

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:

Robič, S., 2013. Uporaba bele žindre v betonskih kompozitih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Šajna, A.): 109 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:

Robič, S., 2013. Uporaba bele žindre v betonskih kompozitih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Šajna, A.): 109 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  
PRVE STOPNJE VODARSTVA  
IN OKOLJSKEGA  
INŽENIRSTVA

Kandidat:

**SEBASTIJAN ROBIČ**

**UPORABA BELE ŽLINDRE V BETONSKIH  
KOMPOZITIH**

Diplomska naloga št.: 8/B-VOI

**APPLICATION OF WHITE SLAG IN CONCRETE  
COMPOSITES**

Graduation thesis No.: 8/B-VOI

**Mentorica:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Predsednica komisije:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-  
Bosiljkov

**Somentor:**

dr. Aljoša Šajna

Ljubljana, 29. 08. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Podpisani Sebastijan Robič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
»UPORABA BELE ŽLINDRE V BETONSKIH KOMPOZITIH«.

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

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

Ljubljana, avgust 2013

Sebastijan Robič

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

**UDK:** 504.06:691.3.002.67(043.2)  
**Avtor:** Sebastijan Robič  
**Mentor:**izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.  
**Somentor:** dr. Aljoša Šajna, univ. dipl. inž. grad.  
**Naslov:** Uporaba bele žindre v betonskih kompozitih  
**Tip dokumenta:** diplomska naloga – univerzitetni študij  
**Obseg in oprema:** 109 str., 50 pregl., 33 sl., 14 diag., 12 en.  
**Ključne besede:** žindra, nevezana plast, vezana nosilna plast, valjani beton, betonska krovna plast

### **Izvleček**

Žindra je stranski produkt pri proizvodnji jekla in železa. Velike količine žindre in njene lastnosti kažejo na možnost uporabe v gradbeništvu. V sklopu diplomske naloge smo opravili preiskave na predelani deponijski beli žindri. Vse preiskave smo opravili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Najprej smo preiskali lastnosti predelane deponijske bele žindre. V drugem delu preiskav pa smo preiskali možnosti uporabe predelane deponijske bele žindre v vezanih betonskih kompozitih za uporabo v cestogradnji, v posameznih plasteh cestnega telesa.

---

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 504.06:691.3.002.67(043.2)  
**Author:** Sebastijan Robič  
**Supervisor:** assoc. prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.  
**Co-Supervisor:** Aljoša Šajna, Ph.D.  
**Title:** Application of white slag in concrete composites  
**Document type:** graduation thesis – university studies  
**Scope and tools:** 109 p., 50 tab., 33 fig., 14 sch., 12 eq.  
**Key words:** slag, subbase, roadbase, roller compacted concrete, concrete wearing course

**Abstract:**

Slag is a by-product produced during iron and steel production. Large quantities of slag and its properties show possibilities of using it in civil engineering. As part of my diploma thesis, we conducted a research on the processed white slag from a landfill. The entire research was conducted at the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute. In the first part of our research, we looked into the qualities of the processed white slag from the landfill. In the second part of it, we researched possibilities of using the processed white slag from the landfill in concrete - bound composites for utilization in the road construction in the individual layers of the road structure.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorici prof. Violeti Bokan-Bosiljkov, somentorju dr. Aljoši Šajnu, zaposlenim na Zavodu za gradbeništvo Slovenije ter vsem ostalim, ki so mi pomagali pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi staršema, ki sta mi v času študija stala ob strani in me podpirala.

**KAZALO VSEBINE**

<b>STRAN ZA POPRAVKE</b> .....	<b>III</b>
<b>IZJAVE</b> .....	<b>IV</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM</b> .....	<b>V</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>ZAHVALA</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>18</b>
1.1 Predstavitev problema.....	19
1.2 Namen diplomske naloge .....	19
<b>2 ZAKONODAJA</b> .....	<b>20</b>
2.1 Zakon o varstvu okolja (ZVO-1-UPB1), Uradni list RS, št. 39/2006 .....	20
2.1.1 Namen .....	20
2.1.2 Cilji .....	20
2.1.3 Ukrepi.....	20
2.2 Uredba o odpadkih, Uradni list RS, št. 103/2011 .....	20
2.2.1 Namen .....	20
2.2.2 Vrste odpadkov .....	21
2.2.3 Klasifikacijski seznam odpadkov .....	21
2.2.4 Hierarhija ravnanja z odpadki.....	21
2.2.5 Varstvo okolja in človekovega zdravja .....	21
2.2.6 Stranski proizvod .....	21
2.2.7. Prenehanje statusa odpadka .....	22
2.3 Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih, Uradni list RS, št. 61/2011 .....	22
2.3.1 Namen .....	22
2.3.2 Vrste odpadkov in mejne vrednosti emisij snovi v okolje .....	23
2.3.3 Odlagališča odpadkov .....	23
2.4 Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro), Uradni list RS, št. 52/2000 .....	26
2.4.1 Namen .....	26
2.4.2 Bistvene zahteve .....	26
2.4.3 Gradbeni proizvod.....	27
2.5 Pravilnik o bistvenih zahtevah za gradbene objekte, ki jih je treba upoštevati pri določitvi lastnosti gradbenih proizvodov, Uradni list RS, št. 9/2001 .....	27
2.5.1 Namen .....	27
2.5.2 Mehanska odpornost in stabilnost.....	27



