22
Slika 8: Časovni prikaz različnih strategij sanacije ceste (Wirtgen, 2012, str. 28).....	23
Slika 9: Preplastitev (Wirtgen, 2012, str. 31) .....	25
Slika 10: Zamenjava (Wirtgen, 2012, str. 32) .....	26
Slika 11: In-place reciklaža (Wirtgen, 2012, str. 33).....	27
Slika 12: Uporaba asfaltnega granulata pri hladni reciklaži (Žmavc, 2010, str. 249) .....	28
Slika 13: In-plant reciklaža (Wirtgen, 2012, str. 33) .....	29
Slika 14: Zamenjava (Wirtgen, 2012, str. 35) .....	30
Slika 15: Reciklaža s penjenim bitumnom (Hevka, 2010, str. 531) .....	31
Slika 16: Kombinacija reciklaž (Wirtgen, 2012, str. 37).....	33
Slika 17: Deleži proizvodnje svetovne energije (Unite soltech, 2013).....	35
Slika 18: Termoelektrarna Šoštanj ( <a href="http://krajci.eu/slovenija/sostanj_termoelektrarna_tes/slo">http://krajci.eu/slovenija/sostanj_termoelektrarna_tes/slo</a> (27.3.2013)).....	36
Slika 19: Kemijska sestava pepela (Vedenik-Novak, 1995, str. 108).....	37
Slika 20: Rastros pepela v okolico (Bebar, 2013) .....	39
Slika 21: Reciklažni niz pri cementni stabilizaciji (Rotech, 2012, str. 3).....	40
Slika 22: Reciklažni niz pri cementni stabilizaciji, ko v reciklator dovajamo cementno pasto.....	41
Slika 23: Reciklažni niz pri izvedbi s penjenim bitumnom in predhodnim posipom cementa.....	41
Slika 24: Reciklažni niz pri izvedbi s penjenim bitumnom, kjer cement dodajamo v obliki cementne paste.....	41
Slika 25: Reciklator WR 2500 S (Wirtgen, 2012, str. 1) .....	42
Slika 26: Vrtenje glave v nasprotni smeri potovanja (Wirtgen, 2006, str. 20) .....	42
Slika 27: Prikaz slabega stanja ceste (Bebar, 2012a, str. 2) .....	45
Slika 28: Razkopi (Bebar, 2012a, str. 3).....	46
Slika 29: Poprečne vrednosti količnikov ekvivalentnosti materialov (TSC 06.520:2009, 2009, str. 8) .....	51
Slika 30: Ureditev poteka prometa (Bebar, 2013) .....	53
Slika 31: Kontrola količine posipa (Bebar, 2013) .....	54
Slika 32: Cisterna z vodo (Bebar, 2013).....	54
Slika 33: Tla po stabilizaciji (Bebar, 2013) .....	55



Slika 34: Prerez reciklirane voziščne konstrukcije.....	63
Slika 35: Prerez voziščne konstrukcije pri zamenjavi.....	64
Slika 36: Cenovna primerjava tehnologij.....	66
Slika 37: Primerjava transportov mehanizacije.....	69
Slika 38: Primerjava izpustov CO <sub>2</sub> nastalih pri obratovanju mehanizacije.....	70
Slika 39: Primerjava izpustov CO <sub>2</sub> pri transportu materiala .....	73
Slika 40: Primerjava izpustov pri pripravi novega materiala .....	75
Slika 41: Skupna količina izpustov v tonah CO <sub>2</sub> .....	76



## 1 UVOD

Sodobna družba vse bolj stremi k ohranjanju narave in zagotavljanju kvalitetnega bivalnega okolja za mlajše generacije. Eden izmed ukrepov, ki bo v prihodnosti znatno pripomogel k ohranjanju narave, je Uredba o zelenem javnem naročanju. Dokument določuje, da je pri javnih razpisih poleg najnižje cene ključnega pomena tudi vpliv na okolje. Glavni cilj tega je, da lahko okolju prijaznejše tehnologije konkurirajo ostalim in da je lahko kljub višji ceni izbrana okolju prijaznejša tehnologija.

Dotrajane voziščne konstrukcije, katere so nujno potrebne obnove in sanacije, so neizogibne v cestogradnji. Projektirana doba cestišč v Republiki Sloveniji znaša 20 let, vendar pa se na žalost v velikem številu primerov poškodbe pojavijo že veliko prej. Napake so lahko posledica projektiranja, vgrajevanja ali pa preslabe kvalitete vgrajenega materiala. Sanacije lahko izvedemo na različne načine, nedvomno pa postopki recikliranja materialov sodijo med okolju prijazne.

V diplomski nalogi je opisana tehnologija hladne reciklaže oziroma kemična stabilizacija tal z elektrofiltrskim pepelom.

V teoretičnem delu je predstavljena sestava, izpostavljenost in različne poškodbe voziščnih konstrukcij, povzete po literaturi Žmavca (2007). Odvisno od obsega poškodb lahko napake saniramo z rednim ali pa z gradbenim vzdrževanjem. Pri navedbi vzdrževanj sem izhajal iz Wirtgenovega priročnika o hladni reciklaži (2012) in ponovno iz literature Žmavca (2010). V sklepnem delu teorije pa so predstavljeni osnovni podatki o elektrofiltrskem pepelu in opis tehnologije.

V praktičnem delu naloge sem obravnaval sanacijo ceste, ki je bila izvedena v letu 2012. Celoten projekt je sicer obsegal sanacijo brežin in usadov, ki so bili posledica neurij leta 2007 v občini Železniki. V nalogi pa je obravnavan le odsek, kjer sem bil tudi sam prisoten na gradbišču. Na tem odseku je bila izvedena sanacija voziščne konstrukcije z uporabo hladne reciklaže. Tako kot v praksi, si tudi v nalogi sledijo analiza poročila predhodnih raziskav, izvedba gradnje in analiza zaključnega poročila zunanje kontrole. Predhodne raziskave in poročilo o zunanji kontroli sem pridobil od Inštituta za gradbene materiale – IGMAT d.d. Z ekonomsko in okoljevarstveno analizo, kjer sem primerjal stroške gradnje in izpuste CO<sub>2</sub> v ozračje, pa sem želel preveriti, ali je postopek hladne reciklaže z elektrofiltrskim pepelom res cenovno ugodnejši in okolju prijaznejši od postopka klasične zamenjave voziščne konstrukcije.

## 2 OBSTOJEČE IN PRIČAKOVANO STANJE SLOVENSКИH CEST

Konec leta 2011 je bilo v Sloveniji skupaj 39 044 kilometrov javnih cest (Statistični urad RS, 2012), katere se povezujejo v javno cestno omrežje. Za upravljanje avtocest je zadolžena družba DARS d.d., za ostale državne ceste pa Direkcija RS za ceste. Sestavni del omrežja so tudi občinske ceste, s katerimi upravljajo občine in javne poti, ki pa so v lasti drugih upravljalcev.

Vsako leto se izvaja ocena stanja vozniških površin po metodi švicarskega indeksa MSI. Po zadnjih ocenah je več kot polovica cest v slabem stanju, v dobrem oziroma zelo dobrem stanju pa je le nekaj več kot tretjina omrežja (Preglednica 1). Potrebno je omeniti, da je metoda po MSI subjektivna in je za objektivno oceno potrebno izvesti dodatne preiskave.

Preglednica 1: Stanje slovenskih cest, ki jih upravlja DRSC, po metodi MSI (DRSC, 2010)

Leto ocenjevanja	Zelo slabo in slabo	Zelo dobro in dobro
2003 do 2004	48,1 %	39,5 %
2005 do 2006	49,9 %	37,4 %
2007 do 2008	53,6 %	34,4 %
2008 do 2009	53,8 %	34,3 %
2009 do 2010	54,5 %	34,3 %

Iz preglednice 1 je razvidno, da se stanje slovenskih cest iz leta v leto slabša. Popravila cestne infrastrukture delimo na redna in investicijska (v nadaljevanju gradbena) vzdrževanja. Dosedanja sredstva namenjena vzdrževanju v prihodnosti ne bodo zadostovala za vsa potrebna popravila. Povečanje sredstev bo nujno potrebno, če bomo želeli zagotoviti prevoznost slovenskega cestnega omrežja (Direkcija RS za ceste, 2010).

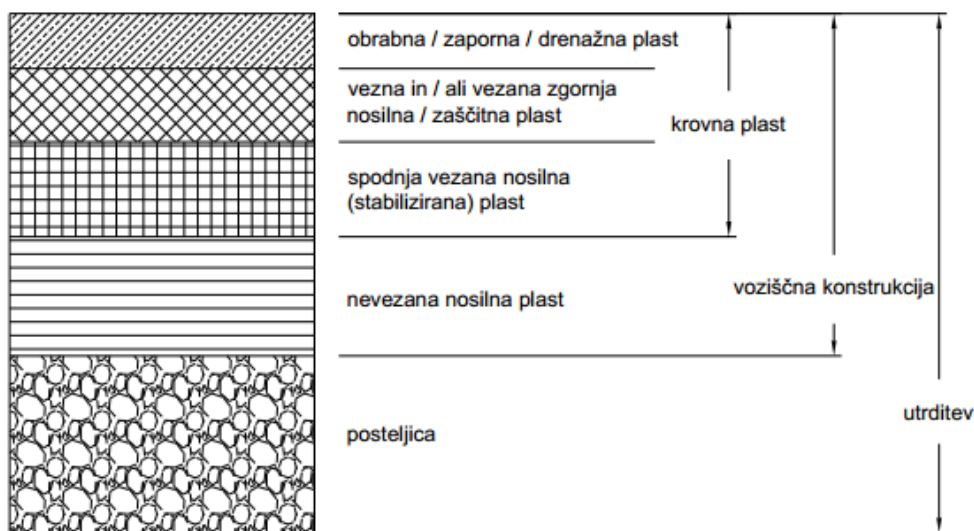
### 3 SESTAVA VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE

Skozi zgodovino so se v cestogradnji uveljavile štiri osnovne vrste vozišč: makadamska, tlakovana, asfaltna in cementnobetonska. Napredek v razvoju in povečanje prometa zahtevata kvalitetne in obstojne vozne površine, ki pa so hkrati grajene ekonomično in cenovno ugodno. Dandanes so makadamska in tlakovana vozišča načrtovana le v izjemnih primerih, saj imajo omejene pogoje uporabe. Primerna vozišča, katera zagotavljajo zadostno kvaliteto in trajnost, so asfaltna ali pa cementnobetonska.

Voziščno konstrukcijo sestavljajo različne plasti materialov, ki opravljajo točno določene naloge. Zunanja obtežba se prenaša preko zgornjih plasti na spodnje. Ker posamezna plast del obtežbe prevzame, del pa jo prenese na spodnjo plast, jakost obtežbe z globino pada. Da bi čim bolj izkoristili lastnost zmanjševanja obtežbe z globino, je voziščna konstrukcija sestavljena iz bolj nosilnih materialov zgoraj in iz manj nosilnih materialov spodaj – nosilnost z globino pada.

Tipična sestava voziščne konstrukcije (Slika 1):

- obrabne/zaporne plasti,
- vezne in / ali vezane nosilne plasti,
- nevezane nosilne plasti.



Slika 1: Tipičen prerez voziščne konstrukcije (Združenje asfalterjev slovenije, 2010, str. 9)

Pod voziščno konstrukcijo se nahaja dodatna plast, imenovana posteljica. Z njo se izpolni zahteva po enakomerni nosilnosti na temeljnih tleh v vkopu ali pa na planumu nasipa.

Vežano nosilno plast lahko sestavljata:

- zgornja vezana nosilna plast,
- spodnja vezana nosilna plast.

Zgornja vezana nosilna plast je zgrajena iz kakovostne vezane zmesi zrn, medtem ko je spodnja vezana nosilna plast zgrajena iz manj kakovostnih (stabiliziranih) zmesi.

Pri cementnobetonških mešanica in asfaltnih plasteh poznamo obrabnozaprno, vezano nosilno in vezno plast pod skupnim imenom krovna plast.

### 3.1 Posteljica

Posteljica je plast, na katero temeljimo voziščno konstrukcijo. Zagotavlja nam trajno in enakomerno nosilno podlago za plasti voziščne konstrukcije. Ena izmed glavnih nalog posteljice je tudi zaščita vgrajenih materialov pred škodljivimi učinki mraza.

Za izgradnjo posteljice po navadi uporabljamo kamnine ali pa nekatere vezljive zemljine. Vgrajeni materiali morajo zagotavljati prostorsko stabilnost in obstojnost v vodi. Omejitvi pri uporabi vezljivih zemljin sta meja židkosti in indeks plastičnosti, pri čemer mora biti meja židkosti manjša od  $w_1 < 35 \%$ , indeks plastičnosti pa  $I_p < 12 \%$ . Za kamnine pa so predpisani naslednji pogoji, kateri so predpisani z zrnastostjo:

- premer največjega zrna ne sme presegati 300 milimetrov oziroma ne sme presegati dve tretjini debeline plasti posteljice,
- količnik neenakomernosti oblikovanosti presežne krivulje U ne sme biti manjši od 8.

Pri kamnitih posteljicah je po navadi potrebna izravnalna plast, katera je že všteta v debelino posteljice. Z njo zagotovimo izravnavo konic.

Posteljico vgrajujemo na ustrezno pripravljen planum, kateri mora imeti urejeno odvodnjavanje. V primeru nevarnosti vtiska zemljine iz podlage v posteljico in posledično poslabšanje lastnosti je potrebno posteljico od temeljne podlage ločiti z ločilno plastjo. Praviloma znaša debelina posteljice do 50 centimetrov, zato lahko material razprostremo v eni sami plasti. Pri sami vgradnji pa je potrebno paziti, da vozila ne vozijo po planumu temeljnih tal. Za razprostiranje materiala se uporabljata greder in buldozer, na koncu pa vibracijski valjar poskrbi še za ustrezno zgostitev.

### 3.2 Nevezane nosilne plasti

Nevezana nosilna plast je najnižja plast voziščne konstrukcije. Glavni nalogi nevezane nosilne plasti sta zagotavljanje potrebne in trajne nosilnosti ter zaščita občutljivih materialov v podlagi pred škodljivimi učinki mraza. Trajno nosilnost zagotovimo z izbiro zmesi kamnitih zrn, ki je obstojna na mrazu in v vodi.

Sestava nevezanih nosilnih plasti mora ustrezati zahtevam predvidenih prometnih obremenitev. Pri predvidenih težjih obremenitvah izberemo čim bolj grobozrnata in skeletna zrna, ki so v celoti drobljena. Pri lažjih obremenitvah pa je struktura zmesi lahko drobnozrnata, zrna pa so lahko naravno oblikovana. Za nevezane nosilne plasti uporabljamo frakcije 0/22 mm, 0/32 mm in 0/45 mm.

Debelina plasti je omejena:

- minimalna debelina  $h_{\min}$  mora ustrezati pogoju  $h_{\min} \geq 2,5 D_{\max}$ , pri čemer je  $D_{\max}$  velikost največjih zrn v zmesi,
- največja gospodarna debelina plasti je 40 centimetrov, saj se pri večjih debelinah nosilnost plasti ne povečuje več. Po drugi strani pa se z večanjem debeline sorazmerno večja zaščita pred škodljivimi učinki mraza.

Pri vgradnji materiala za nevezane nosilne plasti je potrebno paziti, da zmes ne segregira. Material razprostiramo s finišerjem, v izjemnih primerih tudi z buldozerjem in grederjem, kjer pa je dostop s strojem onemogočen pa tudi ročno. Prav tako kot pri posteljici je pri razprostiranju materiala potrebno paziti, da ne vozimo po predhodno zgrajeni plasti. V primeru potrebe po dodatni vlažnosti na mestu vgrajevanja, je vodo potrebno dodajati z rošenjem, saj s tem preprečimo izpiranje drobnih delcev. Razprostreno zmes zgostimo z vibracijskimi valjarji. Pri zgoščevanju je potrebno paziti, da valjar prehaja od nižjega proti višjemu robu. Potrebna zgostitev plasti mora biti povprečno 98% glede na modificirano prostorninsko gostoto zmesi po Proctorju.

### 3.3 Vezane nosilne plasti

Vezane nosilne plasti ločimo na:

- spodnje vezane nosilne plasti/stabilizirane,
- zgornje vezane nosilne plasti.

### 3.3.1 Spodnje vezane nosilne plasti

Velikokrat se srečamo s težavo, ko zmes zrn ne vsebuje primernih deležev posameznih zrnivosti za namen uporabe. Z dodajanjem primerne veziva je mogoče v veliki meri odpraviti te pomanjkljivosti. »Stabiliziranje lahko torej ovrednotimo kot postopek, pri katerem želimo z izbrano vrsto in količino (določenega) veziva izboljšati določene pomanjkljive značilnosti razpoložljive lokalne zmesi kamnitih zrn.« (Žmavc, 2007, str. 101)

Zaradi dodatka veziva imenujemo te plasti tudi stabilizirane nosilne plasti. Glavne naloge spodnje vezane (stabilizirane) nosilne plasti so:

- plast mora prevzeti upogibnonatezne napetosti in posledično zagotoviti večji raznos prometnih obremenitev in delno premostitev lokalno slabših nosilnih mest,
- zmanjšati specifično obremenitev posameznih zrn v zmesi, saj se s povezavo zrn ustvarijo večje stične ploskve,
- omogočiti uporabo zmesi zrn, ki bi bila zaradi prvotne sestave (prekomeren delež drobnih zrn) neprimerna za nevezano nosilno plast.

Za stabilizacijo plasti lahko uporabljamo organska (bitumen) ali pa anorganska (cement) veziva.

Velikost zrn v mešanici posledično vpliva na količino veziva:

- za mešanice, katere vsebujejo večja zrna, je potrebno manj veziva,
- za mešanice, katere vsebujejo manjša zrna, je potrebno več veziva.

Manjša količina veziva je ugodnejša, saj je pri večji količini organskega veziva mešanica bolj izpostavljena preoblikovanju, pri večji količini anorganskega veziva pa lahko pride do prekomerne trdnosti in posledično se namesto lasastih razpok pojavijo širše razpoke.

Izvedba stabilizirane nosilne plasti mora vključevati tudi pravočasno predhodno sestavo in celovito preveritev zmesi. Preden plast vgradimo, je potrebno izvesti tudi poskusno vgrajevanje in vse potrebne preizkuse. Med samo vgradnjo je potrebno zagotoviti ustrezno zgostitev z vibracijskimi stroji in primerno vlažnost cementnobetonkih mešanic. Zgoščevanje poteka od roba proti sredini plasti in od najnižjega proti najvišjemu robu. Prehodi vibracijskih strojev se morajo medsebojno prekrivati, preprečiti pa je potrebno zadrževanje strojev na vgrajeni plasti.



### **3.3.2 Zgornje vezane nosilne plasti**

Zgornjo vezano nosilno plast po navadi vgrajujemo pri vseh prometnih obremenitvah. Nosilnost zgornje vezane plasti mora biti večja kot pri stabiliziranih nosilnih plasteh, zato pri zgornjih vezanih nosilnih plasteh uporabljamo kvalitetnejše zmesi.

Zgornje vezane nosilne plasti so izpostavljene:

- strižnim napetostim, katere so prav v območji zgornjih vezanih nosilnih plasti največje,
- upogibnonateznim napetostim,
- tlačnim obremenitvam, katere povzročajo vozila.

Za prevzem in raznos tlačnih obremenitev je pomembna čim večja površina naleganja zrn (gostota zmesi). Gostota zmesi tudi znatno pripomore pri oviranju prodiranja vode s površine vozišča v cestno telo.

Za zgornje vezane nosilne plasti po navadi uporabljamo bitumenizirane zmesi, katere proizvajamo po vročem postopku:

- bitumenizirani prodec,
- bitumenizireni prodec z dodatkom drobirja,
- bitumenizirani prodec z dodatkom drobljenca,
- bitumenizirani drobljenec.

Površina, na katero vgrajujemo zgornjo vezano nosilno plast, mora biti čista in predhodno enakomerno pobrizgana z vezivom (primer veziva: nestabilna kationska bitumenska emulzija). Pred začetkom vgrajevanja bitumenizirane zmesi mora biti vezivo ustrezno posušeno. Zmes razprostiramo s finišeřjem, kateri mora zagotoviti vsaj 85 % predzgostitve. Končno zgostitev pa dosežemo s prehodi vibracijskih valjarjev.

### **3.4 Asfaltna vezna plast**

Asfaltna vezna plast je zmes drobljenih kamnitih zrn vezana z bitumenskim vezivom. Vgrajujemo jo v krovne plasti in sicer se nahaja pod obrabno plastjo v voziščnih konstrukcijah za zelo težko in izredno težko prometno obremenitev.

### 3.5 Obrabne in zaporne plasti

Glavna naloga obrabnih in zapornih plasti je zagotavljanje odpornosti vozne površine proti obrabi in zaščita celotnega cestnega telesa pred vdorom vode.

Glede na namen uporabe obrabne plasti razvrščamo na:

- nevezane obrabne plasti,
- vezane obrabne plasti,
- tlakovane obrabne plasti.

#### 3.5.1 Nevezane obrabne plasti

Uporabljamo jih v primerih, ko na voziščno konstrukcijo deluje zelo lahka prometna obremenitev in kadar želimo začasno utrditi vozno površino.

Dodatne naloge nevezanih obrabnih plasti so:

- prevzem tlačnih obremenitev prometa,
- raznos prometnih obremenitev,
- ublažitev učinkov mraza v drugih plasteh voziščne konstrukcije in temeljnih tleh.

Zmes kamnitih zrn za nevezane obrabne plasti morajo sestavljati odporne, grobozrnate, skeletne osnovne frakcije: 0/22 mm, 0/32 mm, ali 0/45 mm. Da bi na površini ustvarili čim bolj zaklinjeno zmes, uporabimo frakcijo za zaklinjanje 0/8 mm.

Izvedba vgrajevanja grobozrnatih, skeletnih frakcij je enaka izvedbi nevezanih nosilnih plasti opisane v poglavju 3.2. Na vgrajeno skeletno zmes je potrebno razprostreti še zmes za zaklinjenje. Ta zmes služi kot popolna zapolnitev votlin in delno prekritje. Z rošenjem dodajamo vodo, potrebno za vplaknitev zmesi za zaklinjenje v površino skeletne zmesi. Za zgostitev nevezane obrabne plasti uporabljamo lažje statične valjarje.

### **3.5.2 Vezane obrabne in zaporne plasti**

Za vrhnje plasti voziščne konstrukcije se v cestogradnji uporabljajo:

- obrabnozaporne plasti,
- obrabne plasti,
- zaporne plasti.

Obrabnozaporne in obrabne plasti vedno vgrajujemo kor vrhnje plasti, zaporne plasti pa se ponavadi nahajajo pod obrabnimi plastmi.

Glavne naloge teh plasti so:

- prevzem horizontalnih in radialnih sil, katere se pojavijo med vozilom in voziščno konstrukcijo in so v tam največje,
- zagotavljanje primerne torne sposobnosti in ravnosti vozne površine, kateri sta ključni za varno in udobno vožnjo,
- zaščita cestnega telesa pred padavinami in drugimi vplivi.

Vezane obrabne in zaporne plasti med seboj ločimo glede na uporabljene materiale:

- asfaltne plasti,
- cementnobetonske plasti,
- tlakovane plasti.

#### **3.5.2.1 Asfaltne obrabne in zaporne plasti**

V primerjavi z ostalima vrstama vezanih obrabnih in zapornih plasti, se v cestogradnji največkrat uporablja asfaltne plasti.

Bitumenizirane zmesi nam zagotavljajo lastnosti, katere mora imeti vezana obrabna in zaporna plast.

Primeri bitumeniziranih zmesi:

- bitumenski beton,
- drobir z bitumenskim mastiksom,
- diskontinuirani bitumenski beton,
- hrapavi liti asfalt,
- drenažni asfalt,
- obdelava površin s tankoplastnimi in površinskimi prevlekami.

Tipičen primer za obrabno plast je drenažni asfalt, za zaporno plast pa liti asfalt.

### 3.5.2.2 Cementnobetonke krovne plasti

V primerjavi z asfaltnimi plastmi so cementnobetonke krovne plasti zelo toge in zato obremenitve prevzemajo z upogibnonatezno trdnostjo.

Primerjava cementnobetonkih in asfaltnih plasti:

- pri cementnobetonkih plasteh je raznos obremenitev boljši, kar dopušča slabše nosilno podlago,
- cementnobetonka krovna plast se zaradi vpliva prometa in temperatur ne preoblikuje,
- cementnobetonka plast zagotavlja večjo trajnost in posledično manjše vzdrževalne stroške,
- cementnobetonko krovno plast je potrebno zgraditi v celoti naenkrat,
- pri cementnobetonkih krovnih plasteh so popravila zahtevnejša.

Cementnobetonke krovne plasti so primerne na cestah:

- katere so izpostavljene velikim prometnim in osnim obremenitvam,
- na katere vplivata dolgotrajna vročina in mraz (velike temperaturne obremenitve),
- katere imajo velike vzdolžne nagibe vozišča,
- kjer poteka kanaliziran in usmerjan promet.

### 3.5.2.3 Tlakovane obrabne plasti

Tlakovane obrabne plasti so lahko nevezane ali pa vezane. Vrsta je odvisna od materiala, uporabljenega za zapolnitev rež.

Materiali, ki se uporabljajo za zapolnitev rež, so:

- nevezana zmes kamnitih zrn,
- bitumenska zalivna zmes oziroma cementna malta.

V preteklosti se je tlakovanje uporabljalo pri vozni površinah, danes pa ga uporabljamo večinoma za ureditev okolja. Za tlakovanje uporabljamo tlakovce iz naravnega kamna ali pa tlakovce iz cementnega betona, klinkerja in žindre.

#### 4 IZPOSTAVLJENOST IN POŠKODBE NA VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJAH

Že takoj po izgradnji je cesta izpostavljena različnim vplivom. Nanjo že od samega začetka delujejo podnebni vplivi, takoj zatem, ko na cesto spustimo promet, pa je obremenjena še s prometnimi obremenitvami. Vsi ti vplivi sčasoma povzročajo spreminjanje lastnosti vgrajenih materialov, kar pa posledično vpliva na varnost vožnje in manjšo nosilnost cestnega telesa.

Da bi zagotovili čim večjo trajnost ceste in se v večji meri izognili poškodbam (Slika 2), je za gradnjo potrebno uporabiti kakovostne materiale in paziti na pravilno izvedbo voziščne konstrukcije. Vemo pa, da se bodo slej ko prej na vsaki cesti pojavile poškodbe. Te napake je potrebno čim prej identificirati in jih ustrezno sanirati. Postopek popravila cest imenujemo vzdrževanje.



Slika 2: Primer ceste v slabem stanju

## **4.1 Vzroki za nastanek poškodb**

Poleg že omenjenih podnebnih vplivov in prometnih obremenitev vplivajo na nastanek poškodb tudi drugi dejavniki. V nadaljevanju so vzroki poškodb razdeljeni glede na nastanek: vplivi narave in vplivi človeka. Pri razdelitvi je bila kot izhodiščna literatura uporabljena knjiga Vzdrževanje cest (2010).

### **4.1.1 Vpliv naravne**

#### **4.1.1.1 Podnebni vplivi**

Pod podnebne vplive uvrščamo vpliv padavin, vpliv temperatur in staranje bitumenskega veziva. Kritično stanje se pojavi, če ti vplivi nastopijo istočasno.

Voziščna konstrukcija je izpostavljena padavinam skozi vse leto – spomladi, poleti in jeseni dež, pozimi sneg. Zaradi prekomerne prepustnosti ali pa razpok lahko voda pronica in doseže občutljive materiale, kar pa vpliva na zmanjšanje nosilnosti. Kombinacija vode in nizkih temperatur vpliva na zmanjšano mehansko odpornost kamnitih zrn in adhezivne lastnosti bitumenskih veziv ter cementov. Vpliv mejnih vrednosti temperatur (visoke in nizke) se izraža v nastanku prekomernih napetosti. Zaradi tega lahko pride do poškodb na voziščni konstrukciji. Trda in elastična kamnita zrna ter cement sta manj občutljiva na mejne temperature kot bitumenizirane zmesi. Pri visokih temperaturah je bitumenizirana zmes podvržena plastičnemu preoblikovanju. Rezultat preoblikovanja so kolesnice, valovi in grbine. Nizke temperature pa lahko povzročijo, da natezne napetosti presežejo natezne trdnosti v bitumenizirani zmesi, kar povzroči nastanek razpok, krušenja in luščenja. Pojem staranje bitumenskega veziva zajema časovno spreminjanje mehanskih in kemičnih lastnosti ter sestavo vgrajenih bitumenskih veziv.

#### **4.1.1.2 Voda**

Prekomerna količina vode v podlagi lahko znatno zmanjša nosilnost. Kombinacija nizkih temperatur in prekomerne količine vode lahko še dodatno povzroči škodljive spremembe vozne površine (primer: zmrzlinški dvigi, razpoke obrabne plasti). Najbolj kritično obdobje se pojavi v času odjuge. Voda začne odmrzovati od zgoraj navzdol. Zaradi spodnjih zamrznjenih plasti odtajana voda ne more odteči in se zaradi tega zmanjša nosilnost. Zaradi zmanjšanja nosilnosti se pod vplivom prometnih obremenitev začnejo formirati kolesnice. Padavinska voda se zbira v kolesnicah, od koder prodira v spodnje, občutljivejše plasti. Na tem območju nastane nevarnost lokalne porušitve.

## **4.1.2 Vpliv človeka**

### **4.1.2.1 Prometne obremenitve**

Vozila obremenjujejo voziščne konstrukcije z navpičnimi statičnimi in dinamičnimi silami, katere povzročajo tlačne in upogibnonatezne ter strižne napetosti. Obrabne plasti so zaradi motornih vozil izpostavljene vzdolžnim in prečnim ter sesalnim silam prometa. Pod dolgotrajno obremenitvijo se začne material utrujati, kar vpliva na povečanje škodljivih sprememb.

Prevelike prometne obremenitve (osne obremenitve tovornih vozil), kanaliziran promet in nenačrtovano povečanje težkih tovornih vozil so glavni vzroki za spremembe vozne površine. Poleg naštetih vzrokov pa pomembno vlogo igrajo tudi morebitne neravnine, saj zaradi njih nastanejo dodatne dinamične obremenitve.

Na asfaltnih krovnih plasteh je vpliv prometnih obremenitev večji kot na cementnobetonskih.

### **4.1.2.2 Pomanjkljivo načrtovanje**

Načrtovanje je verjetno ena izmed najpomembnejših faz gradnje cestnega telesa. Če ta faza ni strokovno izvedena, potem lahko pride do odstopanja med projektiranimi in dejanskimi vrednostmi. V tem primeru niti dobra izvedba in vzdrževanje ne moreta preprečiti poškodb.

Pri načrtovanju je potrebno paziti in upoštevati:

- predvideno prometno obremenitev,
- nosilnost podlage,
- lastnosti uporabljenih materialov,
- temperature in hidrološke pogoje.

### **4.1.2.3 Pomanjkljiva izvedba**

V okviru pomanjkljive izvedbe ločimo napake pri vgrajevanju materialov in nepopolno oziroma slabo izvedeno odvodnjavanje.

Za vgrajevanje je potrebno uporabiti primerne in kvalitetne materiale. Pri sanaciji ceste pa je potrebno paziti, da so neprimerni materiali v celoti odstranjeni in zamenjani.

Voda, ki zastaja, negativno vpliva na obstojnost cestnega telesa in predstavlja nevarnost za udeležence v prometu. Zastajajoči vodi se lahko izognemo z ustreznimi nagibi in bankinami. Kjer pa so vgrajeni materiali, ki so občutljivi na učinek mraza, je potrebna dodatna zaščita proti kapilarnemu dvigu in dvigu talne vode. V izogib škodljivim spremembam zaradi vpliva vode je potrebno čim prej izvesti načrtovane ukrepe odvodnjavanja.

#### **4.1.2.4 Pomanjkljivo vzdrževanje**

Pod vzdrževanje uvrščamo popravila nastalih poškodb na vozišču. Ključnega pomena so klasifikacija poškodb, pravočasna in pravilna izvedba popravila. Glavna posledica slabega vzdrževanja je neurejeno odvodnjavanje. Voda lahko zastaja na vozišču zaradi previsokih bankin ali pa zaradi prekomernih stopenj. Zastajanje vode v neočiščenih odvodnih jarkih in jaških pa ima negativni vpliv na nosilnost cestnega telesa.

Pozimi pa se srečujemo s težavami zaradi prekomerne uporabe kemičnih materialov (natrijev in kalcijev klorid), s katerimi želimo zagotoviti kopno vozišče. Zaradi vpliva soli se bitumenskemu vezivu v obrabni plasti slabšajo reološke lastnosti (predvsem zmanjšanje plastičnosti). Solnica prodira v razpoke v obrabni plasti. Ko pride do sušenja, se zaradi kristalizacije soli formirajo velike mehanske obremenitve, katere povzročijo povečanje razpok.

#### **4.1.2.5 Neprimerna uporaba**

Neprimerna uporaba cest ima škodljive vplive. Pod neprimerno uporabo štejemo vozila, katera imajo pozimi na kopnem vozišču pritrjene verige ali pnevmatike z bodicami. Vozila, katera imajo obroče brez pnevmatik ali kovinska kolesa, prav tako poškodujejo vozišče. Gradbeni stroji morajo imeti zaščitene gosenice, sicer tudi oni lahko poškodujejo cesto. Na kvaliteto asfaltne obrabne plasti znatno vplivajo tudi razlitja nevarnih tekočin, kot so nafta in topila. Zadnji primer neprimerne uporabe, s katerim se najpogosteje srečujemo v Sloveniji, pa je prekomerna osna obremenitev motornih vozil.

## **4.2 Vrste poškodb**

### **4.2.1 Asfaltna vozišča**

Poškodbe na asfaltnih voziščih lahko razvrstimo v skupine, ki temeljijo na podlagi oblike poškodb:

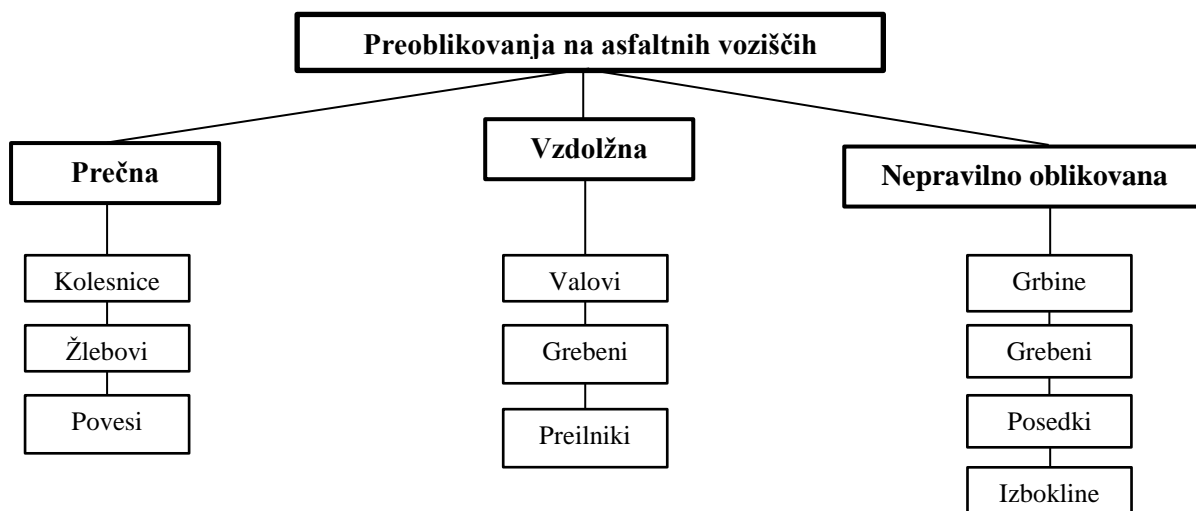
- preoblikovanja,
- razpoke,
- razgraditve,
- poškodbe površin.



#### 4.2.1.1 Preoblikovanja

Ko so tlačne in strižne trdnosti prekoračene, pride do plastičnega preoblikovanja bitumeniziranih zmesi. Vsako preoblikovanje zmanjša udobnost in varnost vožnje, povečajo se obremenitve in poveča se vpliv utrujanja, kar pa negativno vpliva na trajnost voziščne konstrukcije. Preoblikovanje vozišča zmanjšuje tudi sposobnost odvodnjavanja in otežuje vzdrževanje (pluženje) in vodenje vozil.

Na sliki 3 so razvrščena preoblikovanja na osnovi oblike.

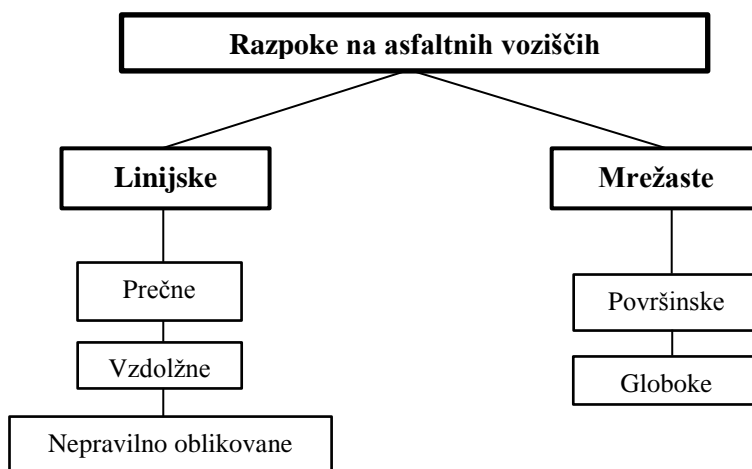


Slika 3: Preoblikovanja na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 52)

#### 4.2.1.2 Razpoke

Razpoke nastanejo, ko so v materialu prekoračene natezne trdnosti. Na podlagi širine razpok ločimo lasaste (do 1 milimeter), ozke (od 1 do 5 milimetrov), široke (od 5 do 25 milimetrov) in zelo široke oziroma zevajoče (širše od 25 milimetrov). Površinske razpoke v večini primerov ne vplivajo na trajnost in uporabnost vozišča. Če pa voda prodira skozi razpoke v občutljive materiale ali pa zmrzne v predelu razpok, lahko bistveno vpliva na trajnost voziščne konstrukcije.

Na sliki 4 je prikazana razvrstitev razpok na osnovi oblike.

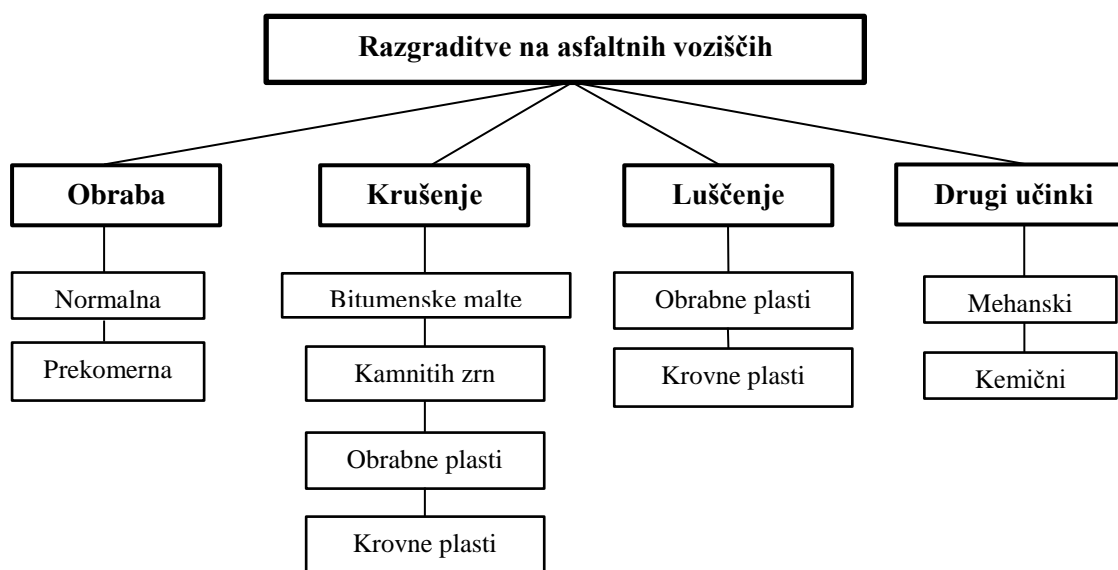


Slika 4: Razpoke na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 55)

### 4.2.1.3 Razgraditve

Razgradnja obrabnih plasti voziščnih konstrukcij je posledica prekoračitve sil (vezanja) lepljivosti uporabljenega bitumenskega veziva. Poleg bitumenskega veziva ima pomemben vpliv na razgraditev tudi kakovost ostalih uporabljenih materialov. Razgraditve po navadi negativno vplivajo le na udobnost vožnje. V izjemnih primerih, ko začnejo nastajati udarne jame, pa imajo razgraditve močan vpliv tudi na varnost vožnje in trajnost voziščne konstrukcije.

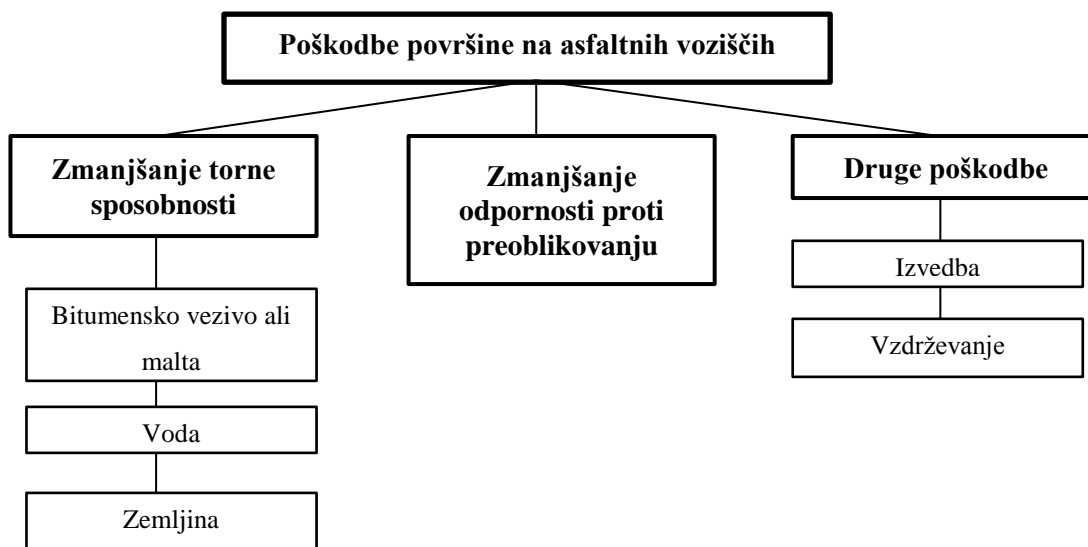
Vrste razgraditev asfaltnih krovnih plasti so prikazane na sliki 5.



Slika 5: Razgraditve na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 58)

#### 4.2.1.4 Poškodbe površine

Poškodbe vozni površin so lahko samočasne, vendar se zaradi tega njihov pomen ne spremeni. Poškodbe površine se po navadi pojavljajo skupaj še z drugimi nepravilnostmi na voziščni konstrukciji (npr. s preoblikovanjem). Opredelitev poškodb površine izhaja iz vpliva na uporabnost (slika 6).



Slika 6: Poškodbe površine na asfaltnih voziščih (Žmavc, 2010, str. 60)

## **4.2.2 Cementnobetonska vozišča**

Glavna razlika med cementnobetonskimi in asfaltnimi vozišči je v tem, da se pri cementnobetonskih voziščih pod normalnimi obremenitvami struktura materiala praktično ne spreminja. Poškodbe na cementnobetonskih voziščih lahko razvrstimo v skupine, ki temeljijo na podlagi oblike poškodb:

- razpoke,
- odlomi,
- poškodbe površin,
- razmiki in stopnje.

### **4.2.2.1 Razpoke, rege, stiki**

Razpoke so značilna oblika poškodbe cementnobetonskega vozišča. Glavni vzrok za nastanek razpok je prekoračitev upogibnonateznih trdnosti. Po obliki razpoke delimo na vzdolžne, prečne in mrežaste. Med poškodbe cementnobetonskih krovnih plasti uvrščamo tudi pomanjkljivo obdelane in zapolnjene rege, stike med ploščami in stik plošče z objektom.

### **4.2.2.2 Odlomi vogalov, poškodbe robov**

Kadar imamo premajhno površino prereza cementnobetonske plošče za prevzem prometnih obremenitev, podlaga pod njo pa je premalo nosilna, pride do prekoračitve upogibnonateznih napetosti. Posledica prekoračitve so odlomi vogalov. Zanimarjeno vzdrževanje, premiki plošč in pomanjkljiva izdelava stikov ter reg pa so vzroki za nastanek poškodb na robovih.

### **4.2.2.3 Poškodbe površine**

Poškodbe površine na cementnobetonskih vozniških površinah nastanejo zaradi pomanjkljivih lastnosti oziroma neustreznega cementnega betona (premajhna trdnost, neprimerna zmes kamnitih zrn, neprimerna sestava mešanice, pomanjkljiv sistem zračnih por, pomanjkljiva izvedba in nega) in zaradi izrednih temperaturnih (požar) in mehanskih obremenitev.