2.5.3 Varstvo okolja in človekovega zdravja .....	28
3 INDUSTRIJSKI ODPADKI.....	29
4 STATISTIKA ODPADKOV .....	30
5 ŽLINDRA.....	32
5.1 Pravni status .....	32
5.2 Metalurška žindra.....	34
5.3 Kemična sestava žindre.....	35
5.4 Fizikalne lastnosti žindre.....	35
5.4.1 Viskoznost metalurških žindre .....	35
5.4.2 Toplotna kapaciteta žindre .....	35
5.4.3 Električna prevodnost žindre .....	35
5.4.4 Toplotna prevodnost žindre .....	35
5.5 Tehnološke funkcije žindre .....	36
5.6 Zgodovina uporabe žindre .....	36
5.7 Delitev metalurških žindler .....	37
5.7.1 Metalurške žindre pri proizvodnji jekla in železa .....	38
5.7.1.1 Plavžna žindra .....	39
5.7.1.2 Jeklarska žindra .....	39
5.7.1.2.1 Žindra iz oksidacijskih talilnih peči (BOS žindra) .....	40
5.7.1.2.2 Žindra iz elektroobločnih peči (EAF C, EAF S žindra) .....	40
5.7.1.2.3 Sekundarne metalurške žindre (SMS žindre) .....	43
5.7.1.2.4 Druge vrste žindre .....	44
5.8 Količine proizvedene žindre .....	44
5.9 Standardizacija proizvodov iz žindre.....	46
5.10 Uporaba žindre .....	47
5.10.1 Agregat .....	48
5.10.2 Asfalt .....	49
5.10.3 Nevezane zmesi.....	50
5.10.4 Hidravlično vezane in delno vezane zmesi.....	50
5.10.5 Beton in cement .....	50
5.10.6 Druge vrste uporabe .....	51
5.11 Bela žindra iz podjetja Acroni .....	52

---

<b>6 CESTNO TELO .....</b>	<b>53</b>
<b>6.1 Nevezana nosilna plast.....</b>	<b>54</b>
6.1.1. Agregat.....	54
6.1.2 Vgrajevanje .....	55
6.1.3 Zahtevane vrednosti.....	55
<b>6.2 Vezana nosilna plast.....</b>	<b>56</b>
<b>6.2.1 Spodnja vezana (stabilizirana) nosilna plast .....</b>	<b>56</b>
6.2.1.1 Agregat.....	57
6.2.1.2 Hidravlično vezivo .....	58
6.2.1.3 Voda .....	58
6.2.1.4 Vgrajevanje .....	58
6.2.1.5 Zahtevane vrednosti.....	59
<b>6.2.2. Zgornja vezana nosilna plast.....</b>	<b>59</b>
<b>6.3 Obrabna in zaporna plast .....</b>	<b>59</b>
<b>6.3.1 Betonska krovna plast .....</b>	<b>59</b>
6.3.1.1 Agregat.....	60
6.3.1.2 Hidravlično vezivo .....	60
6.3.1.3 Kemijski in mineralni dodatki .....	61
6.3.1.4 Voda .....	61
6.3.1.5 Vgrajevanje .....	61
6.3.1.6 Zahtevane vrednosti.....	61
<b>6.4 Valjani beton.....</b>	<b>62</b>
6.4.1 Agregat.....	62
6.4.2 Hidravlično vezivo .....	62
6.4.3 Vgrajevanje .....	63
6.4.4 Zahtevane vrednosti.....	63
<b>7 EKSPERIMENTALNO DELO .....</b>	<b>64</b>
7.1 Uvod.....	64
7.2 Namen preiskav.....	64
7.3 Preiskave predelane deponijske bele žlindre.....	64
7.3.1 Vsebnost vlage.....	64
7.3.2. Prostorninska masa zrn.....	65