### **4.2.2.4 Razmiki in stopnje**

Razmiki in vertikalne stopnje plošč nastanejo zaradi pomanjkljive povezave plošč in zaradi sprememb podlage (neenakomerno preoblikovanje, erozija in porušitev).

### **4.2.3 Tlakovana vozišča**

Poškodbe na tlakovanih vozniških površinah nastanejo predvsem zaradi pomanjkljivih ureditev reg med tlakovci, preobremenitev tlakovanih plasti in zaradi nestabilne podlage.

## **5 POPRAVILA POŠKODB – VZDRŽEVANJE**

Kot je bilo že omenjeno v prejšnjem poglavju, so ceste takoj, ko so zgrajene, izpostavljene podnebnim in prometnim obremenitvam. Te obremenitve s svojim stalnim vplivom povzročajo poškodbe na krovnih plasteh in pogojujejo spremembe strukture v materialih, imenovane utrujanje.

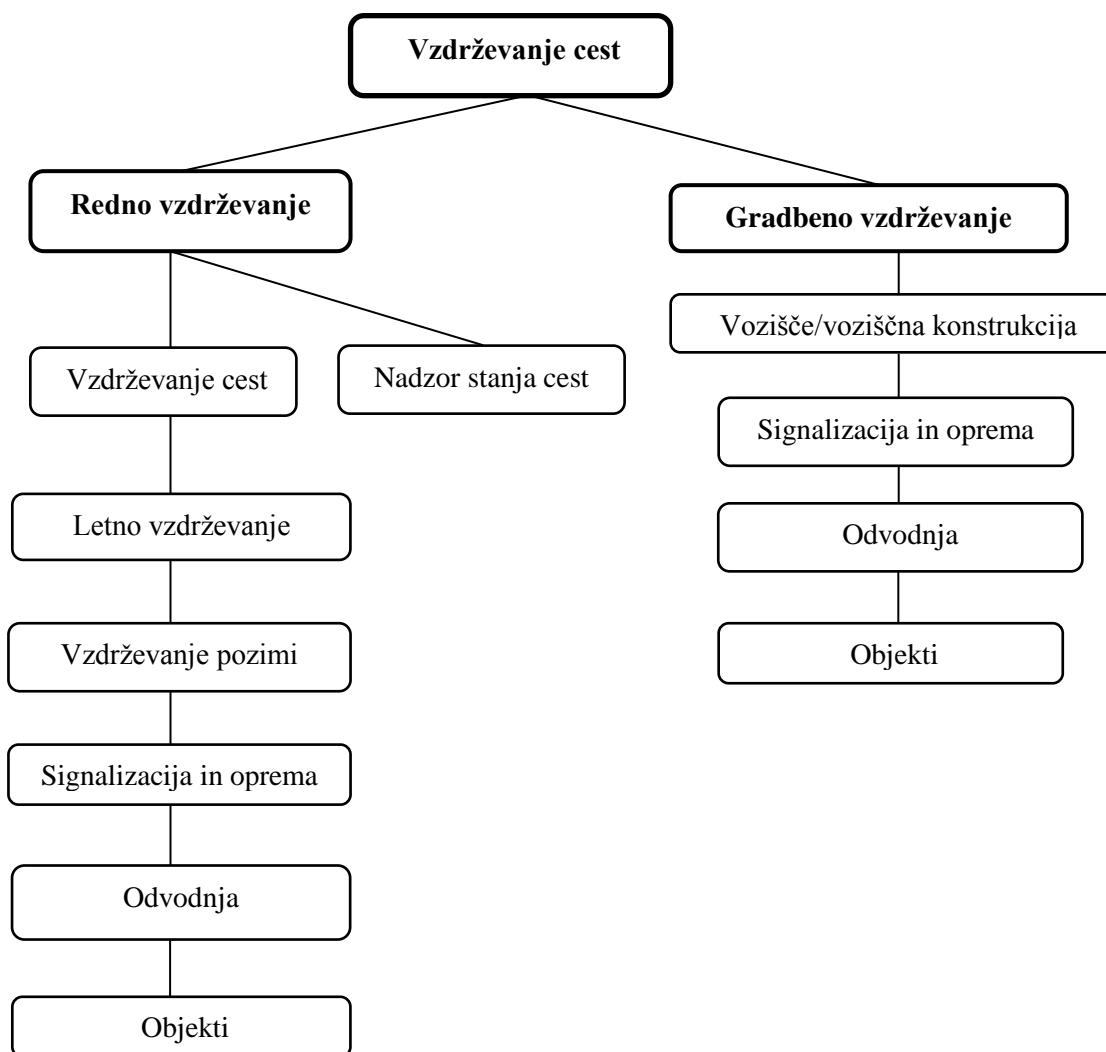
Ceste morajo uporabnikom zagotavljati varno, udobno in gospodarno uporabo. Za zagotavljanje omenjenih zahtev mora imeti vozna površina naslednje lastnosti: ravnost, torno sposobnost in nosilnost. Ohranjanje teh lastnosti je mogoče le s pravočasnim izvajanjem vzdrževanja cest.

Vzdrževanje v osnovi delimo na redno in gradbeno vzdrževanje. Glavna razlika med njima je v obsegu in zahtevnosti del ter finančni investiciji popravila.

Redno vzdrževanje obsega opravljanje kratkotrajnih in rutinskih del. Glavni namen rednega vzdrževanja je ohranjanje ceste v takem stanju, da zagotavlja vse pogoje varne, udobne in gospodarne rabe.

Gradbeno vzdrževanje pa je vrsta vzdrževanja, katera zajema obsežnejša in bolj kompleksna dela. Z gradbenim vzdrževanjem želimo trajnejše sanirati poškodbe in ostale nepravilnosti, kot bi to naredili z ukrepi rednega vzdrževanja.

Obe vrsti vzdrževanj sta razvejani in obsegata različna področja (slika 7).



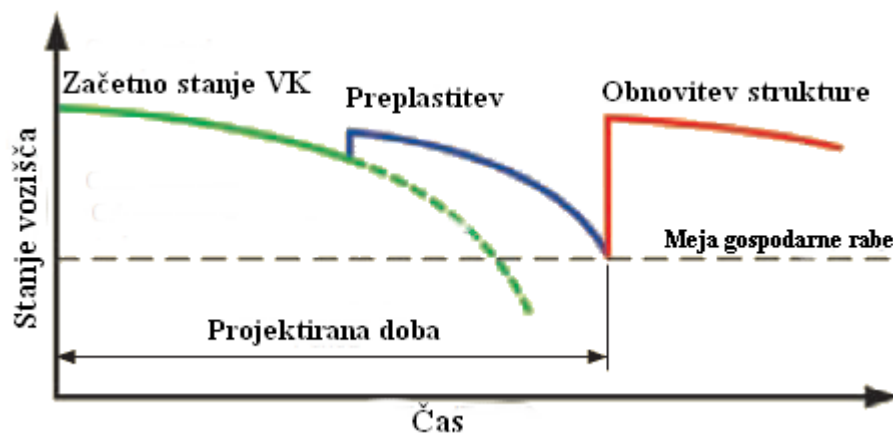
Slika 7: Delitev vzdrževanja cest

V nadaljevanju se bom osredotočil na dela, ki so omejena na popravila in vzdrževanje asfaltnih vozišč. Omenjena dela spadajo pod letna vzdrževanja v sklopu rednih in pod vozišče/voziščna konstrukcija v sklopu gradbenih vzdrževanj.

Ugotavljanje napak v zgodnjih fazah nastanka je ključnega pomena pri izvajanju vzdrževanja. Majhne nepravilnosti lahko z rednim vzdrževanjem saniramo z minimalnimi finančnimi sredstvi. Če pa napak in poškodb ne saniramo pravočasno, se le-te povečujejo. Slaba vozna površina zaradi dodatnih dinamičnih obremenitev (preoblikovanja in deformacije) še dodatno pripomore k slabšanju stanja ceste. Znano je, slabše je stanje ceste, večji obseg sanacijskih del je potreben, dražje je popravilo.



Graf (slika 8) prikazuje stanje vozišča pri različnih postopkih popravil.



Slika 8: Časovni prikaz različnih strategij sanacije ceste (Wirtgen, 2012, str. 28)

## 5.1 Redno vzdrževanje

Pod redna vzdrževanja uvrščamo začasna, manjša opravila, ki izboljšujejo uporabnost vozne površine. Obsežnejša in trajnejša popravila pa uvrščamo pod gradbena vzdrževanja, ki so podrobneje opisana v nadaljevanju diplomske naloge.

### 5.1.1 Preoblikovanja

Popravila, s katerimi saniramo različna preoblikovanja, so izravnava grebenov, grbin in dvigov ceste z odrezkanjem. Pod redna vzdrževanja spadajo tudi izravnave kolesnic in posedkov, katere zapolnimo z ustreznim materialom.

### **5.1.2 Razpoke**

Razpoke morajo biti ustrezno obdelane, preden jih lahko zapolnimo. Za obdelavo ločimo postopek s stisnjenim vročim zrakom in postopek z rezkanjem.

Postopek s stisnjenim vročim zrakom se uporablja pri razpokah širokih do 40 milimetrov. Z vročim zrakom odstranimo krhki, oksidiran bitumen. Tako pripravljeno razpoko nato zalijemo z ustrezno bitumensko zalivno zmesjo in posujemo z drobljenim grobim peskom. Vrhnji del zahteva dodatno tesnitev s približno 100 milimetrov široko plastjo bitumenske zalivne zmesi prav tako posuto s peskom.

Za trajnejšo sanacijo razpok, pa je potrebno razpoke razširiti z rezkalnikom. Tudi pri tem postopku je potrebno odstraniti krhki in oksidiran bitumen. Po rezkanju je potrebno razpoko očistiti z motorno jekleno krtačo in izpihanjem. Preden razpoko zalijemo z ustrezno bitumensko zmesjo, je treba stene razpoke predhodno pobrizgati s premazom.

### **5.1.3 Razgraditve**

Z ukrepi rednega vzdrževanja saniramo poškodbe, ki nastanejo zaradi mehanske obrabe in kemijskega učinka na obrabno plast, udarne jame in odkrušene robove vozišč. Večja popravila, kot sta na primer preplastitev in ojačitev, uvrščamo med gradbena vzdrževanja. Potrebno je omeniti, da postopka izvedbe površinske oziroma tankoplastne prevleke spadata pod redna in gradbena vzdrževalna dela hkrati. Ločimo ju le po obsegu del.

### **5.1.4 Poškodbe površine**

Pod redna vzdrževanja spadajo kratkotrajni postopki, s katerimi povečamo torne sposobnost zglajenih vozniških površin. Najpogosteje uporabljeni postopki za povečanje torne sposobnosti so: rezkanje vrhnjega dela asfaltne obrabne plasti, obdelava obrabne plasti z curkom vode in vtisnjenje drobirja v površino obrabnih plasti, ki je obogatena z bitumensko malto.

## **5.2 Gradbeno vzdrževanje**

V okviru gradbena vzdrževanja lahko popravila razdelimo na:

- popravila obrabne oziroma celotne krovne plasti – preplastitev in ojačitev,
- popravila globljih plasti – obnovitev voziščne konstrukcije.

## 5.2.1 Popravila krovnih plasti

Popravila omejena na krovno plast so izvedena, kadar vozna površina ne zagotavlja ustrezne varnosti udobnosti in gospodarnosti uporabe. S temi ukrepi podaljšujemo trajnost in življenjsko dobo cest. Pri popravilu krovnih plasti ločimo dva sklopa ukrepov: preplastitev in ojačitev.

Za preplastitev se odločimo, kadar torna sposobnost in ravnost ceste nista v okviru predpisanih vrednosti. Preplastitev je potrebno dimenzionirati tako, da je sposobna prevzeti predvidene prometne obremenitve vsaj 15 do 20 let.

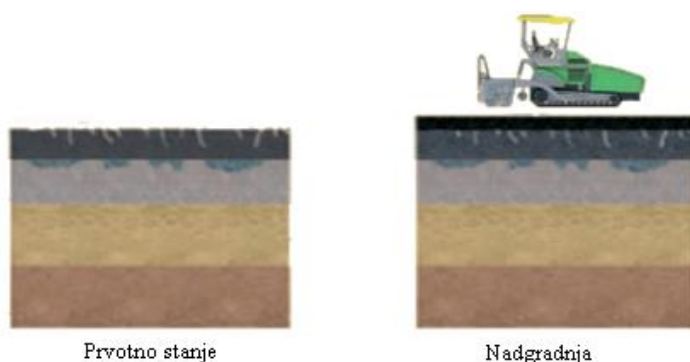
V primeru, ko pa nosilnost vozne površine pade do kritičnih vrednosti, je potrebno preprečiti nadaljne utrujanje in širjenje poškodb v notranjost cestnega telesa. To izvedemo z ojačitvijo krovne plasti. Pri tem je potrebno preveriti, ali je podlaga sposobna prevzeti predvidene prometne obremenitve.

Po priročniku za hladno reciklažo, katerega je izdalo podjetje Wirtgen (2012), lahko popravila krovnih plasti razdelimo na tri osnovne postopke:

- nadgradnja,
- zamenjava,
- reciklaža.

### 5.2.1.1 Nadgradnja

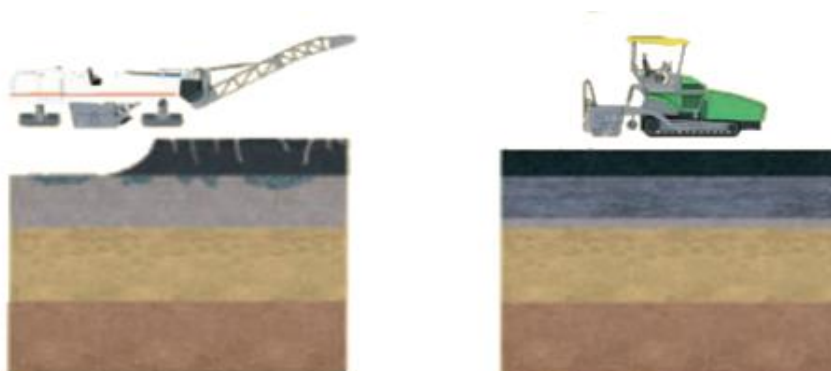
Postopek nadgradnje je najenostavnejša rešitev pri pojavu napak na krovni plasti (Slika 9). Izvedba omenjenega postopka je časovno hitra in ima majhen vpliv na udeležence v prometu. V to skupino spadata izvedba površinskih prevlek in klasične nadgradnje z novo plastjo. S površinskimi prevlekami po navadi ne moremo izboljšati ravnosti in nosilnosti voziščne konstrukcije, prav tako pa se poškodbe prvotne plasti pojavijo v razmeroma hitrem času tudi na novozgrajeni plasti. Zato je potrebno napake obstoječe krovne plasti odpraviti še preden začnemo z delom. V to skupino del spadajo tudi predhodna enostavna lokalna popravila – krpanja. Prekomerno število preplastitev lahko vodi k problemu odtekanja vode in previsoki koti nivelete ceste (Wirtgen, 2012).



Slika 9: Preplastitev (Wirtgen, 2012, str. 31)

### 5.2.1.2 Zamenjava

Ko pa se odločimo za postopek, kjer poškodovano plast v celoti odstranimo, govorimo o zamenjavi plasti. Odstranjen del nadomestimo z novo asfaltno plastjo (Slika 10). Nova plast asfalta pa ni vedno potrebna, saj lahko ena od spodnjih plasti postane nova obrabna plast. Kadar se odločimo za takšen poseg, je nujno potrebno preveriti, kakšno prometno obremenitev je sposobna prevzeti oslABLJENA voziščna konstrukcija. Pri postopku zamenjave nam vedno ostane odstranjena bitumenizirana zmes, katero lahko vgradimo po postopku reciklaže. Ponovno jo lahko vgradimo kot vezano ali kot nevezano nosilno plast voziščne konstrukcije (Wirtgen, 2012).



Slika 10: Zamenjava (Wirtgen, 2012, str. 32)

### 5.2.1.3 Reciklaža

Reciklaža je ponovna uporaba in vgradnja materialov, ki zaradi poslabšanih lastnosti niso več sposobni opravljati nalog in prevzemati obremenitev. Z dodatki in ustrezno tehnologijo jim izboljšamo potrebne lastnosti. Pri reciklaži se lahko odločimo za vroč ali pa hladen postopek reciklaže. Pri popravilu krovnih plasti odrežkamo relativno tanko plast (100 do 150 milimetrov) asfalta, katero lahko ponovno vgradimo (Slika 11).

Pri vročem postopku poškodovan asfalt rahljamo z noži ob predhodnem segrevanju. Pri tem lahko dodamo nove materiale v obstoječo bitumenizirano zmes (kamnita zrna, vezivo...). Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.800:2001 (2001) deli reciklažo po vročem postopku na:

- oblikovanje brez dodane bitumenizirane zmesi (reshape)

Z reshape postopkom saniramo izbokline in grbine, katere je potrebno odrezkati in izravnati v predviden profil vozišča. Morebiten presežek zmesi mora biti čim manjši, saj le-ta pogojuje oslABLJENJE konstrukcije.

- oblikovanje z dodano bitumenizirano zmesjo (repave)

S postopkom repave izboljšamo torno sposobnost ceste. Tanko dodatno plast bitumenizirane zmesi razprostremo na obstoječo krovno plast.

- oblikovanje z dodano bitumenizirano zmesjo in mešanjem (remix)

V obstoječo bitumenizirano zmes vmešamo novo bitumenizirano zmes. S tem postopkom izboljšamo lastnosti asfaltnih plasti (ravnost, torna sposobnost).

- oblikovanje z dodatno bitumenizirano zmesjo in mešanjem ter hkratno nadgraditvijo z dodatno plastjo (remix-plus)

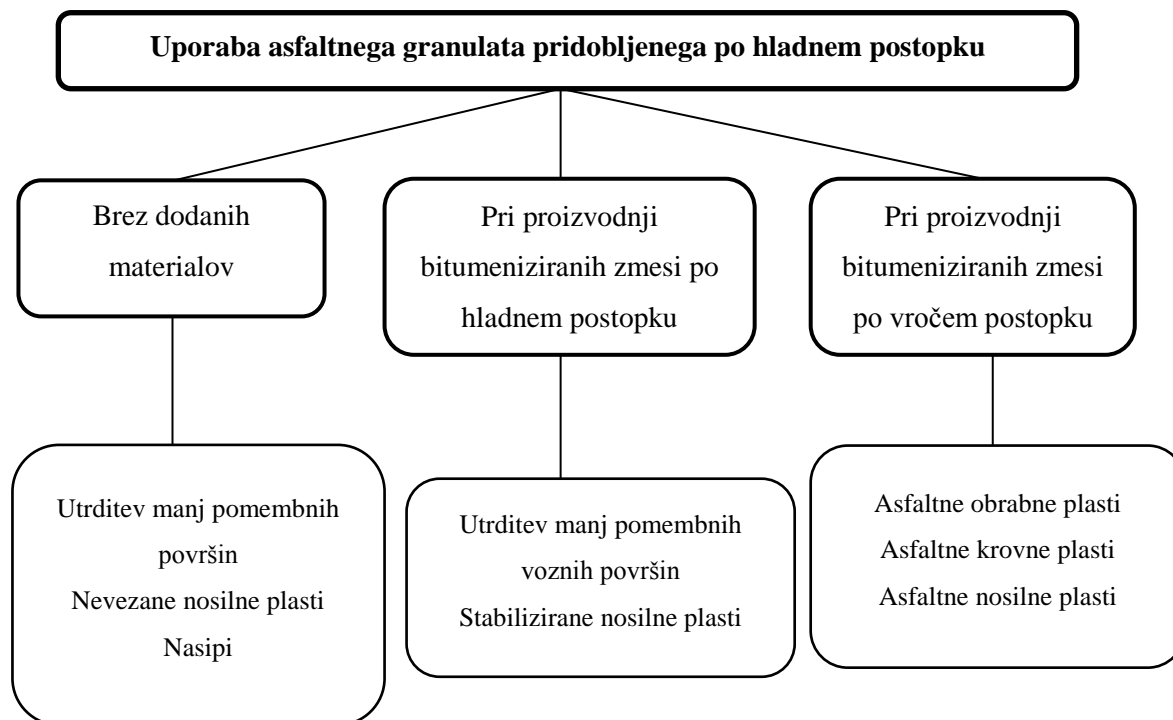
Po izvedbi postopka remix, vgradimo še dodatno plast nove bitumenizirane zmesi. Remix-plus nam omogoča izboljšanje nosilnosti.

Navedene postopke podrobneje opisujeta knjiga Vzdrževanje cest (2010) in Blaž Hrast v diplomskem delu Hladna reciklaža obstoječih cest – stabiliziranje z različnimi vezivi (2012).



Slika 11: In-place reciklaža (Wirtgen, 2012, str. 33)

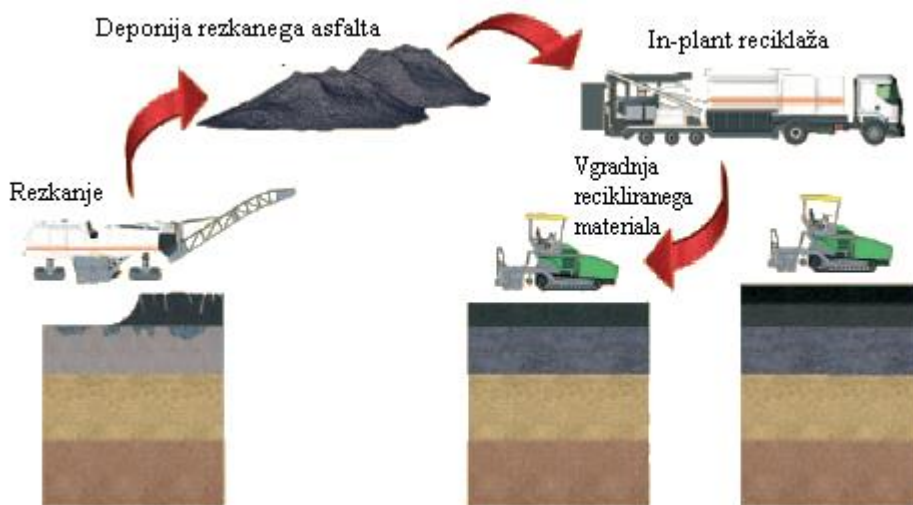
Hladen postopek reciklaže krovnih plasti pa zajema izkop in drobljenje večjih kosov brez predhodnega segrevanja. Dobljeni asfaltni granulati lahko uporabimo pri nevezanih nosilnih plasteh ali pa ga ponovno predelamo v vezan material. Možnosti uporabe asfaltne granulata pridobljenega po hladnem postopku so prikazane na sliki 12.



Slika 12: Uporaba asfaltne granulata pri hladni reciklaži (Žmavc, 2010, str. 249)

Poleg delitve glede na postopek (vroča in hladna), lahko reciklažo delimo tudi glede na mesto obdelave:

- »In place« (na mestu vgradnje) reciklaža, kot že ime samo pove se izvaja na mestu vgradnje. Za izvedbo so potrebni sodobni delovni stroji, ki omogočajo obdelavo materialov, vgrajenih v voziščno konstrukcijo. Z dodatki izboljšamo lastnosti materiala.
- »In-plant« (v mešalni napravi) reciklaža obsega obdelavo materialov, ki so bili odstranjeni iz voziščne konstrukcije, v mešalni napravi zunaj gradbišča. Pri tem postopku med mešanjem materialom dodamo potrebna kamnita zrna in veziva (Slika 13).



Slika 13: In-plant reciklaža (Wirtgen, 2012, str. 33)

### 5.2.2 Sanacija strukturnih poškodb voziščne konstrukcije

Sanacija deformacij in razpok, nastalih pri utrujanju, in posledic prometnih obremenitev je kompleksnejša, saj napake niso omejene le na krovno plast, temveč se širijo na spodnje, bolj občutljive in manj odporne plasti. Ta vrsta popravil spada pod drugo vejo Wirtgenove razdelitve, imenovana obnovitev strukture voziščne konstrukcije (Structural rehabilitation). Zaradi prekomernih deformacij, razpokanosti in podajnosti uporaba cest s strukturnimi deformacijami ni več varna.

Sanacijo strukturnih poškodb delimo na tri glavne skupine:

- zamenjava,
- globoka reciklaža,
- kombinacija in-place in in-plant reciklaže.

### 5.2.2.1 Zamenjava

Kadar imamo eno ali več plasti v voziščni konstrukciji poškodovano do te mere, da ne zagotavlja predpisane nosilnosti, jo je potrebno nadomestiti (Slika 14). Postopek zamenjave je drag, zamuden in zahteva uporabo velikega števila delovnih strojev pri izkopu in odvozu materiala. Poleg tega je v kamnolomih potrebna priprava novega materiala za zamenjavo in dodatni prevozi za transport materiala na gradbišče. Kot alternativa zamenjavi se vse več uporablja reciklaža, s katero skušamo optimizirati porabo materiala, prevoz, čas in ne nazadnje stroške celotne investicije (Wirtgen, 2012).



Slika 14: Zamenjava (Wirtgen, 2012, str. 35)

### 5.2.2.2 Globoka reciklaža

Globoka reciklaža zajema skupino postopkov, s katerimi bistveno vplivamo na voziščno konstrukcijo in ji povečamo sposobnost prevzema obremenitev. Ker globina obdelave lahko doseže tudi do 50 centimetrov, s postopkom hladne reciklaže obdelujemo nosilne plasti in temeljna tla.

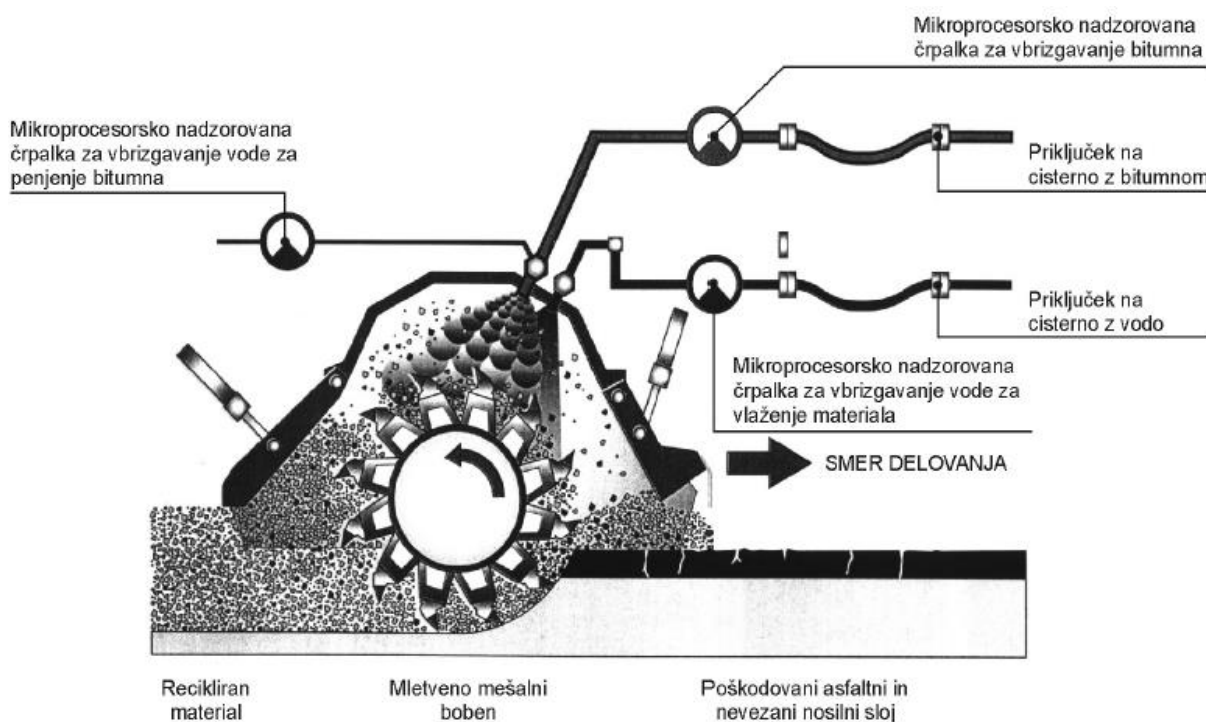
Recikliranemu materialu dodamo stabilizator, ki mu izboljša lastnosti. Za stabilizacijo zmesi zrn po navadi zadostuje že majhna količina veziva. Materiale, katere uporabljamo za stabiliziranje, lahko delimo na organske in anorganske.



### 5.2.2.2.1 Organska veziva – reciklaža z penjenim bitumnom

Najpogosteje uporabljeno organsko vezivo v postopku reciklaže je tako imenovani penjeni bitumen. Penjeni bitumen je sestavljen iz zraka, vode in vročega bitumna (98% bitumna in 2% vode). Pri mešanju vročega bitumna in vode ter vpihovanju vročega zraka se mešanica zapeni. Poleg bitumna je v večini primerov potreben še dodatek finih delcev (cement, kamena moka, apno ali elektrofiltrski pepel) in ustreznih manjkajočih frakcij kamnitega materiala.

Postopek poteka tako, da odrežemo obstoječ material iz cestnega telesa in ga v mletno-mešalnem bobnu reciklatorja premešamo s penjenim bitumnom (Slika 15). Vezivo obda fine delce in ustvari elastično, vezano nosilno plast. Reciklirana plast z uporabo penjenega bitumna zahteva še nadgradnjo z obrabno plastjo (Hevka, 2010).



Slika 15: Reciklaža s penjenim bitumnom (Hevka, 2010, str. 531)

#### 5.2.2.2.2 Anorganska veziva

»Anorganska veziva so prašnati materiali, ki po mešanju z vodo kemično reagirajo. Pri tem in zaradi istočasnih fizikalnih procesov prehaja nastala pasta postopoma v otrdelo stanje in vrsto kamna. Kohezijske in adhezijske lastnosti anorganskih veziv omogočajo, da ta veziva lahko povežejo kamnita zrna v trdno mešanico.« (Žmavc, 2007, str. 88-89)

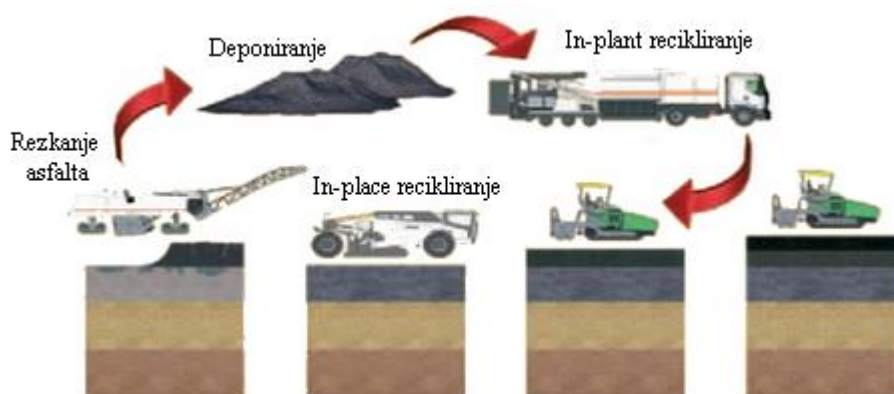
Pri reciklaži uporabljamo naslednja veziva:

- elektrofiltrski pepel,
- žlindro,
- pucolane,
- apno,
- cement.

Na izbor vrste veziva ključno vplivajo zahtevane lastnosti, sestava obdelovalnega materiala, razmere na gradbišču in ekonomičnost.

### 5.2.2.3 Kombinacija in-place in in-plant reciklaže

Kombinacija reciklaže na mestu vgradnje (in-place) in reciklaže v centralni mešalni napravi (in-plant) nam omogoča recikliranje voziščne konstrukcije do večjih globin. Najprej z rezkalnim strojem odstranimo asfaltno plast; granulat moramo začasno deponirati. Sledi stabilizacija nevezanih nosilnih plasti z izbranim vezivom po postopku globoke hladne reciklaže (Slika 16). V primeru, ko želimo stabilizirati temeljna tla, pa je potrebno nevezano nosilno plast najprej odstraniti. V mešalni napravi iz rezkanca (asfaltnega granulata) pripravimo stabilizirano plast, katero transportiramo nazaj na gradbišče in jo vgradimo. Na reciklirano plast je potrebno vgraditi še obrabno plast. S kombinacijo reciklaž zmanjšamo porabo novih materialov na minimum in posledično zmanjšamo stroške prevozov in priprave novega materiala v kamnolomih.



Slika 16: Kombinacija reciklaž (Wirtgen, 2012, str. 37)

---

## 6 ZGODOVINSKI PREGLED HLADNE RECIKLAŽE

Obnovo dotrajanih vozišč s postopkom recikliranja so prvič preizkusili v ZDA že leta 1915. Pospešen razvoj postopkov recikliranja pa se je začel šele pred nekaj desetletji. Leta 1956 je Ladis Csanyi uporabil postopek s penjenim bitumnom, kasneje pa je organizacija Mobil Oil začela izpopolnjevati to tehnologijo. V Evropi pa so omenjeni postopek razvijali pri podjetju Wirtgen.

Po letu 2000 je tudi v Sloveniji prišlo do tehnološkega napredka, saj se je začela uvajati nova metoda obnove vozišč, ki poteka po postopku hladne reciklaže. Ta postopek sta pri nas začela uvajati podjetji SCT in Primorje. Po stečaju obeh podjetji sta tehnologijo odkupili Cestno podjetje Nova Gorica d. d. in Cestno podjetje Kranj d.o.o.

Večinoma so bili za sanacijo poškodovanih voziščnih konstrukcij uporabljeni postopki reciklaže s penjenim bitumnom ali pa cementna stabilizacija. Elektrofiltrski pepel je bil v teh primerih uporabljen le kot dodatek k primarnemu vezivu. Pepel kot samostojno vezivo za stabilizacijo temeljnih tal pa je bil uporabljen le redko.

## 7 HLADNA RECIKLAŽA Z ELEKTROFILTRSKIM PEPELOM

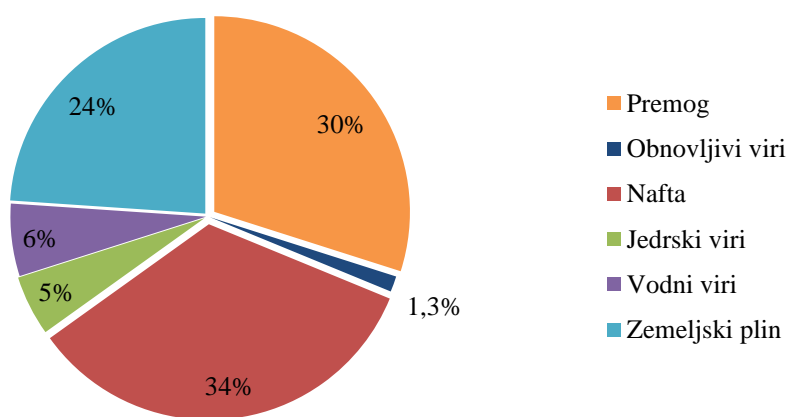
### 7.1 Uvod

Pri projektiranju cestnega telesa je pomemben cilj, da ne pride do razlike med izkopi in potrebami po novih materialih. Podobno velja tudi pri sanaciji cest. Presežek oziroma primanjkljaj materiala se odraža v dodatnih stroških, večjih izpustih emisij v okolje zaradi dodatnega prevoza in oviranju prometa.

Da bi se izognili vsem tem negativnim vplivom in da bi zagotovili ohranjanje naravnih virov, se vse pogosteje uporablja postopek reciklaže.

### 7.2 Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel nastane pri sežigu premoga v termoelektrarnah. Približno 30% vse svetovne energije pridobivamo iz premoga (Slika 17). V Sloveniji obratujejo štirje termoenergetski objekti: Ljubljana, Šoštanj, Trbovlje in Brestanica. Od tega v prvih treh energijo pridobivajo iz premoga, v Brestanici pa se za gorivo uporabljajo tekoča in plinasta goriva. Javna agencija RS za energijo ima na svoji spletni strani zapisano, da delež energije, proizvedene v teh termoelektrarnah, znaša 32,5% (2012).



Slika 17: Deleži proizvodnje svetovne energije (Unite soltech, 2013)

Večinoma je pepel odpadni produkt, katerega se deponira na primernih odlagališčih. Vse pogosteje ga uporabljamo tudi v gradbeništvu kot dodatek k betonom, nasipni material in stabilizator pri gradnji voziščnih konstrukcij. Uporaba elektrofiltrskega pepela pa med ljudmi vzbuja dvome in strah pred potencialnim sevanjem in vsebnostjo toksičnih elementov.

### 7.2.1 Pridobivanje

Premog je organskega izvora, njegova starost pa je od 50 do 350 milijonov let. Sestavljen je iz gorljivih in negorljivih snovi ter vlage. Temperature izgorevanja premoga se običajno gibljejo okoli 1100 °C do 1200 °C, v redkih primerih tudi do 1600 °C. Gorljive snovi pri zgorevanju sproščajo toplotno energijo, vlaga izpari, negorljiv ostanek pa je pepel. Ime elektrofiltrski pepel je dobil, ker ga iz dimnih plinov odstranjujemo z elektrofiltri. Z dna kurišča pa je potrebno odstraniti večje, negorljive delce - žlindro (Vedenik-Novak, 1995).



Slika 18: Termoelektrarna Šoštanj ([http://krajji.eu/slovenija/sostanj\\_termoelektrarna\\_tes/slo](http://krajji.eu/slovenija/sostanj_termoelektrarna_tes/slo) (27.3.2013))

### 7.2.2 Kemijska sestava

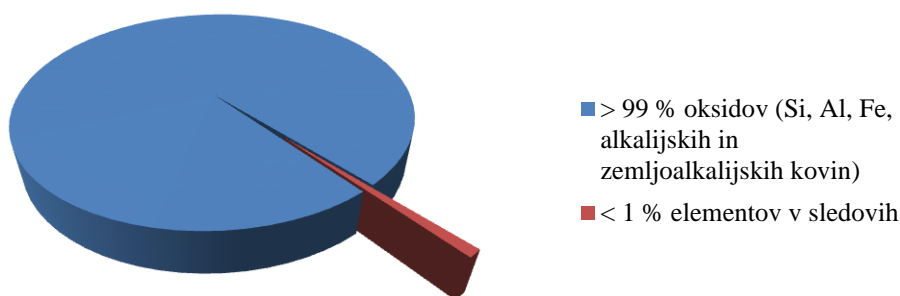
Sestava in lastnosti ter struktura delcev elektrofiltrskega pepela so odvisne od sestave premoga in procesov izgorevanja.

Pri sestavi pepela v večini prevladujejo alumosilikati (70-80%), katere najdemo v obliki drobnih, okroglih ali zaobljenih steklenih delcev. Le-ti nastajajo pri taljenju in hitrem hlajenju glinenih mineralov. Del pepela pa se nahaja v obliki kristalov kremena ( $\text{SiO}_2$ ), mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) in prostega apna. Na barvo pepela vplivata vsebnost ogljika in vsebnost železovih oksidov in hidroksidov. Pepeli, ki vsebujejo veliko  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , so svetlo sive do temno rjave barve, pepeli z veliko ogljika pa so temno sive do črne barve. Pepel ima zaradi magnetita magnetne lastnosti. V magnetnih frakcijah pa lahko zasledimo tudi težke kovine: Cr, Co, Ni, Cu in Cd. V obliki sulfatov se v pepelu nahaja tudi žveplo. Karbonati, nitrati in nitriti zaradi visoke temperature izgorevanja razpadejo. Pepel vsebuje tudi nekatere toksične prvine v sledovih: Hg, Cr, Ni, Cu, Se, Zn, Cd, As in Pb.

Okvirna kemijska sestava elektrofiltrskih pepelov je prikazana v preglednici 2 in na grafu (Slika 19).

Preglednica 2: Okvirna sestava elektrofiltrskih pepelov (Bernard, 1997, str. 7)

Makrokomponenta	Vrednost [%]	Mikrokomponenta	Vrednost [mg/kg]
SiO <sub>2</sub>	40 - 50	Zn	200 - 600
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 30	Pb	50 - 150
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 10	Cu	50 - 150
CaO + MgO	5- 15	Cr	10 - 100
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	1 - 3	As	10 - 50
		Cd	1 - 10
		Hg	0,1 - 1
		CN <sup>-</sup>	10 - 50



Slika 19: Kemijska sestava pepela (Vedenik-Novak, 1995, str. 108)

Elektrofiltrski pepeli imajo tudi sposobnost vstopa v reakcijo s CaO ali Ca(OH)<sub>2</sub> ob dodatku vode pri sobni temperaturi. Reakcija tvori trdno maso, ki je netopna v vodi. To lastnost imenujemo pucolanska aktivnost.

V premogu se nahajajo tudi radioaktivne snovi, ki so posledično prisotne tudi v pepelu (Vedenik-Novak 1995).

### 7.3 Okoljevarstveni vidik uporabe elektrofiltrskega pepela

Elektrofiltrski pepel, katerega uporabljamo v cestogradnji, naj ne bi škodljivo vplival na okolje. Z vodo se veže v netopne minerale in v sebi zadrži večino prvin. Težke kovine se iz pepela izpirajo v zelo majhnih deležih, ki ne presegajo zakonsko določenih vrednosti. Kljub vsemu pa uporaba elektrofiltrskega pepela ni priporočljiva v bližini podtalnice (Kočevar, 1993).

### 7.3.1 Izluževanje

Pri odlagališčih in uporabi elektrofiltrskega pepela kot nasipnega ter stabilizacijskega materiala predstavlja največji problem ekstrakcija ali izluževanje.

Ekstrakcija ali izluževanje je kemijski proces prenosa molekul iz trdnih snovi v tekočo snov, v našem primeru vodo. Po vgradnji pepela je le-ta izpostavljen neposrednemu stiku z vodo. Pri tem lahko pride do ekstrakcije. V preteklosti se je z vplivom ekstrakcije ukvarjalo več raziskovalcev. Ugotovljeno je bilo, da so deleži ekstrakcije toksičnih težkih kovin zelo majhni.

V preglednici 3 so prikazani rezultati analize izcednih vod pri izluževanju pepela na improvizirani deponiji Termoelektrarne Ljubljana:

Preglednica 3: Rezultati analize izcednih vod pri izluževanju pepela (Vedenik-Novak, 1995, str. 108) (Uradni list RS, št 35. 1996, str. 2961-2963)

<b>Kemijski element</b>	<b>Maksimalna koncentracija mg/l</b>	<b>Mejna vrednost za iztok v vode mg/l</b>
F	2,0	10
Zn	0,02	2
Cd	0,05	0,1
Pb	0,004	0,5
Cu	0,02	0,5

Rezultati analize kažejo, da koncentracije ne presegajo mejnih vrednosti za iztok v vode, objavljenem v Uradnem listu Republike Slovenije (1996), torej izluževanje izven območji rezervatov pitne vode ne predstavlja nevarnosti za vodotoke ali podtalnico.



### 7.3.2 Sevanje

Meritve radioaktivnega sevanja so pokazale, da sevanje z naraščanjem oddaljenosti od deponije zelo hitro pada. Na oddaljenosti nekaj deset metrov od deponije sevanja praktično že ni mogoče zaznati. Kadar pa je pepel prekrit z zemljino ali pa kot primer v cestogradnji z nevezano nosilno in asfaltno plastjo, pa je sevanje na površju praktično izničeno. To je posledica absorpcije sevanja v materialu s katerim prekrijemo pepel.

Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji ima na svoji spletni strani zapisano, da prebivalci Slovenije v povprečju letno prejmemo 2,5 mSv do 2,8 mSv (mili Sievert) od naravnih virov sevanja. Dovoljena dodatna efektivna doza sevanja zaradi umetnih virov v Republiki Sloveniji znaša 1 mSv letno za posameznika (2013). Zaradi bližine deponije elektrofiltrskega pepela pa bi dodatno prejeli 0,005 mSv efektivne ekvivalentne doze letno (Vedenik – Novak 1995). Za nazornejšo primerjavo lahko obravnavamo sevanje pri panoramskem rentgenskem posnetku zob. Pacient pri slikanje prejme 0,014 mSv sevanja, kar je skoraj trikrat več kot letno sevanje deponije.

### 7.3.3 Raztros

Težavo pri izvedbi hladne reciklaže in predhodnim posipom elektrofiltrskega pepela lahko predstavlja tudi raztros pepela v okolico (Slika 20). Da bi se v čim večji meri izognili raztrosu, je potrebno izvesti posip in reciklažo v nevetrovnem vremenu. Ker pepel vsebuje težke kovine, je priporočljivo, da se pridelke, ki so bili izpostavljeni pepelu zaradi raztrosa, predhodno splakne z vodo. Prav zaradi prašenja je uporaba elektrofiltrskega pepela manj primerna za stabilizacijo tal v naseljih.



Slika 20: Raztros pepela v okolico (Bebar, 2013)

## 7.4 Elektrofiltrski pepel kot stabilizator v kombinaciji z cementom ali apnom

S kombinacijo elektrofiltrskega pepela in hidriranega apna oziroma cementa dobimo kompleksna (sestavljena) veziva. Kadar se srečamo s peščenimi, manj vezljivimi zemljinami, lahko uporabimo elektrofiltrski pepel kot glavni material pri stabilizaciji. Pri zaglinjenih materialih, pa nam umešanje že majhne količine apna poveča nosilnost stabilizirane plasti.

Mešanica sestavljena iz prekvalitetnih cementov doseže visoke trdnosti in je sposobna prevzeti večje natezne obremenitve, kar pomeni, da v času vezanja manjkrat počí, vendar pa so razpoke večje. Večje razpoke pa je težje premostiti. Kombinacija veziva sestavljenega iz cementa in elektrofiltrskega pepela doseže nižje trdnosti in čas naraščanja trdnosti je počasnejši, kar je ugodno, saj so zaradi tega nastale napetosti zaradi vezanja in razpoke manjše.

## 7.5 Tehnologija

### 7.5.1 Reciklažni niz

Reciklažni niz je zaporedje gradbene mehanizacije, v katerem vsak člen opravlja določene naloge. Različna veziva za stabilizacijo pogojujejo različne postopke vgradnje in različno sestavo reciklažnega niza. Tehnologija Wirtgen (WR 2500 S) omogoča različne vrste sestav reciklažnega niza:

1. Reciklažni niz pri stabilizaciji z elektrofiltrskim pepelom in cementom, kjer cement raztrosimo po tleh (Slika 21)

Prvi v nizu potuje posipalnik, ki enakomerno raztrosi vezivo po površini. Za posipalnikom je na vrsti cisterna z vodo, katera je preko potisnega droga povezana z reciklatorjem. Recikliran material je potrebno zgostiti v najkrajšem možnem času, zato je naslednji v nizu vibracijski valjar. Kot zadnja pa potujeta greder, ki splanira prečne in vzdolžne grebene in valjar, ki zagotovi končno zgostitev materiala.



Slika 21: Reciklažni niz pri cementni stabilizaciji (Rotech, 2012, str. 3)

## 2. Reciklažni niz pri stabilizaciji, kjer cement dovajamo v obliki cementne paste (Slika 22)

Cement lahko dodajamo tudi tako, da pred reciklator postavimo poseben mešalnik, ki zmeša cement in ustrezno količino vode in nastalo pasto dovaja v reciklator.



Slika 22: Reciklažni niz pri cementni stabilizaciji, ko v reciklator dovajamo cementno pasto

## 3. Reciklažni niz pri stabilizaciji s uporabo penjenega bitumna

Pri reciklaži s penjenim bitumnom je v niz potrebno dodati še cisterno z bitumnom. Pri kombinaciji penjenega bitumna in cementa pa imamo možnost dveh različnih postavitv reciklažnega niza, odvisno od načina dodajanja cementa (opisan v zgornjih primerih):

- kadar cement predhodno posipamo, je cisterna z vodo pred cisterno z bitumnom (Slika 23)



Slika 23: Reciklažni niz pri izvedbi s penjenim bitumnom in predhodnim posipom cementa

- kadar pa cement zmešamo z vodo in ga neposredno dovajamo v reciklator, se nahaja cisterna z bitumnom pred cisterno z mešanico cementa (Slika 24)



Slika 24: Reciklažni niz pri izvedbi s penjenim bitumnom, kjer cement dodajamo v obliki cementne paste

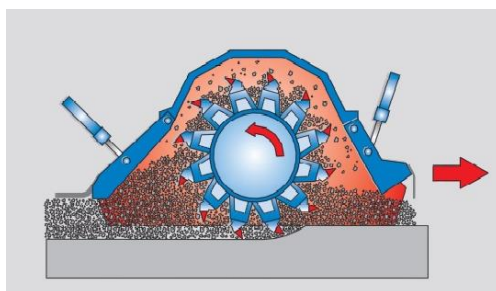
### 7.5.2 Reciklator

Najpomembnejši stroj v nizu je reciklator WR 2500 S (Slika 25). Reciklator je sodoben stroj, ki v enem prehodu odreza material voziščne konstrukcije, ga premeša z ustreznim vezivom in ga ponovno vgradi.



Slika 25: Reciklator WR 2500 S (Wirtgen, 2012, str. 1)

Gonilna sila reciklatorja je rezkalno-mešalna glava, ki je opremljena z rezkalnimi noži. Glava se vrti v nasprotni smeri potovanja reciklatorja in rezka ter premeša obstoječ material voziščne konstrukcije (Slika 26). Za zagotavljanje ustrezne vlažnosti je potrebno dovajati ustrezno količino vode, ki je, tako kot tekoče vezivo, vbrizgana v mešalni boben preko sistema mikroprocesorsko nadzorovanih črpalk. Delovna širina stroja znaša med 2438 milimetrov in 3048 milimetrov, globina pa vse do 500 milimetrov. V preglednici 4 so prikazane nekatere tehnične specifikacije obravnavanega reciklatorja.



Slika 26: Vrtenje glave v nasprotni smeri potovanja (Wirtgen, 2006, str. 20)

Preglednica 4: Tehnične specifikacije reciklatorja WR 2500 S (Wirtgen, 2009, str. 1)

<b>Delovna širina</b>	2,438 mm – 3,048 mm
<b>Delovna globina</b>	0 – 500 mm
<b>Proizvajalec motorja</b>	Deutz AG
<b>Poraba goriva pri polni obremenitvi</b>	142 l/h
<b>Delovna hitrost:</b>	
<b>1. stopnja</b>	0-15 m/min
<b>2. stopnja</b>	0-40 m/min
<b>3. stopnja</b>	0-80 m/min
<b>4. stopnja</b>	0-200 m/min

## 7.6 Preiskave in določitev recepture

Elektrofiltrski pepel je primeren za kemično stabilizacijo manj vezljivih, peščenih zemljin. Potrebna količina je odvisna od naravne vlažnosti obravnavanega materiala.

Glavno vlogo pri preiskavah tvorijo terenske in laboratorijske preiskave vgrajenih materialov. Na odseku, ki je predviden za reciklažo, je potrebno predhodno odvzeti vzorce, ki so potrebni za določitev predhodne delovne sestave in analize materiala.

Za določitev lastnosti zemljine je potrebno najprej izvesti preiskave

- naravne vlažnosti,
- zrnivosti,
- konsistenčnih mej,
- CBR pri naravni vlagi (za oceno deformabilnosti),
- maksimalne prostorske mase in optimalne vlage s Proctorjevim preskusom.

Optimalno vlago nato primerjamo z naravno vlago in izberemo ustrezno vezivo ter ocenimo potrebno količino. Za določitev maksimalne prostorske mase in optimalne vlage po Proctorju se uporablja modificiran preskus.

Naslednji korak obsega izdelavo več laboratorijskih mešanic, katere so stabilizirane z različnimi količinami veziva. Na vsaki izmed mešanic izvedemo Proctorjev preskus. »Optimalna količina veziva je tista, pri kateri se optimalna vlažnost toliko približa naravni, da stabilizirano zemljino lahko zgostimo do predpisane stopnje.« (Bebar, 2000, str. 26)

Dobljene laboratorijske rezultate je potrebno preveriti še na poskusnem polju in jih po potrebi tudi korigirati.

Glavni cilji poskusnega polja so:

- preveriti ali ustreza optimalna količina veziva, katero smo določili v laboratoriju,
- preveriti ustreznost v tehnološkem elaboratu predvidenih tehnoloških postopkov,
- preizkusiti strojno opremo (točnost doziranja, homogenost mešanice).

Poskusno polje mora biti primerno veliko, da delo mehanizacije poteka nemoteno in da se lahko izvedejo vse potrebne meritve. V primeru neustreznosti recepture jo je potrebno korigirati in poskusno polje ponoviti.

Potrebno število prehodov valjarja določimo s pomočjo izotopske sonde, s katero izmerimo zgoščenost po vsakem izmed prehodov. Optimalno debelino plasti pa določimo s kontrolo zgoščenosti po višini plasti, katero izvedemo po zaključku vgrajevanja.

Ustreznost postopka se dokaže po zaključku vgrajevanja. Dokazujemo jo z meritvami zgoščenosti, vlažnosti in deformacijskih modulov.

Med samim vgrajevanjem (recikliranjem) je potrebna poostrena kontrola, saj je izvedba reciklaže bistveno zahtevnejša od zamenjave celotne voziščne konstrukcije. Nadzorovati je potrebno:

- vlažnost vhodnega materiala,
- točnost doziranja veziva (elektrofiltrskega pepela),
- zgoščenost reciklirane plasti,
- globino reciklirane plasti.

(Bebar, 2000).



## 8 PRAKTIČNI PRIMER

### 8.1 Predstavitev gradbišča

V praktičnem delu naloge bom obravnaval rekonstrukcijo odseka ceste na Jesenovcu. Celoten projekt sicer obsega sanacijo zidov, brežin in usadov in je imenovan: Sanacija zidov Jesenovec na cesti R2-403/1075 Podrošt – Češnjica od km 5,943 do km 7,420. Tematika diplomske naloge je hladna reciklaža, zato se bom v nadaljevanju osredotočil le na sanacijo voziščne konstrukcije.

Naročnik del je bila Direkcija RS za ceste, izvajalec pa Cestno podjetje Kranj d.d.

Že prvotno je bila cesta v slabem stanju, neurje septembra 2007 pa je stanje še poslabšalo. Sproženi so bili številni usadi, asfaltno vozišče pa je bilo v razpadajočem stanju (Slika 27).



Slika 27: Prikaz slabega stanja ceste (Bebar, 2012a, str. 2)

Po projektu, katerega je pripravilo Podjetje za urejanje hudournikov d.d. - PUH (2010), je bila za celoten odsek predvidena popolna rekonstrukcija – zamenjava celotne voziščne konstrukcije. Rušenje asfalta in izkop materiala do 60 cm pod niveleto vozišča naj bi zamenjalo:

- 4 cm asfalta surf B50/70, A3,
- 6 cm asfalta AC 22 base B50/70,
- 20 cm tamponskega materiala 0/32 mm,
- 30 cm posteljice iz drobljenca ali prodca.

Izkop in zamenjava tal do globine 80 cm je predvidena, če bi se pojavil neustrezen zaglinjen material.

V tem primeru je potrebna vgradnja dodanih 20 cm kamnitega materiala.

V letu 2011 je bil uspešno izveden odsek od km 6,478 do km 7,420 po navedenem postopku zamenjave. Za preostali del pa je po predlogu izvajalca prišlo do spremembe tehnologije. Sanacija ceste od km 5,943 do km 6,478 je bila tako izvedena po postopku hladne reciklaže z elektrofiltrskim pepelom.

V nadaljevanju naloge bodo predstavljene predhodne raziskave, potek reciklaže in zaključno poročilo. Na koncu pa bom poskušal izvesti še ekonomsko in okoljevarstveno primerjavo med hladno reciklažo z elektrofiltrskim pepelom in zamenjavo celotnega zgornjega ustroja na izbranem primeru.

## 8.2 Predhodne raziskave

Predhodne raziskave so po naročilu izvajalca izvedli na Inštitutu za gradbene materiale - IGMAT d.d. Razkopi so pokazali, da obstoječa debelina asfaltne plasti znaša okoli 10 cm, debelina nevezane nosilne plasti pa od 6 do 15 cm (Slika 28). Pod to plastjo se nahaja zaglinjen pesek, ki je bil v obliki vzorcev odvzet za nadaljne laboratorijske preiskave.



Slika 28: Razkopi (Bebar, 2012a, str. 3)



## 8.2.1 Laboratorijske preiskave

### 8.2.1.1 Preiskave zemljine

Na obstoječi nestabilizirani zemljini so bile opravljene naslednje preiskave:

**1. AC klasifikacija:** SC (zaglinjen pesek)

Uporabljen standard: JUS U.B1.001:1990

**2. Naravna vlaga:**  $W_{nar} = 15,2$  m.-%

Uporabljen standard: SIST-TS CEN ISO/TS 17892-1:2004

**3. Humoznost:** negativen test (raztopina svetlejša od standardne)

Uporabljen standard: SIST EN 1744-1:2010, pog. 15.1

**4. Zrnavost + aerometrija:**

delež delcev  $< 0,063$  mm = 39,3 m.-%

delež delcev  $< 0,02$  mm = 26,3 m.-%

količnik neenak. zrnivosti  $U_{d60/d10} = 81,4$

Uporabljen standard: SIS EN 933-1999+A1:2005, SIST-TS CEN ISO/TS 17892-4:2004

**5. Konsistenčne meje:**

$w_1 = 30,1$  m.-%

$I_p = 9,2$  %

$I_c = 1,6$

Uporabljen standard: SIS-TS CEN ISO/TS 17892-12:2004

**6. Gostota in optimalna vlažnost po Proctorju: mpp**

$\rho_{d\ max} = 1921$  kg/m<sup>3</sup>

$w_{opt} = 13,4$  m.-%

Uporabljen standard: DIN 18 127 – M 150 Y:1997

**7. Kalifornijski indeks nosilnosti:**

CBR<sub>1nar</sub> = 4,6 %

CBR<sub>2nar</sub> = 3,9 %

Uporabljen standard: SIST EN 13286-47:2004

**Komentar:**

»Vzorec je zaglinjen pesek SC s cca 40 m.-% vezljivih delcev. Glinen značaj finih delcev potrjuje preiskava konsistenčnih mej (meja židkosti  $w_l = 30,1$  m.-% indeks plastičnosti  $I_p = 9,2$  %). Zemljina kljub sumljivi temni barvi ni humozna. Naravna vlažnost odvzetega vzorca je 15,2 m.-%, kar je cca 2 m.-% nad optimumom. CBR1 pri naravni vlagi je 4,6 %, po namakanju pade na 3,9 %, nabrekanje je minimalno (0,2 %).« (Bebar, 2012a, str. str. 4)

**8.2.1.2 Zemljina stabilizirana s 5 m.-% elektrofiltrskega pepela****1. Gostota in optimalna vlažnost po Proctorju: spp**

$$\rho_{d \max} = 1848 \text{ kg/m}^3$$

$$w_{\text{opt}} = 14,8 \text{ m.-%}$$

Uporabljen standard: DIN 18 127 – M 150 Y:1997

**2. Kalifornijski indeks nosilnosti:**

$$\text{CBR1}_{90\text{min}} = 10,3 \%$$

$$\text{CBR1}_{7\text{dni}} = 14,3 \%$$

$$\text{CBR2}_{7\text{dni}} = 15,4 \%$$

Uporabljen standard: SIST EN 13286-47:2004

(Bebar, 2012a)

**Komentar:**

»Na mešanici z dodatkom 5 m.-% EFP (TEŠ) je bil takoj po zamešanju izmerjen  $\text{CBR1}_{90 \text{ min}} = 10,25$  %, po 7 dneh  $\text{CBR1}_{7 \text{ dni}} = 14,26$  % in po 7 dneh s predhodnim namakanjem  $\text{CBR2}_{7 \text{ dni}} = 15,45$  %. Vidno je takojšnje povečanje nosilnosti zaradi zvišanja optimalne vlage, v sedmih dneh nosilnost zmerno naraste zaradi pucolanske aktivnosti elektrofiltrskega pepela. Obstočnost v vodi je dobra. Nabrekanje je minimalno (0,05 %).« (Bebar, 2012a, str. 5)

## 8.2.2 Dimenzioniranje voziščne konstrukcije

### 8.2.2.1 Analiza prometnih obremenitev

Dimenzioniranje nove voziščne konstrukcije se je izvedlo na podlagi tehničnih regulativ TSC 06.511:2009 in TSC 06.520:2009 ter ob upoštevanju rezultatov iz točke 8.2.1.

TSC 06.511:2009 služi kot postopek za izvrednotenje merodajne prometne obremenite. Na podlagi tega je možno določiti dimenzije plasti voziščnih konstrukcij z asfaltno plastjo. Tehnična specifikacija velja tako za novogradnje, kot tudi za sanacije obstoječih voziščnih konstrukcij.

Podatki o prometnih obremenitvah so bili pridobljeni na spletni strani Direkcije RS za ceste (2010) (Preglednica 5). Pri izračunu je bilo potrebno uporabiti tudi faktorje ekvivalentnosti za posamezno skupino vozil. Ti so podani v TSC 06.511:2009.

Preglednica 5: Skupno število prehodov NOO 100 kN v 20-letnem obdobju (2010-2030) (Bebar, 2012a, str. 6)

Vrsta vozil	Povprečno št. vozil na dan	Faktor ekvivalentnosti	Skupno št. prehodov NOO 100 kN
Osebna vozila	1701	0,00003	0,05
Avtobusi	14	0,85	11,90
Lahka to. Vozila <3,5 t	104	0,005	0,52
Srednja tov. Vozila 3,5-7 t	29	0,25	7,25
Težka tov. Vozila >7 t	42	1,35	56,70
Tovorna vozila s priklopniki	3	1,25	3,75
Vlačilci	2	1,25	2,50
<b>Skupaj</b>			<b>82,67</b>

Skupna dnevna ekvivalentna prometna obremenitev v prečnem prerezu vozišča torej znaša  $T_d = 82,67$  NOO 100 kN.

Merodajna prometna obremenitev  $T_n$  pa je po TSC 06.511:2009 opredeljena z:

- ekvivalentno dnevno prometno obremenitvijo,
- dodatnimi vplivi značilnosti ceste,
- in trajanjem ter letno stopnji rasti prometa.

$$T_n = 365 \times T_d \times f_{pp} \times f_{sp} \times f_{nn} \times f_{tp} \times f_{dv}$$

$T_n$  – merodajna prometna obremenitve v obdobju n let

$T_d$  – ekvivalentna dnevna prometna obremenitev

$f_{pp}$  – faktor prečenega prereza vozišča

$f_{sp}$  – faktor širine prometnih pasov

$f_{nn}$  – faktor vzdolžnega nagiba nivelete

$f_{ip}$  – faktor povečanja prometne obremenitve zaradi rasti prometa v dobi trajanja

$f_{dv}$  – faktor dodatnih dinamičnih vplivov

Vrednosti faktorjev lahko odčitamo iz tabel v TSC 06.511:2009. Pri odčitkih je bilo upoštevano:

- cesta je sestavljena iz dveh voznih pasov;  $f_{pp} = 0,5$ ,
- širina voznega pasova znaša 2,5 metra;  $f_{sp} = 2,0$ ,
- nagib nivelete znaša do 2 %;  $f_{nn} = 1,0$ ,
- letna stopnja rasti prometa bo znašala 3 % za načrtovano dobo 20 let;  $f_{ip} = 28$ ,
- pri faktorju dodatnih dinamičnih vplivov pa so bili upoštevani dobri pogoji;  $f_{dv} = 1,05$ .

Analizirana in ugotovljena merodajna prometna obremenitev v projektiranem 20-letnem obdobju znaša  $8,9 \times 10^5$  prehodov NOO 100 kN v eni smeri obravnavanega odseka.

Iz razpredelnice objavljene v TSC 06.520:2009 lahko razberemo, da ugotovljena merodajna skupna prometna obremenitev spada v srednjo skupino prometne obremenitve (Bebar, 2012a).

### 8.2.2.2 Določitev dimenzij voziščne konstrukcije

Določitev dimenzij voziščne konstrukcije za predvideno prometno obremenitev je bila izvedena v skladnosti s TSC 06.520:2009. Z omenjeno tehnično specifikacijo se določi skupno debelino voziščne konstrukcije in debeline posameznih plasti materialov. Izračun je odvisen od vpliva utrujanja materialov vgrajenih v voziščno konstrukcijo zaradi prometnih obremenitev, nosilnosti podlage (posteljice) in hidroloških razmer.

Skupna potrebna debelina asfaltne krovne plasti in debelina nevezane nosilne plasti se odčitata iz diagrama objavljenega, v omenjeni tehnični specifikaciji za ceste.

Iz odčitkov diagrama je razvidno, da potrebna debelina asfaltne krovne plasti znaša  $d_k = 13$  cm. Potrebna debelina nevezane nosilne plasti pa znaša 20 cm. Pri tem je bila upoštevana minimalna vrednost CBR = 15%, katero naj bi zagotavljala nosilnost podlage.

Pri preveritvi vpliva zmrzovanja določimo globino utrditve  $h_{min}$ , ki bo obstojna na mrazu in bo odporna proti preoblikovanju. Globina utrditve je odvisna od odpornosti materiala proti učinkom zmrzovanja in odtajevanja, hidroloških pogojev in globine zmrzovanja (TSC 06.520:2009, Razpredelnica 4).

Za material, ki se nahaja pod obravnavano voziščno konstrukcijo, je bila upoštevana nizka odpornost proti učinkom zmrzovanja in odtajevanja, ugodni hidrološki pogoji in globina zmrzovanja 100 cm.

Globina utrditve  $h_{min}$  torej znaša:

$$h_{min} = 0,7 \times h_m = 0,7 \times 100 \text{ cm} = 70 \text{ cm}$$

Pri določitvi debelin posameznih plasti so bili uporabljeni količniki ekvivalentnosti materialov, ki so navedeni v TSC-ju in jih upoštevamo pri izračunu potrebnega debelinskega indeksa  $D_k$  (Slika 29).

Vrsta materiala	Količnik ekvivalentnosti $a_i$
- za obrabno plast:	
- bitumenski beton	$a_o = 0,42$
- drobir z bitumenskim mastiksom	$a_o = 0,42$
- za zgornjo vezano nosilno plast:	
- bituminizirani drobljenec	$a_{zv} = 0,35$
- bituminizirani prodec	$a_{zv} = 0,28$
- za spodnjo vezano nosilno plast:	
- stabilizirana zmes kamnitih zrn	
- z bitumnom	$a_{sv} = 0,24$
- s cementom	$a_{sv} = 0,20$
- za spodnjo nevezano nosilno plast:	
- drobljenec	$a_{sn} = 0,14$
- prodec	$a_{sn} = 0,11^*$

\* omejen z debelino plasti 40 cm

Slika 29: Poprečne vrednosti količnikov ekvivalentnosti materialov (TSC 06.520:2009, 2009, str. 8)

Za predvideno prometno obremenitev mora debelinski indeks znašati:

$$D_k = a_o \times d_o + a_{zv} \times d_{zv} = 13 \text{ cm} \times 0,38 + 20 \text{ cm} \times 0,14 = 7,74 \text{ cm}$$

Na podlagi izračunov je bila predlagana naslednja voziščna konstrukcija (Preglednica 6):

Preglednica 6: Nova voziščna konstrukcija ceste (Bebar, 2012a, str. 7)

Vrsta materiala v plasti	Debelina plasti (cm)	Debelinski indeks $a_i \times h_i$ (cm)
AC 11 surf B70/100 A3 (bitumenski beton)	4	1,68
AC 22 base B 70/100 A3 (bitumenizirani drobljenec)	9	3,15
Tamponski drobljenec 0/32 (nevezana nosilna plast)	20	2,8
Skupaj	33	7,63

### 8.2.2.3 Predlagana sestava voziščne konstrukcije

Asfaltno plast bi skupaj s približno 5 cm nevezane nosilne plasti odrezkali in deponirali v bližini ter ponovno vgradili v območje predvidene posteljice. Za rezkanjem bo sledil izkop in priprava planuma. V primeru ujemanja kvalitete tal z odvzetimi vzorci se bodo le-ta kemično stabilizirala v debelini 37 cm z dodatkom 5 m.-% elektrofiltrskega pepela. Iz tega lahko izračunamo, da potrebna količina pepela znaša:

$$0,37 \text{ m} \times 1848 \text{ kg/m}^3 \times 0,05 = 35 \text{ kg/m}^2$$

Na stabilizirana tla se nato vgradi predhodno odrezkan asfalt v debelini 10 cm, 20 cm dodatne nevezane nosilne plasti in asfaltni plasti debeline 9 in 4 cm. (Bebar, 2012a)

### 8.3 Izvedba – potek gradnje

Preden smo začeli s samo izvedbo, je bilo potrebno določiti potek del. Glavni cilj strategije dela je bil čim manjše oviranje prometa. Odločeno je bilo, da se izvedba deli na šest etap – trije približno enako dolgi deli na vsakem izmed voznih pasov. Vsaka etapa naj bi bila izvedena v enem dnevu. Tak način gradnje je omogočal potek prometa pod polovično zaporo (Slika 30).



Slika 30: Ureditev poteka prometa (Bebar, 2013)

Izvedba se je pričela z rezkanjem obstoječih asfaltnih plasti vključno s 5 cm nevezane nosilne plasti. Nalogo je opravil reciklator, rezkani material pa je bil odpeljan na začasno deponijo neposredno na gradbišču. Rezkanju asfalta je sledilo še rezkanje in odvoz obstoječe nevezane nosilne plasti ter priprava planuma na koti -43 cm pod novo niveleto. Deponija se je nahajala v oddaljenosti 9,5 kilometrov. Sledila je preiskava tal. V kolikor se tla ne bi ujemala s pričakovanji, le-ta ne bi bila primerna za izbrano stabilizacijo in bi morala biti v celoti zamenjana. Po pričakovanjih se kvaliteta tal ni bistveno spreminjala vzdolž trase in se je ujemala z odvzetimi vzorci, zato se je izvedba stabilizacije lahko začela.

Prvi v nizu je potoval posipalnik elektrofiltrskega pepela, ki je bil pripeljan iz Termoelektrarne Šoštanj. Ker je bila potrebna relativno velika količina posipa na kvadratni meter, je bilo določeno, da se bo stabilizacija izvedla v dveh korakih. V prvem koraku je bila posuta in vmešana polovica pepela, v drugem pa še preostali del. Kontrola količine posipa je bila izvedena tako, da se je na tla razgrnilo ponjavo v velikosti enega kvadratnega metra. Po prehodu posipalnika so ponjavo dvignili in stehali posip (Slika 31).





Slika 31: Kontrola količine posipa (Bebar, 2013)

V naslednji fazi del se je z reciklatorjem odrezkalo tla v debelini 37 cm, material premešalo s pepelom in homogeno mešanico ponovno vgradilo. Pred reciklatorjem je potovala tudi cisterna z vodo, ki je bila dodana v primeru prenizke vlažnosti (Slika 32).



Slika 32: Cisterna z vodo (Bebar, 2013)





Slika 33: Tla po stabilizaciji (Bebar, 2013)

Stabilizirana tla (Slika 33) je bilo potrebno še ustrezno zgostiti in profilirati. Po zgostitvi so bile na različnih točkah opravljene meritve vlage in zgoščenosti ter dinamičnega deformacijskega modula za zunanjo in notranjo kontrolo. Na tako pripravljeno podlago je bila vgrajena plast iz asfaltne granulate in kamnitih zrn iz obstoječe nevezane nosilne plasti ter nova plast kamnitega materiala – nevezana nosilna plast, pripeljanega iz kamnoloma Kamna Gorica. Sočasno z vgradnjo plasti so se opravljale tudi meritve za notranjo in zunanjo kontrolo. Po vgraditvi nevezane nosilne plasti je bila podlaga pripravljena za pripustitev prometa in dela so se lahko prestavila na sosednji vozni pas.

#### 8.4 Zaključno poročilo

Na podlagi meritev notranje in zunanje kontrole sta bili izdani tudi zaključni poročili obeh kontrol. V nadaljevanju naloge bom predstavil in analiziral poročilo Marka Bebra iz Inštituta za gradbene materiale – IGMAT d.d.: Zaključno poročilo o zunanji kontroli zemeljskih del in nevezane nosilne plasti (2012b). Poročilo notranje kontrole - Poročilo o kontroli nosilnosti in stanja podlage iz nevezanega materiala, izvedeno s strani laboratorija Gorenjske gradbene družbe d.d. (2012), mi je služilo kot opora in podrobnejši vpogled v kvaliteto izvedbe, saj je bilo izvedeno večje število meritev. Na kemično stabiliziranih temeljnih tleh so bile izvedene meritve vlage in gostote z izotopsko sondo v skladu s TSC 06.711:2001 in dinamičnega deformacijskega modula v skladu s 06.720:2003. Na nevezani nosilni plasti je bila poleg omenjenih meritev izvedena še meritev statičnega deformacijskega modula prav tako v skladu s TSC 06.720:2003.

## 8.4.1 Kemično stabilizirana temeljna tla

### 8.4.1.1 Meritve vlage in gostote z izotopsko sondo

Meritve vlage in gostote so bile izvedene na šestih različnih točkah vzdolž stabilizirane plasti.

Rezultati so prikazani v preglednici 7.

Preglednica 7: Rezultati meritev vlage in gostote z izotopsko sondo na stabilizirani plasti (Bebar, 2012b, str. 4)

Zap. št.	Delovni nalog	Datum merjenja	Področje merjena	Lokacija merjenja	$W_{\text{nar}}$ %	$\rho_{\text{suha}}$ kg/m <sup>3</sup>	Gostota %	$\rho_{\text{d,max}}$ kg/m <sup>3</sup>	Vrsta materiala
1	906-G-12	26.6.2012	P8-P18 L	P10+5mL	8,2	2131	101,6	2098	stabilizirana plast
2	906-G-12	26.6.2012	P8-18 L	P12+1mL	7,5	2088	99,5	2098	stabilizirana plast
3	906-G-12	26.6.2012	P8-P18 L	P13+10mL	7,8	2095	99,9	2098	stabilizirana plast
4	906-G-12	26.6.2012	P8-18 L	P14+8mL	7,1	2105	100,3	2098	stabilizirana plast
5	906-G-12	26.6.2012	P8-P18 L	P16+5mL	8,2	2111	100,6	2098	stabilizirana plast
6	906-G-12	26.6.2012	P8-18 L	P17+12mL	6,5	2106	100,4	2098	stabilizirana plast
Število rezultatov:					6	6	6		
Povprečna vrednost:					7,6	2106	100,4		
Standardni odklon:					0,7	14,8	0,7		
Minimalna vrednost:					6,5	2088	99,5		
Maksimalna vrednost:					8,2	2131	101,6		

Po zahtevah, navedenih v knjigi Popis del in posebni tehnični pogoji za zemeljska dela in temeljenje – knjiga 3 (1989), tabela 2.2, mora zgoščenost kemično stabiliziranih zemljin dosegati vsaj 98% glede na gostoto materiala po standardnem postopku po Proctorju - spp. Omenjena zahteva se nanaša na poprečno vrednost vseh meritev, pri čemer pa najnižja ne sme biti manjša za več kot 3% od zahtevane vrednosti.

Iz rezultatov je razvidno, da povprečna vrednost 100,4% dosegajo zahtevano 98% zgoštev. Tudi minimalna vrednost, ki znaša 99,5%, ustreza pogoju o najnižji vrednosti.

#### 8.4.1.2 Meritve dinamičnega deformacijskega modula

Vzporedno so bili poleg meritev vlage in gostote merjeni tudi dinamični deformacijski moduli na planumu stabiliziranih tal. V preglednici 8 so prikazani rezultati meritev  $E_{din}$ .

Preglednica 8: Rezultati meritev dinamičnega deformacijskega modula na stabilizirani plasti (Bebar, 2012b, str. 4)

Zap. št.	Delovni nalog	Datum merjenja	Področje merjena	Lokacija merjenja	$E_{din}$ Mpa	Vrsta materiala
1	906-G-12	26.6.2012	P8-P18 L	P10+5mL	35,8	stabilizirana plast
2	906-G-12	26.6.2012	P8-18 L	P12+1mL	40,6	stabilizirana plast
3	906-G-12	26.6.2012	P8-P18 L	P13+10mL	42,8	stabilizirana plast
4	906-G-12	26.6.2012	P8-18 L	P14+8mL	44,5	stabilizirana plast
5	906-G-12	26.6.2012	P8-P18 L	P16+5mL	48,9	stabilizirana plast
6	906-G-12	26.6.2012	P8-18 L	P17+12mL	46,5	stabilizirana plast
					Število rezultatov:	6
					Povprečna vrednost:	43,2
					Standardni odklon:	4,6
					Minimalna vrednost:	35,8
					Maksimalna vrednost:	48,9

Upoštevamo pogoj  $E_{din} \sim E_{v2}/2$ . S pomočjo tega lahko iz povprečne vrednosti  $E_{din}$  izračunamo povprečno vrednost  $E_{v2}$ , ki torej znaša 86,4 MPa. V tehnični specifikaciji za ceste 06.520:2008 pa se nahaja preglednica 9, ki prikazuje informativne korelacije vrednosti nosilnosti za značilne materiale v podlagi/posteljici.

Preglednica 9: Korelacije vrednosti nosilnosti za značilne materiale v podlagi (TSC 06.520:2009, 2009, str. 5)

Klasifikacija materiala po USCS	Vrednost CBR <sub>2</sub> %	Modul stisljivosti M <sub>E</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	Deformacijski modul E <sub>v2</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
ML, MH, CH	3	4	15
CL, SC	5	8	20
GC, SM	7	13	45
GC, SP	10	20	60
SW, GM	15	35	80
GP, GW	20	50	100

Iz preglednice informativnih korelacij je moč oceniti, da dobljene vrednosti  $E_{v2}$  ustrezajo vrednostim CBR<sub>2</sub>, ki presegajo 15 %.

Pri izvedbi predhodnih raziskav je na vzorcih zemljine vrednost CBR<sub>2nar</sub> znašala 3,9 %, vrednost CBR<sub>27dni</sub> stabilizirane zemljine s 5 m.-% elektrofiltrskega pepela pa 15,4 %. S stabilizacijo temeljnih tal smo torej uspeli dvigniti CBR do predpostavljene vrednosti, določene s predhodnimi raziskavami.

## 8.4.2 Nevezana nosilna plast

### 8.4.2.1 Meritve vlage in gostote z izotopsko sondo

Meritve vlage in gostote so bile, podobno kot pri stabiliziranih temeljnih tleh, opravljene z izotopsko sondo v skladu s TSC 06.711:2001. Izvedene so bile na štirih različnih točkah vzdolž stabilizirane podlage. Rezultati so prikazani v preglednici 10.

Preglednica 10: Rezultati meritev vlage in gostote z izotopsko sondo na nevezani nosilni plasti (Bebar, 2012b, str. 5)

Zap. št.	Delovni nalog	Datum merjenja	Področje merjena	Lokacija merjenja	$W_{nar}$ %	$\rho_{suha}$ kg/m <sup>3</sup>	Gostota %	$\rho_{d,max}$ kg/m <sup>3</sup>	Vrsta materiala
1	1113-G-12	24.7.2012	P1-P28	P2+6m	3,5	2318	98,9	2344	drobljenec
2	1113-G-12	24.7.2012	P1-P28	P10+5m	0,4	2315	98,8	2344	drobljenec
3	1113-G-12	24.7.2012	P1-P28	P15+7m	3,2	2310	98,5	2344	drobljenec
4	1113-G-12	24.7.2012	P1-P28	P22+3m	3,0	2330	99,4	2344	drobljenec
Število rezultatov:					4	4	4		
Povprečna vrednost:					2,5	2318	98,9		
Standardni odklon:					1,4	8,5	0,4		
Minimalna vrednost:					0,4	2310	98,5		
Maksimalna vrednost:					3,5	2330	99,4		

Za nevezano nosilno plast so zahteve po zgoščenosti navedene v TSC 06.200:2003 in v knjigi Popis del in posebni tehnični pogoji za zemeljska dela in temeljenje – knjiga 3 (1989), tabela 2.3. Zahtevana zgoščenost glede na gostoto materiala po modificiranem Proctorjevem postopku – MPP znaša 98%. Omenjena zahteva se nanaša na poprečno vrednost vseh meritev, pri čemer pa najnižja ne sme bit manjša za več kot 3% od zahtevane vrednosti.

Iz rezultatov je razvidno, da povprečna vrednost 98,9% dosega zahtevano 98% zgoštev. Tudi minimalna vrednost, ki znaša 98,5%, ustreza pogoju za najnižjo vrednost.

### 8.4.2.2 Meritve dinamičnega deformacijskega modula

Dinamični deformacijski modul je bil izmerjen v skladu s TSC 06.720:2003 na petih različnih točkah. Rezultati merjen so prikazani v preglednici 11.

Preglednica 11: Rezultati meritev dinamičnega deformacijskega modula na nevezani nosilni plasti (Bebar, 2012b, str. 6)

Zap. št.	Delovni nalog	Datum merjenja	Področje merjena	Lokacija merjenja	$E_{din}$ Mpa	Vrsta materiala
1	1113-G-12	24.7.2012	P1-P30	P2+9m	56,1	drobljenec
2	1113-G-12	24.7.2012	P1-P30	P10+3m	62,4	drobljenec
3	1113-G-12	24.7.2012	P1-P30	P15+10m	60,1	drobljenec
4	1113-G-12	24.7.2012	P1-P30	P19+8m	58,6	drobljenec
5	1113-G-12	24.7.2012	P1-P30	P23+4m	59,3	drobljenec
Število rezultatov:					5	
Povprečna vrednost:					59,3	
Standardni odklon:					2,3	
Minimalna vrednost:					56,1	
Maksimalna vrednost:					62,4	

V TSC 06.200:2003 so v preglednici 2 podane zahtevane vrednosti deformacijskih modulov na nevezanih nosilnih plasteh (Preglednica 12).

Preglednica 12: Zahtevane vrednosti deformacijskih modulov na nevezanih nosilnih plasteh (TSC 06.200:2003, 2003, str. 11)

Vrsta zmesi kamnitih zm	Prometna obremenitev					
	težka			srednja ali lahka		
	Zahtevane vrednosti					
	$E_{v2}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vd}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$E_{v2}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vd}$ (MN/m <sup>2</sup> )
- naravna	≥ 100	≤ 2,2	≥ 45	≥ 90	≤ 2,4	≥ 40
- drobljena ali mešana	≥ 120	≤ 2,0	≥ 55	≥ 100	≤ 2,2	≥ 45

Pri srednji prometni obremenitvi in vgrajenem drobljenem materialu mora dinamični deformacijski modul znašati vsaj 45 MPa. Iz rezultatov meritev je razvidno, da vse vrednosti izpolnjujejo omenjeno zahtevo.

### 8.4.2.3 Meritve statičnega deformacijskega modula

Rezultati meritev statičnega deformacijskega modula na nevezani nosilni plasti so prikazani v preglednici 13.

Preglednica 13: Rezultati meritev statičnega deformacijskega modula na nevezani nosilni plasti (Bebar, 2012b, str. 6)

Zap. Št.	Delovni nalog	Datum merjenja	Področje merjena	Lokacija merjenja	$E_{vs1}$ MPa	$E_{vs2}$ MPa	$E_{vs2}/E_{vs1}$	Vrsta materiala
1	1113-G-12	24.7.2012	P1-P30	P27+15m	39,9*	149,8	3,8	drobljenec
2	1113-G-12	24.7.2012	P1-P30	P4+5m	51,3	157,4	3,1	drobljenec
Število rezultatov:					2	2		
Povprečna vrednost:					45,6	153,6		
Minimalna vrednost:					39,9	149,8		
Maksimalna vrednost:					51,3	157,4		

\*Opomba:  $E_{vs1}$  nižji od zahteve, naročeno dodatno uvaljanje. Rezultat notranje kontrole 26.07.2012 skladen z zahtevo.

Podobno kot v prejšnji točki lahko iz tabele, objavljene v TSC 06.200:2003, odčitamo zahtevano vrednost statičnega deformacijskega modula za nevezane nosilne plasti. Pri srednji prometni obremenitvi in vgrajenem drobljenem materialu mora deformacijski modul znašati vsaj 100 MPa. Za razmerje  $E_{v2}/E_{v1}$  pa je podana omejitev:  $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$ . Ta zahteva sicer ni izpolnjena, saj sta zgornji razmerji bistveno večji, vendar po TSC 06.200:2003 velja: »Navedeno razmerje deformacijskih modulov  $E_{v2}/E_{v1}$  ni merodajno za oceno nosilnosti plasti, če znaša vrednost  $E_{v1}$  več kot 50% zahtevane vrednosti  $E_{v2}$ .« (TSC 06.200:2003, 2003, str. 11).

Pri prvi meritvi se je izkazalo, da je  $E_{vs1}$  nižji od zahtevanega, zato je bilo naročeno dodatno uvaljanje. Rezultati notranje kontrole, izvedene 26.7.2012, kažejo, da je bilo z dodatnim uvaljanjem zadoščeno pogojem. Izmerjen deformacijski modul  $E_{vs1}$  znaša 67,5 MPa.

Po dodatnih preiskavah in rezultatih notranje kontrole lahko ugotovimo, da vse vrednosti ustrezajo zahtevam.

### 8.4.3 Laboratorijske preiskave

Preglednica 14: Laboratorijske preiskave (Bebar, 2012b, str. 7)

Zap št.	Datum odvzema	Delovni nalog	Lokacija odvzema	Vrsta materiala	$W_{nar}$ m.-%	$W_{opt}$ m.-%	$\rho_{d,max}$ kg/m <sup>3</sup>	CBR1 <sub>nar</sub> takoj %	CBR1 <sub>nar</sub> 7dni %	CBR2 <sub>nar</sub> 7dni %
Stabilizirana										
1	19.6.2012	0232-GEO-12	P17 desno	tla	7,5	7,5	2098	21,6	35,4	32,4

Preiskave, opravljene dne 19. 6. 2012, kažejo, da nam je s stabilizacijo uspelo ustrezno izboljšati temeljna tla. Po predhodnih raziskavah naj bi z dodatkom 5 m.-% elektrofiltrskega pepela dvignili CBR2<sub>7dni</sub> na 15,4 %. Iz preiskav pa je razvidno, da smo z izvedbo uspeli CBR2<sub>7dni</sub> dvigniti na 32,4 % (Preglednica 14).

### 8.4.4 Zaključek

Rezultati meritev in preiskav notranje ter zunanje kontrole kažejo, da nam je s stabilizacijo uspelo izboljšati temeljna tla, ki so zagotavljala primerno nosilnost za izgradnjo voziščne konstrukcije.



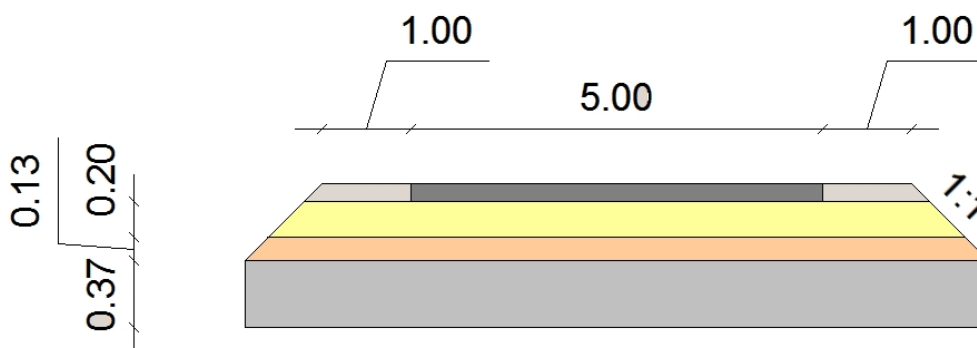
## 8.5 Stroškovna analiza

Globoka reciklaža se izvaja kot alternativa zamenjavi plasti voziščne konstrukcije, zato je smiselno primerjati tudi stroške pri obeh vrstah rekonstrukcije. Poleg varovanja okolja in racionalnejše rabe materialov je cilj reciklaže tudi optimizacija stroškov, zato pričakujemo, da se bo reciklaža izkazala kot ugodnejša varianta.

Kot je bilo že omenjeno, je projekt poleg rekonstrukcije ceste obsegal tudi sanacijo zidov, zato iz popisa količin in končne obračunske situacije ni bilo mogoče pridobiti točnih podatkov o obsegu del in količinah uporabljenih materialov za obravnavan odsek. Da sem dobil natančnejše podatke o obsegu del, sem primerjavo izvedel na hipotetičnem primeru. Za obe vrsti rekonstrukcije sem najprej določil sestavo voziščne konstrukcije.

Sestava reciklirane voziščne konstrukcije je enaka, kot jo je predlagal IGMAT v poročilu o izvedbi predhodnih raziskav, z razliko, da debelina plasti iz asfaltne granulate in kamnitih zrn znaša 13 namesto 10 centimetrov (Slika 34):

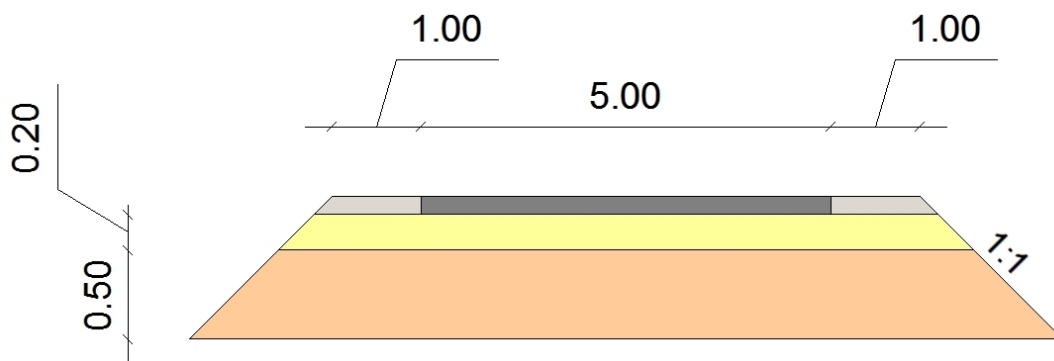
- 37 cm globoko stabilizirana plast temeljnih tal,
- plast iz asfaltne granulate in kamnitih zrn v debelini 13 cm,
- nevezana nosilna plast v debelini 20 cm.



Slika 34: Prerez reciklirane voziščne konstrukcije

Sestavo voziščne konstrukcije pri primeru klasične zamenjave pa sem nekoliko prilagodil, saj je bila po projektu predvidena zamenjava do globine 60 cm, ta globina pa ne ustreza zahtevam po zmrzlinško odpornem materialu do minimalne globine 70 cm. Nova sestava voziščne konstrukcije pri zamenjavi tako obsega (Slika 35):

- posteljica v debelini 50 cm,
- nevezana nosilna plast v debelini 20 cm.



Slika 35: Prerez voziščne konstrukcije pri zamenjavi

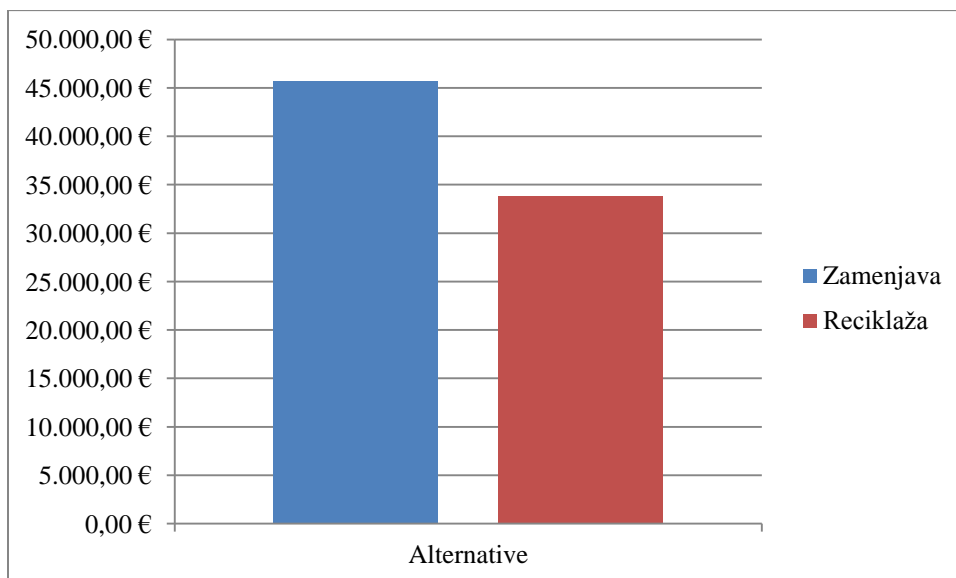
V ponudbah so primerjana dela in stroški omejeni na pripravo temeljnih tal in izgradnjo posteljice ter nevezane nosilne plasti za odsek dolžine 535 metrov. V obeh primerih bi bila potrebna izvedba asfaltnih plasti v enakih debelinah, zato sem jih iz primerjave izločil. Podatke o cenah posameznih postavk sem pridobil iz končne obračunske situacije za obravnavan projekt.

V preglednici 15 so prikazane cene posameznih del za obe tehnologiji:

Preglednica 15: Postavke in popis del

OPIS POSTAVKE	ENOTA	KOLIČINA	CENA/ENOTO	ZNESEK
<b>1. Reciklaža</b>				
Rezkanje asfaltne krovne plasti in tampona v skupni debelini 20 cm in odvoz na začasno deponijo na razdalji do 2km	m2	2675,00	3,77	10.084,75
Širok izkop vezljive zemljine - 3. kategorije - strojno z nakladanje	m3	917,95	1,32	1.211,70
Prevoz materiala na trajno deponijo	t	1944,22	1,94	3.771,80
Izboljšanje temeljnih tal vezljive zemljine - 3. kategorije z dodatkom 5% EF pepela	m3	1476,71	6,58	9.716,73
Izdelava plasti iz rezkanega asfalta in tampona v debelini 13 cm	m3	535,00	3,67	1.963,45
Izdelava nevezane nosilne plasti enakomerno zrnatega drobljenca iz kamnine v debelini 20 cm	m3	770,40	9,16	7.056,86
<b>SKUPAJ</b>				<b>33.805,29 €</b>
<b>2. Zamenjava</b>				
Porušitev in odstranitev asfaltne plasti v debelini 6 do 10 cm	m2	2675,00	0,84	2.247,00
Širok izkop vezljive zemljine - 3. kategorije - strojno z nakladanjem	m3	2883,65	1,32	3.806,42
Ureditev planuma temeljnih - 3. kategorije	m2	4494,00	0,49	2.202,06
Prevoz materiala na trajno deponijo	t	6107,57	1,94	11.848,69
Izdelava nevezane nosilne plasti gramoza v debelini do 50 cm	m3	2113,25	8,78	18.554,34
Izdelava nevezane nosilne plasti enakomerno zrnatega drobljenca iz kamnine v debelini do 20 cm	m3	770,40	9,16	7.056,86
<b>SKUPAJ</b>				<b>45.715,36 €</b>

Cenovna primerjava tehnologij je prikazana na spodnjem grafu (slika 36).



Slika 36: Cenovna primerjava tehnologij

Iz primerjave cen predračunov je razvidno, da je izvedba del z reciklažo ugodnejša za investitorja. Razlika v stroških izgradnje je 26 %. Največja razlika se pojavi pri stroških, povezanih z izkopom in odvozom materiala. Iz primerjave količin izkopa zemljine je razvidno, da postopek reciklaže obsega le približno 32 % izkopa materiala, ki je sicer potreben pri klasični zamenjavi. Manjša količina izkopa pogojuje manjše število prevozov na trajno deponijo in manjše število obratovalnih ur delovnih strojev, kar botruje zmanjšanju izpustov emisij v ozračje. Cene naftnih derivatov v zadnjem obdobju izredno naraščajo, zato je zmanjšanje števila prevozov ključnega pomena pri ekonomičnem obratovanju gradbišča.

## 8.6 Okoljevarstvena analiza

Glavni cilj zelenih javnih naročil in uporabe recikliranih materialov je skrb za okolje. S primerjavo cen obeh alternativ se je reciklaža izkazala za ugodnejšo kot klasična zamenjava voziščne konstrukcije, zato bom v nadaljevanju naloge poizkušal še ovrednotiti in primerjati vplive na okolje obeh variant. Že groba primerjava količin, potrebnih za izkop in potrebnega materiala za vgradnjo, kaže v prid reciklaže, zato pričakujem, da se bo reciklaža izkazala tudi za okolju prijaznejšo.

Pri primerjavi sem se osredotočil na porabo goriva in energije za vsako izmed variant, ki se razlikujeta tako v potrebni mehanizaciji kot tudi v številu prevozov in obratovalnih ur ter pripravi materiala. Potrebno število obratovalnih ur sem izračunal iz količin potrebnih, pri hipotetičnem primeru, obravnavanem v točki 8.5. Podatke o normativih za uporabljeno mehanizacijo, povprečni porabi goriva in porabi energije za pripravo materiala sem dobil v Cestnem podjetju Kranj in v kamnolomu Kamna Gorica.

Potek del sem razdelil na štiri glavne sklope:

- transport mehanizacije,
- obratovanje mehanizacije,
- transport materiala,
- priprava materiala.

Pri vsakem sklopu sta obravnavani in primerjani obe varianti sanacije. Vsa uporabljena mehanizacija deluje na dizelsko gorivo.

Izpusti emisij CO<sub>2</sub> v ozračje so bili izračunani po naslednjem postopku: 1 liter dizelskega goriva tehta 835 gramov. Dizelsko gorivo sestavlja 86,2 m.-% ogljika, kar pomeni, da se v enem litru nahaja 720 gramov ogljika. Če želimo, da ves ogljik izgori v ogljikov dioksid, potrebujemo 1920 gramov kisika. Iz tega pa sledi, da pri izgorevanju enega litra goriva nastane 2640 gramov ogljikovega dioksida.

$$720 + 1920 = 2640 \text{ gramov CO}_2 / \text{liter dizelskega goriva}$$

Na spletni strani Slovenske fundacije za trajnostni razvoj je zapisano, da v Sloveniji pri proizvodnji 1 kWh v ozračje izpustimo približno 0,55 kg ogljikovega dioksida (2013). Ta podatek sem upošteval pri izračunu izpustov pri pripravi materiala v kamnolomu.

### 8.6.1 Transport mehanizacije

Na gradbišče je vedno potrebno pripeljati mehanizacijo, ki je potrebna za obratovanje in izvedbo predvidenih del. Vsa mehanizacija je bila pripeljana iz Kranja, kjer ima podjetje v lasti parkirne površine za delovne stroje. V izračunu je bila upoštevana tudi selitev mehanizacije po končani gradnji nazaj v podjetje. Transportna razdalja Kranj-Jesenovec-Kranj torej znaša 64 kilometrov.

Večina strojev, potrebnih pri reciklaži, je bila pripeljana na prikolici, pri čemer je bilo za reciklator WR 2500 S potrebno dodatno spremstvo posebno označenega osebnega avtomobila. Traktor za posip in cisterna z vodo sta bila pripeljana samostojno.

Preglednica 16: Izračun izpustov CO<sub>2</sub> pri transportu mehanizacije, potrebne pri reciklaži

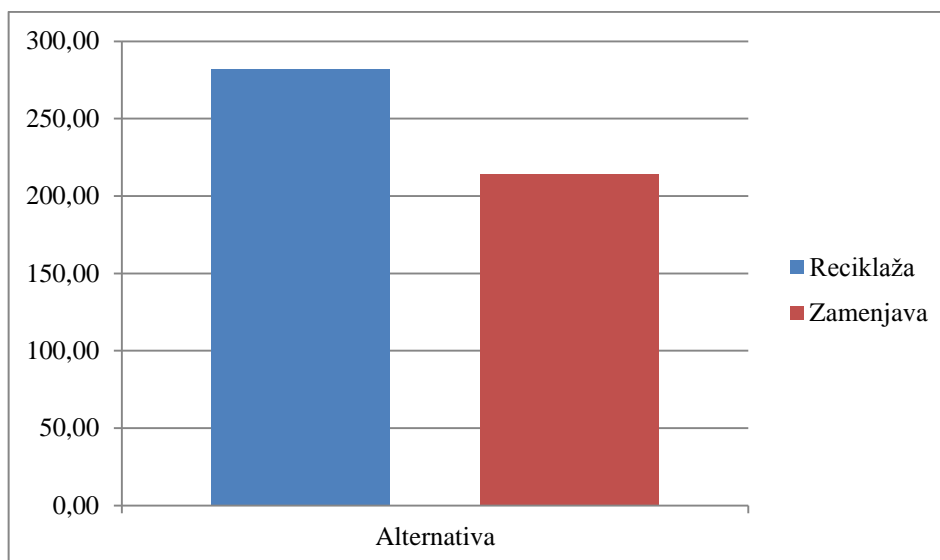
	Način transporta	Število kilometrov	Poraba goriva [l/100 km]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Traktor – posipalnik</b>	samostojno	64	5,2	8,79
<b>Reciklator WR 2500</b>	prikolica + spremstvo	64	42,2	71,30
<b>Spremstvo</b>	osebni avto	64	6,5	10,98
<b>Cisterna z vodo</b>	samostojno	64	23,58	39,84
<b>Valjar Bomag 213</b>	prikolica	64	42,2	71,30
<b>Greder Champion</b>	prikolica	64	42,2	71,30
<b>Rovokopač JCB 4CX</b>	prikolica	64	5,11	8,63
<b>Skupaj</b>				<b>282,15</b>

Pri klasični zamenjavi bi bilo potrebne bistveno manj mehanizacije, pri čemer bi bila vsa pripeljana na prikolici.

Preglednica 17: Izračun izpustov CO<sub>2</sub> pri transportu mehanizacije, potrebne pri zamenjavi

	Način transporta	Število kilometrov	Poraba goriva [l/100 km]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Bager Volvo 240</b>	prikolica	64	42,2	71,30
<b>Valjar Bomag 213</b>	prikolica	64	42,2	71,30
<b>Greder Champion</b>	prikolica	64	42,2	71,30
<b>Skupaj</b>				<b>213,90</b>

V preglednicah 16 in 17 je prikazana vsa potrebna mehanizacija za obe vrsti alternativ, način transporta in poraba goriva. V zadnjem stolpcu so po formuli, navedeni v točki 8.6 izračunani izpusti emisij CO<sub>2</sub> v okolje.



Slika 37: Primerjava transportov mehanizacije

Iz diagrama (Slika 37) lahko razberemo, da pri transportu mehanizacije na gradbišče za reciklažo nastane več izpustov ogljikovega dioksida v okolje. Rezultat ni presenetljiv, saj vemo, da je tehnologija reciklaže kompleksnejša in zahteva večje število delovnih strojev na gradbišču.

### 8.6.2 Obratovanje mehanizacije

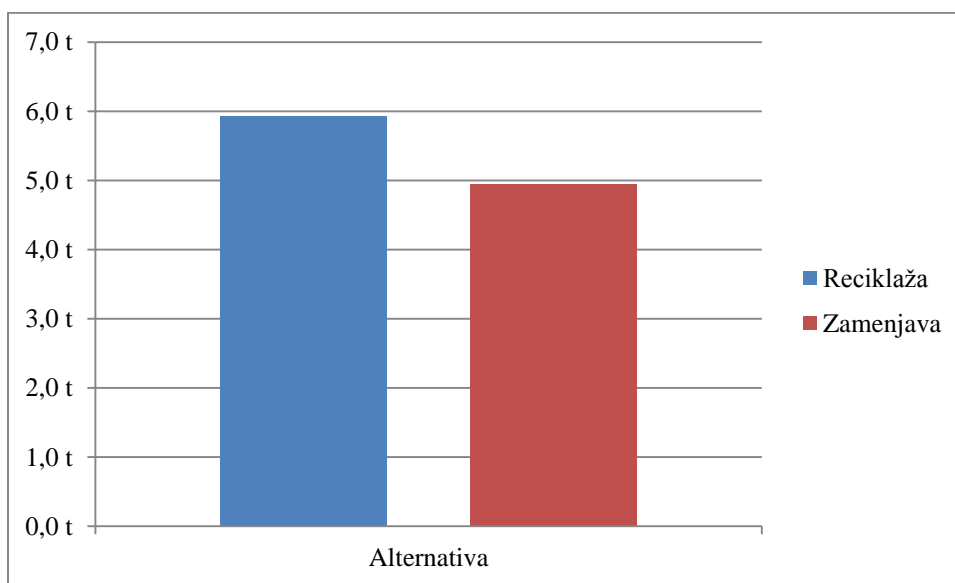
V preglednicah 18 in 19 so prikazane obratovalne ure posameznih strojev, potrebnih za rekonstrukcijo obravnavanega odseka. Potreben čas obratovanja sem izračunal iz popisa del in normativov, ki sem jih pridobil v komerciali Cestnega podjetja Kranj.

Preglednica 18: Obratovalne ure, potrebne za izvedbo reciklaže

	Število obratovalnih ur	Poraba goriva [l/uro]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Traktor - posipalnik</b>	6	8,63	136,70
<b>Reciklator WR 2500</b>	36	42,56	4044,90
<b>Cisterna z vodo</b>	6	10	158,40
<b>Valjar Bomag 213</b>	36	6,91	656,73
<b>Greder Champion</b>	36	6,47	614,91
<b>Rovokopač JCB 4CX</b>	24	5,11	323,77
		<b>Skupaj</b>	<b>5935,41</b>

Preglednica 19: Obratovalne ure, potrebne za izvedbo zamenjave

	Število obratovalnih ur	Poraba goriva [l/uro]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Bager Volvo 240</b>	83	13,19	2890,19
<b>Valjar Bomag 213</b>	58	6,91	1058,06
<b>Greder Champion</b>	58	6,47	990,69
		<b>Skupaj</b>	<b>4938,94</b>

Slika 38: Primerjava izpustov CO<sub>2</sub> nastalih pri obratovanju mehanizacije

Že iz primerjave izpustov emisij zaradi transporta mehanizacije na gradbišče smo lahko sklepali, da bo zaradi kompleksnosti tehnologije in večjega števila strojev reciklaža tudi v tej točki okolju manj prijazna kot pa klasična zamenjava. Izpusti, ki nastanejo pri postopku reciklaže, znašajo 5,9 t CO<sub>2</sub>, medtem ko so izpusti pri postopku zamenjave za približno tono manjši (Slika 38). Pri transportu in pripravi materiala, obravnavanih v nadaljevanju, pa lahko pričakujemo, da se bo reciklaža izkazala kot boljša varianta.



### 8.6.3 Transport materiala

Za transport materiala je bila uporabljena kombinacija 3-osnih in 4-osnih tovornjakov. Polno obremenjeni 3-osnik lahko prepelje približno 10 m<sup>3</sup> materiala, polno obremenjeni 4-osnik pa 12 m<sup>3</sup>. Z vidika ekonomičnosti bi bilo najbolj optimalno za prevoze uporabiti samo 4-osne tovornjake, saj pri minimalno večji porabi prepeljemo 2 m<sup>3</sup> več materiala, vendar so sredstva podjetja pogojevala, da je bilo po večini na gradbišču prisotno enako število 3-osnih in 4-osnih tovornjakov. Posledično je bila v izračunu upoštevana enakomerna porazdeljenost voženj med obema vrstama vozil. Pri izračunu sem upošteval tudi razliko v porabi goriva pri polno obremenjenem in praznem tovornjaku. Analizirane so bile tri možne variante: dve za reciklažo in klasična zamenjava.

#### 1. Izvedba z reciklažo, deponija pri naselju Prtovč

Pri naselju Prtovč se je nahajala trajna deponija za izkop, ki je bila pridobljena z agromelioracijo. Oddaljenost deponije od gradbišča je bila 9,5 kilometra.

Izhodišča:

- deponiranje asfalta in nevezane nosilne plasti na gradbišču – oddaljenost 2 km,
- odvoz izkopa na deponijo Prtovč v oddaljenosti 9,5 km,
- transport pepela iz TE Šoštanj (transportna razdalja TE Šoštanj-Jesenovec-TE Šoštanj znaša 258 km),
- transport asfalta nazaj na mesto ponovne vgradnje – oddaljenost 2 km,
- transport tamponskega drobljenca iz kamnoloma Kamna Gorica – oddaljenost 51,1 km.

V preglednici 20 so izračunani izpusti CO<sub>2</sub> pri transportu materiala za izvedbo reciklaže z deponijo Prtovč.

Preglednica 20: Izpusti CO<sub>2</sub> pri transportu materiala za izvedbo reciklaže z deponijo Prtovč

	Število km poln	Poraba goriva poln [l/100km]	Število km prazen	Poraba goriva prazen [l/100km]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Kamion 3 osi</b>	2236,40	44,39	2236,40	39,39	4946,45
<b>Kamion 4 osi</b>	2334,60	45,31	2334,60	40,31	5277,06
<b>Prevoz pepela iz TE</b>	258	44,39	129	39,39	436,50
				<b>Skupaj</b>	<b>10660,00</b>

## 2. Izvedba z reciklažo, deponija v Bistrici pri Naklem

Večina gradbišč podjetja vozi izkop na deponijo v Bistrico pri Naklem, kjer se nahaja uradna deponija Cestnega podjetja Kranj. Ker bi v velikem številu primerov lahko prišlo do tega, da bi bilo odvečni material potrebno voziti prav v Bistrico, sem obravnaval tudi navidezni primer, kjer se deponija nahaja v oddaljenosti 39,4 kilometra (Preglednica 21).

Izhodišča:

- deponiranje asfalta in nevezane nosilne plasti na gradbišču – oddaljenost 2 km,
- odvoz izkopa na deponijo Bistrica pri Naklem v oddaljenosti 39,4 km,
- transport pepela iz TE Šoštanj (Transportna razdalja TE Šoštanj-Jesenovec-TE Šoštanj znaša 258 km),
- transport asfalta nazaj na mesto ponovne vgradnje – oddaljenost 2 km,
- transport tamponskega drobljenca iz kamnoloma Kamna Gorica – oddaljenost 51,1 km,
- potem ko tovornjak odloži izkop v Bistrici, gre naravnost v Kamno Gorico po tamponski drobljenec. S tem se zmanjša število kilometrov, ki jih prevozi prazen tovornjak.

Preglednica 21: Izpusti CO<sub>2</sub> pri transportu materiala za izvedbo reciklaže z deponijo v Bistrici

	Število km poln	Poraba goriva poln [l/100km]	Število km prazen	Poraba goriva prazen [l/100km]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Kamion 3 osi</b>	3492,2	44,39	813,00	39,39	4937,93
<b>Kamion 4 osi</b>	3590,40	45,31	753,60	40,31	5096,75
<b>Prevoz pepela iz TE</b>	129	44,39	129	39,39	285,32
				<b>Skupaj</b>	<b>10320,00</b>

## 3. Klasična zamenjava, deponija v Bistrici pri Naklem

Zaradi velike količine izkopa bi bila deponija pri naselju Prtovč premajhna, zato bi bilo potrebno celoten izkop odpeljati v Bistrico pri Naklem. Če bi bila izvedena klasična zamenjava voziščne konstrukcije, bi bilo potrebno tudi obstoječo asfaltno in nevezano nosilno plast deponirati na uradni deponiji (Preglednica 22).

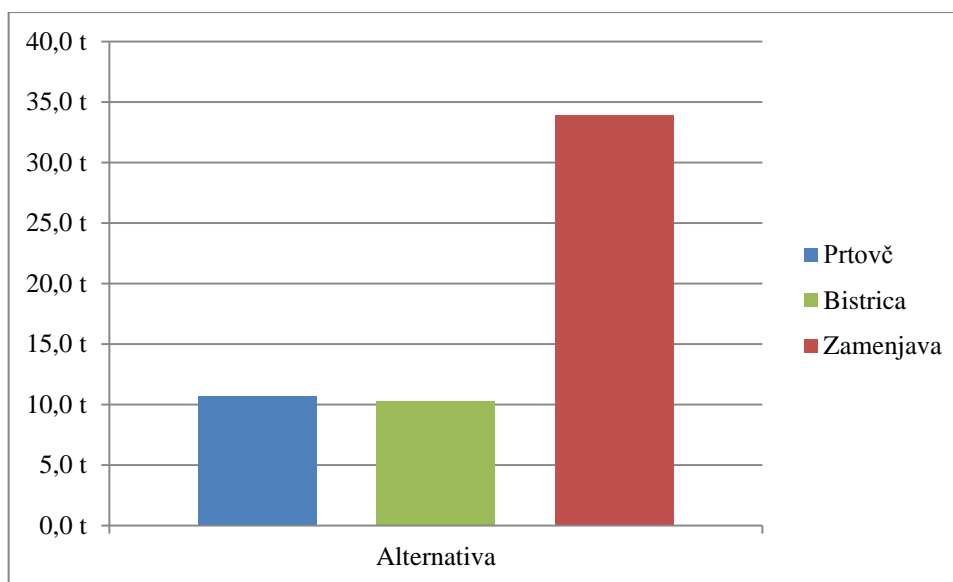
Izhodišča:

- odvoz obstoječega asfalta, nevezane nosilne plasti in ostalega izkopa na deponijo Bistrica pri Naklem v oddaljenosti 39,4 km,
- transport tamponskega drobljenca iz kamnoloma Kamna Gorica – oddaljenost 51,1 km,
- potem ko tovornjak odloži izkop v Bistrici, gre naravnost v Kamno Gorico po tamponski drobljenec. S tem se zmanjša število kilometrov, ki jih prevozi prazen tovornjak.

Preglednica 22: Izpusti CO<sub>2</sub> pri transportu materiala za izvedbo zamenjave z deponijo v Bistrici

	Število km poln	Poraba goriva poln [l/100km]	Število km prazen	Poraba goriva prazen [l/100km]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Kamion 3 osi</b>	12458,2	44,39	2056,60	39,39	16738,36
<b>Kamion 4 osi</b>	12328,30	45,31	2005,50	40,31	16881,14
<b>Prevoz pepela iz TE</b>	129	44,39	129	39,39	285,32
				<b>Skupaj</b>	<b>33904,82</b>

Za vsakega izmed opisanih primerov sem izračunal izpuste CO<sub>2</sub> v okolje. Rezultati so podani v grafu (slika 39).



Slika 39: Primerjava izpustov CO<sub>2</sub> pri transportu materiala

Nastali izpusti CO<sub>2</sub> pri transportu materiala za postopek reciklaže znašajo 10,7 t z deponijo v Prtovču, 10,3 t z deponijo v Bistrici in 33,9 t za postopek klasične zamenjave, kjer se deponija prav tako nahaja v Bistrici.

Pričakovano so izpusti zaradi transporta materiala pri obeh variantah reciklaže bistveno manjši kot pri zamenjavi. Nekoliko presenetljiv pa je rezultat primerjav možnosti pri reciklažah. Izkazalo se je, da je bila uporabljena varianta slabša izmed možnosti in da bi z vidika porabe goriva in posledično tudi izpustov v okolje privarčevali, če bi izbrali drugo možnost.

Zaradi relativno velike razdalje do deponije v Bistrici in zajetne količine izkopa bi za nemoteno obratovanje gradbišča potrebovali večje število tovornjakov, kot jih je podjetje lahko zagotovilo.

Premajhno število tovornjakov pa bi posledično povzročilo zastoj del na gradbišču in po vsej verjetnosti tudi zamudo pri dokončanju projekta, zato je bilo racionalnejše uporabiti deponijo Prtovč.

### 8.6.4 Priprava materiala

Pri vodji kamnoloma Kamna Gorica sem pridobil podatke o povprečni mesečni porabi kilovatnih ur, ki so potrebne za obratovanje kamnoloma in podatke o količinah pripravljene drobljenca. Iz omenjenih podatkov sem lahko izračunal, da je za pripravo 1 m<sup>3</sup> drobljenca potrebnih 2,9 kWh.

Na spletni strani Slovenske fundacije za trajnostni razvoj je zapisano, da povprečna emisija CO<sub>2</sub> na kilovatno uro v Sloveniji znaša 0,55 kg. Vrednost se nanaša na petletno povprečje od leta 2002 do leta 2006 (2013).

Iz omenjenih podatkov in količin potrebnega drobljenca, lahko na enostaven način izračunamo izpuste CO<sub>2</sub> (Preglednici 23 in 24).

Preglednica 23: Izpusti emisij CO<sub>2</sub> pri pripravi materiala za reciklažo

	Količina materiala [m <sup>3</sup> ]	Poraba energije [kWh/m <sup>3</sup> ]	Poraba [kWh]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Tampon</b>	770,40	2,90	2234	1228,79
			<b>Skupaj</b>	<b>1228,79</b>

Preglednica 24: Izpusti emisij CO<sub>2</sub> pri pripravi materiala za zamenjavo

	Količina materiala [m <sup>3</sup> ]	Poraba energije [kWh/m <sup>3</sup> ]	Poraba [kWh]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Posteljica</b>	2113,25	2,90	6128	3370,63
<b>Tampon</b>	770,40	2,90	2234	1228,79
			<b>Skupaj</b>	<b>4599,42</b>

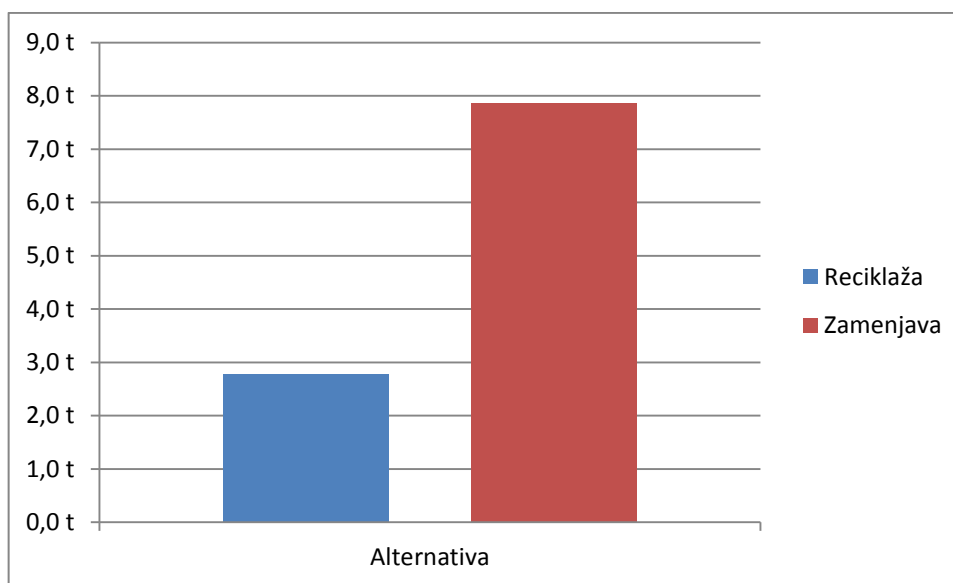
Preden se material zdrobi v manjše frakcije ga je potrebno naložiti na demper in ga prepeljati do drobilnice. Novo frakcijo materiala se nato naloži na tovornjak in odpelje na gradbišče. Pri teh operacijah pa znova nastajajo novi izpusti, zato sem izpuste demperja in nakladalnikov upošteval v preglednicah 25 in 26.

Preglednica 25: Izpusti demperjev in nakladalnikov pri pripravi materiala za postopek reciklaže

	Število obratovalnih ur	Poraba goriva [l/uro]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Hitachi ZX 280</b>	9	25	561,00
<b>Demper Volvo</b>	17	18	807,84
<b>Fiat Kobelco 270</b>	5	13,88	183,22
		<b>Skupaj</b>	<b>1552,06</b>

Preglednica 26: Izpusti demperjev in nakladalnikov pri pripravi materiala za postopek zamenjave

	Število obratovalnih ur	Poraba goriva [l/uro]	Izpusti CO <sub>2</sub> [kg]
<b>Hitachi ZX 280</b>	18	25	1188,00
<b>Demper Volvo</b>	36	18	1710,72
<b>Fiat Kobelco 270</b>	10	13,88	366,43
		<b>Skupaj</b>	<b>3265,15</b>

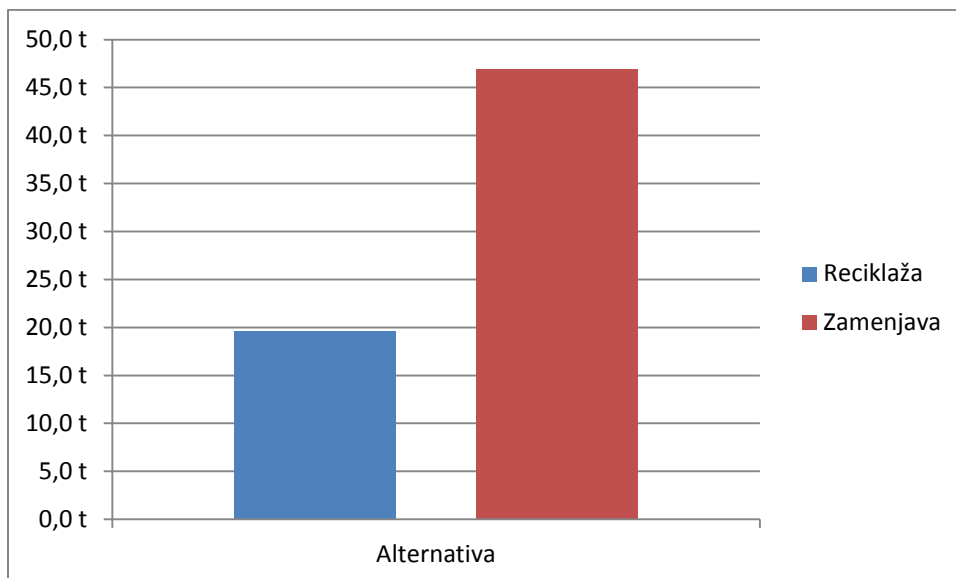


Slika 40: Primerjava izpustov pri pripravi novega materiala

Že iz primerjave količin potrebnih materialov pri obeh postopkih lahko logično sklepamo, da bodo izpusti pri postopku reciklaže ustrezno manjši, zato rezultat ni presenetljiv (Slika 40). Skupni izpusti priprave materiala za postopek reciklaže znašajo 2,8 t, medtem ko pri pripravi materiala za klasično zamenjavo nastane 7,9 t izpustov CO<sub>2</sub>.

### 8.6.5 Primerjava rezultatov

Izkazalo se je, da med transportom mehanizacije, potrebne za postopek zamenjave, nastane nekoliko manj emisij, ampak lahko rečemo, da so izpusti pri transportu strojev približno enaki, saj razlika predstavlja zelo majhen delež celotnega onesnaževanja ozračja zaradi rekonstrukcije cestnega odseka. Izpusti, nastali pri obratovanju mehanizacije, so pri reciklaži večji zaradi kompleksnosti tehnologije in uporabe večjega števila strojev. Omenjena tehnologija pa zahteva bistveno manjše količine izkopa in pripravo novega materiala, zato pri transportu in pripravi materiala nastane bistveno manj CO<sub>2</sub>.

Slika 41: Skupna količina izpustov v tonah CO<sub>2</sub>

Skupna vsota emisij pokaže, da je z uporabo reciklaže nastalo 19,7 t CO<sub>2</sub>, pri izvedbi enakega odseka pa bi z uporabo klasične zamenjave nastalo kar 46,9 t CO<sub>2</sub> (Slika 41). V obravnavanem primeru smo tako z uporabo recikliranih materialov zmanjšali izpuste emisij CO<sub>2</sub> v ozračje za 42 %.

## **9 PREDNOSTI IN SLABOSTI HLADNE RECIKLAŽE Z ELEKTROFILTRSKIM PEPELOM**

### **Ekonomičnost**

Reciklaža predstavlja poceni način za izboljšanje nosilnosti temeljnih tal. Primerjava s klasično zamenjavo pa je pokazala, da je tudi izvedba celotne sanacije cenejša. Zaradi velikih delovnih hitrosti je izvedba reciklaže hitrejša, kar pomeni krajši čas izvedbe projekta in krajši vpliv omejitve prometa.

### **Varovanje okolja**

V okoljevarstveni analizi je nazorno prikazana primerjava med sanacijo s klasično zamenjavo in reciklažo. S stabilizacijo obstoječih materialov zmanjšamo število potrebnih prevozov izkopa in izognemo se iskanju primerne prostora za deponiranje. Potrebna je priprava manjših količin novega materiala za vgradnjo, kar je pomembno za ohranjanje naravnih virov. Vse to pa vpliva na zmanjšanje izpustov emisij CO<sub>2</sub> v ozračje.

### **Izboljšana vgradljivost materialov**

Z dodatkom elektrofiltrskega pepela povečamo nosilnost peščenim temeljnim tlom. Po prehodu reciklatorja dobimo homogeno plast, ki je obstojnejša proti zunanjim vplivom.

### **Manjši vpliv na promet**

Pri izvajanju reciklaže lahko znatno zmanjšamo vpliv na udeležence v prometu. Reciklažni niz lahko nemoteno obratuje le na enem voznem pasu, zato je mogoče promet urediti pod polovično zaporo. Manjše število prevozov, ki so potrebni pri reciklaži, pomeni manjše obremenjevanje cest in oviranje prometa zaradi počasnejših tovornih vozil.

### **Zahtevnost**

Poleg vseh prednosti pa ima reciklaža tudi slabosti, ki se skrivajo predvsem v kompleksni tehnologiji, ki za pravilno uporabo in kvalitetno izvedbo zahteva veliko izkušenj. Potrebna oprema je draga. Pred izvedbo je potrebno izvesti poglobljene terenske in laboratorijske preiskave o ustreznosti in količini veziva. Samo vgradnjo pa lahko močno otežijo tudi vremenske razmere: veter lahko zajame večje količine pepela in ga raznosi v okolico, močnejše deževje pa povzroči, da je vlažnost tal prevelika.

---

## 10 ZAKLJUČEK

Klasična zamenjava voziščne konstrukcije je postopek, ki se že vrsto let uspešno uporablja pri obnovi poškodovanih cest. Skrb za okolje in vse večje potrebe po varčevanju pa čedalje bolj težijo k uporabi recikliranih materialov. Pri rekonstrukciji voziščnih konstrukcij poznamo več postopkov reciklaže, v nalogi pa sem predstavil postopek kemične stabilizacije temeljnih tal z elektrofiltrskim pepelom. S stroškovno analizo in okoljevarstveno analizo sem prikazal, da je uporaba reciklaže cenovno ugodnejša in okolju prijaznejša od postopka klasične zamenjave.

V zaključku bi rad poudaril, da je nakup drage opreme za recikliranje voziščnih konstrukcij zelo tvegana poteza, saj strah investitorjev pred novostmi in nezaupanje v nove tehnologije zelo otežuje izvedbo rekonstrukcije cest s postopkom hladne reciklaže. Trenutne razmere v gospodarstvu pa omejujejo investicije v popravila poškodovanih cest. Z nakupom opreme bi moral izvajalec natančno opredeliti tudi strategijo prodora nove tehnologije na trg.



## VIRI

Bebar, M. 2000. Kemična stabilizacija vezljivih zemljin. Tehnični informator – SCT Ljubljana, 47: 25-27.

Bebar, M. 2002. Sanacije slabo nosilnih tal v cestogradnji. Tehnični informator – SCT Ljubljana, 53: 25-28.

Bebar, M. 2012a. Poročilo o izvedbi predhodnih raziskav možnosti izvedbe kemične stabilizacije temeljnih tal s preverbo dimenzioniranja voziščne konstrukcije, Objekt: Sanacija brežin in usadov Jesenovec na cesti R«-403/1075 Podrošt – Češnjica od km 5,943 do km 7,420. Ljubljana, Inštitut za gradbene materiale, Igmtat d. d.: 8 f.

Bebar, M. 2012b. Zaključno poročilo o zunanji kontroli zemeljskih del in nevezane nosilne plasti, Gradbišče: Sanacija brežin in usadov Jesenovec na cesti R2-403/1075 Podrošt – Češnjica od km 5,943 do km 7,420. Zaključno poročilo. Ljubljana, Inštitut za gradbene materiale, Igmtat d. d.: 8 f.

Bebar, M. 2013. Slike Jesenovec (elektronsko sporočilo). Sporočilo za: Cvek, D. 18. 2. 2013. Osebna komunikacija.

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 9. 1. 2013.)

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 9. 3. 2013.)

Ecoscore: How to calculate the CO2 emission level from the fuel consumption

<http://www.ecoscore.be/en/book/export/html/201> (Pridobljeno 13. 2. 2013.)

Gorenjska gradbena družba d. d. 2012. Končna situacija št. : /2012 na gradbenem objektu: Sanacija brežin in usadov Jesenovec na cesti R2-401/1075 Podrošt-Češnjica od km 5,943 do km 7,420. Kranj, Gorenjska gradbena družba d.d.: 21f.

Gorenjska gradbena družba d.d. 2012. Poročilo o kontroli nosilnosti in stanja podlage iz nevezanega materiala, Objekt: Sanacija brežin in usadov Jesenovec na cesti R«-403/1075 Podrošt – Češnjica od km 5,943 do km 7,420. Kranj, Gorenjska gradbena družba d.d.: 9f.

Henigman, S., Bašelj, R., Britovšek, Z., Cotič, Z., Donko, D., Fortuna, I., Jurgele, M., Lamut, T., Ljubič, A., Naglič, O., Prešeren, M., Prosen, J., Tušar, M., Žmavc, J. 2006. Asphalt, 2. Izdaja. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 334 str.

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

<http://www.drc.si/Portals/6/prispevki/III/527-542.pdf> (Pridobljeno 7. 1. 2013.)

Hrast, B. 2012. Hladna reciklaža obstoječih cest – Stabiliziranje z različnimi vezivi. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Hrast): 81 str.

Kočevar, H. 1993. Vpliv elektrofiltrskega pepela na okolje. V: Žmavc, J. Cestarski dnevi '93, Rogla, 13. In 14. oktobra 1993 - Zbornik kratkih vsebin referatov. Ljubljana, DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: str. 185-187.

Podjetje za urejanje hudournikov d.d. – PUH. 2010. Sanacija zidov Jesenovec na cesti R2-403/1075 Podrošt – Češnjica od km 5,943 do km 7,420. PZI - Projekt za izvedbo. Ljubljana, Ministrstvo za promet, Direkcija Republike Slovenije za ceste.

Skupnost za ceste Slovenije. 1989. Popis del in posebni tehnični pogoji za zemeljska dela in temeljenje, Knjiga 3. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo Ljubljana, Prometnotehniški inštitut: 77 str.

Šircelj, M. 2000. Penjeni bitumen pri recikliranju asfaltnih vozišč. Tehnični informator – SCT Ljubljana, 48: 25-27.

Vedenik-Novak, M. 1995. Koristna uporaba elektrofiltrskega pepela. V: Uhan, J. (ur.), Placer, L. (ur.), Mirtič, B. (ur.) Okolju prijaznejše pridobivanje in predelava nekovinskih mineralnih surovin – Zbornik. Ljubljana, CETERA – Center za tehnični razvoj, izobraževanje in organizacijo: str. 107-113.

Umanotera – Slovenska fundacija za trajnostni razvoj

<http://www.umanotera.org/index.php?node=121> (Pridobljeno 10. 3. 2013.)

Uradni list Republike Slovenije. Številka 35. Ljubljana. 1996.

[http://www.uradni-list.si/\\_pdf/1996/Ur/u1996035.pdf#!/u1996035-pdf](http://www.uradni-list.si/_pdf/1996/Ur/u1996035.pdf#!/u1996035-pdf) (Pridobljeno 10. 3. 2013.)

Vilhar, M., Žmavc, J. 1984. Sodobni postopki popravil asfaltnih vozišč – recikliranje. Ljubljana, Sozd – Združena cestna podjetja Slovenije: 44 str.

Wirtgen. 2006. The new generation of recyclers – Recycler WR 2500 S. Windhagen. Wirtgen GmbH: 40 str.

Wirtgen 2009. Tehnical specification – Recycler WR 2500 S. Windhagen. Wirtgen GmbH: 7 str.

Wirtgen. 2012. Cold recycling – Wirtgen Cold Recycling Technology, 1. Izdaja. Windhagen. Wirtgen GmbH: 365 str.

Združenje asfalterjev Slovenije. 2010. Priročnik za asfaltna dela.

[http://www.zdruzenje-zas.si/Material/Pdf/Priro%C4%8Dnik\\_za\\_izvajanje\\_asfaltnih\\_del-december\\_2010.pdf](http://www.zdruzenje-zas.si/Material/Pdf/Priro%C4%8Dnik_za_izvajanje_asfaltnih_del-december_2010.pdf) (Pridobljeno 27. 4. 2013.)

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. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 289 str.

### **Tehnična regulativa**

TSC 06.711 : 2001. Tehnična specifikacija za javne ceste. Meritev gostote in vlage - Postopek z izotopskim merilnikom. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.800 : 2001. Tehnična specifikacija za javne ceste. Ponovna uporaba materialov v cestogradnji - Recikliranje. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.100 : 2003. Tehnična specifikacija za javne ceste. Kamnita posteljica in povozni plato. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.200 : 2003. Tehnična specifikacija za javne ceste. Nevezane nosilne in obrabne plasti. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.720 : 2003. Tehnična specifikacija za javne ceste. Meritve in preiskave – Deformacijski modul vgrajenih materialov. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.311/1 : 2005. Tehnična specifikacija za javne ceste. Redno vzdrževanje cest – Vzdrževanje prometnih površin – asfaltna vozišča. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.311/2 : 2005. Tehnična specifikacija za javne ceste. Redno vzdrževanje cest – Vzdrževanje prometnih površin – Asfaltna vozišča. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.300 / 06.410 : 2009. Tehnična specifikacija za javne ceste. Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.511 : 2009. Tehnična specifikacija za javne ceste. Prometne obremenitve - Določitev in razvrstitev. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

TSC 06.520 : 2009. Tehnična specifikacija za javne ceste. Projektiranje dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij. Ljubljana. Direkcija Republike Slovenije za ceste.

### **Ostali viri**

Akcijski načrt za zeleno javno naročanje za obdobje 2009-2012. 2009.

[http://www.mf.gov.si/fileadmin/mf.gov.si/pageuploads/javnar/UredbaZelenJN/Akcijski\\_ZeJN.PDF](http://www.mf.gov.si/fileadmin/mf.gov.si/pageuploads/javnar/UredbaZelenJN/Akcijski_ZeJN.PDF)

(Pridobljeno 11. 3. 2013.)

DRSC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije. Prometne obremenitve 2010.

[http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/Stetje\\_prometa/Prometne\\_obremenitve\\_2010\\_splet.pdf](http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/Stetje_prometa/Prometne_obremenitve_2010_splet.pdf) (Pridobljeno 2. 2. 2013.)

Jurjavčič, P. 2006. Stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij.

Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Jurjavčič): 113 str.

Ministrstvo za zdravje Republike Slovenije, Uprava republike Slovenije za varstvo pred sevanji.  
Pogosta vprašanja in odgovori. 2013.

[http://www.uvps.gov.si/si/pogosta\\_vprasanja\\_in\\_odgovori/](http://www.uvps.gov.si/si/pogosta_vprasanja_in_odgovori/) (Pridobljeno 12. 3. 2013.)

Ordinacija Zevnik. RTG slikanje. 2013.

<http://www.zevnik.eu/index.php?PageID=291#2> (Pridobljeno 12. 3. 2013.)

Pogačnik, M. 2007. Vplivi odlagališča elektrofiltrskega pepela Termoelektrarne Trbovlje na okolje.  
Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo  
(samozaložba M. Pogačnik): 93 str.

Public works & Government services Canada. Pavement structural design training manual. 1995.

<http://www.captg.ca/docs/pdf/atr021e.pdf> (Pridobljeno 12. 2. 2013.)

Statistični urad Republike Slovenije. Cestna infrastruktura, Slovenija, 2011 – Začasni podatki. 2012.

[http://www.stat.si/novica\\_prikazi.aspx?id=5100](http://www.stat.si/novica_prikazi.aspx?id=5100) (Pridobljeno 9. 3. 2013.)

WAPA – Wisconsin asphalt pavement association. Pavement structure design. 2012.

<http://www.wispave.org/downloads/WAPATechBulletinPavementStructureDesign.pdf> (Pridobljeno  
12. 2. 2013.)