<b>7.3.3. Zrnavostna sestava</b> .....	<b>65</b>
<b>7.3.3.1 Metoda suhega sejanja</b> .....	<b>66</b>
<b>7.3.3.2 Laserska granulometrija</b> .....	<b>66</b>
<b>7.3.4 BET površina in porazdelitev por</b> .....	<b>67</b>
<b>7.3.5 Mineraloška analiza</b> .....	<b>68</b>
<b>7.3.6 Vsebnost kloridov, celotnega žvepla in sulfatov</b> .....	<b>68</b>
<b>7.3.6.1 Vsebnost kloridov</b> .....	<b>68</b>
<b>7.3.6.2 Vsebnost celotnega žvepla</b> .....	<b>69</b>
<b>7.3.6.3 Vsebnost sulfatov</b> .....	<b>69</b>
<b>7.3.7. Test izluževanja</b> .....	<b>70</b>
<b>7.3.7.1 Priprava izlužka</b> .....	<b>70</b>
<b>7.3.7.2 Kemična analiza izlužka</b> .....	<b>70</b>
<b>7.4 Preiskave betonskih kompozitov</b> .....	<b>71</b>
<b>7.4.1 Kompozit I – nevezana nosilna plast</b> .....	<b>71</b>
<b>7.4.2 Kompozit II – vezana nosilna plast</b> .....	<b>71</b>
<b>7.4.3 Kompozit III – valjani beton</b> .....	<b>72</b>
<b>7.4.4 Kompozit IV – masivni beton</b> .....	<b>72</b>
<b>7.4.5 Uporabljeni materiali</b> .....	<b>73</b>
<b>7.4.5.1 Agregat</b> .....	<b>73</b>
<b>7.4.5.2 Cement</b> .....	<b>73</b>
<b>7.4.5.3 Voda</b> .....	<b>73</b>
<b>7.4.5.4 Žlindra</b> .....	<b>73</b>
<b>7.4.6 Recepture za posamezne betonske kompozite</b> .....	<b>74</b>
<b>7.4.7 Priprava kompozitov</b> .....	<b>75</b>
<b>7.4.8 Kompoziti I, II, III</b> .....	<b>75</b>
<b>7.4.8.1 Vsebnost vode</b> .....	<b>75</b>
<b>7.4.8.2 Zgoščevanje po Proctorju</b> .....	<b>76</b>
<b>7.4.8.3 Nega kompozitov</b> .....	<b>76</b>
<b>7.4.8.4 Tlačna trdnost</b> .....	<b>77</b>
<b>7.4.9 Kompozit IV</b> .....	<b>77</b>
<b>7.4.9.1 Preizkušanje svežega betona</b> .....	<b>77</b>
<b>7.4.9.1.1 Preizkus s posedom</b> .....	<b>78</b>

7.4.9.1.2 Gostota .....	78
7.4.9.1.3 Vsebnost zraka – metoda s pritiskom .....	79
7.4.9.2 Preizkušanje strnjenege betona .....	80
7.4.9.2.1 Gostota .....	80
7.4.9.2.2 Tlačna trdnost .....	80
7.4.9.2.3 Globina prodora vode pod pritiskom.....	81
7.4.10 Test izluževanja .....	82
7.4.10.1 Priprava izlužkov .....	82
7.4.10.2 Kemična analiza izlužkov .....	82
<b>8 REZULTATI IN ANALIZA .....</b>	<b>83</b>
<b>8.1 Preiskave predelane deponijske bele žlindre .....</b>	<b>83</b>
8.1.1 Vsebnost vlage .....	83
8.1.2 Prostorninska masa zrn .....	83
8.1.3 Zrnavostna sestava .....	83
8.1.3.1 Metoda suhega sejanja .....	83
8.1.3.2 Laserska granulometrija .....	85
8.1.4 BET površina in porazdelitev por.....	86
8.1.5 Mineraloška analiza.....	86
8.1.6 Vsebnost kloridov, žvepla in sulfatov .....	87
8.1.6.1 Vsebnost kloridov .....	87
8.1.6.2 Vsebnost celotnega žvepla .....	88
8.1.6.3 Vsebnost sulfatov.....	88
8.1.7 Test izluževanja .....	88
8.1.7.1 Priprava izlužka .....	88
8.1.7.2 Kemična analiza izlužka .....	89
<b>8.2 Preiskave vezanih kompozitov .....</b>	<b>90</b>
8.2.1 Kompoziti I, II in III .....	90
8.2.1.1 Vsebnost vode .....	90
8.2.1.2 Zgoščevanje po Proctorju.....	90
8.2.1.3 Tlačna trdnost.....	92
8.2.2 Kompozit IV .....	96

<b>8.2.2.1 Preizkušanje svežega betona .....</b>	<b>96</b>
<b>8.2.2.1.1 Temperatura .....</b>	<b>96</b>
<b>8.2.2.1.2 Posed betonskega stožca .....</b>	<b>96</b>
<b>8.2.2.1.3 Gostota svežega betona .....</b>	<b>96</b>
<b>8.2.2.1.4 Vsebnost zraka.....</b>	<b>97</b>
<b>8.2.2.2 Preizkušanje strjenega betona .....</b>	<b>97</b>
<b>8.2.2.2.1 Gostota .....</b>	<b>97</b>
<b>8.2.2.2.2 Tlačna trdnost .....</b>	<b>98</b>
<b>8.2.2.2.3 Prodor vode .....</b>	<b>99</b>
<b>8.2.3 Test izluževanja .....</b>	<b>100</b>
<b>8.2.3.1 Priprava izlužka .....</b>	<b>100</b>
<b>8.2.3.2. Kemična analiza izlužka.....</b>	<b>100</b>
<b>9 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>102</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>104</b>

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Hierarhija ravnanja z odpadki [3].	21
Slika 2: Shema odločanja, ali gre za odpadki ali za stranski proizvod [13].	33
Slika 3: Uporaba žindre za gramozno grede železniških tirov [19].	37
Slika 4: Posledice nabrekanja zaradi Siemens-Martinove žindre v trgovini na Hrušici [20].	37
Slika 5: Delitev metalurških žindre glede na izvor [3].	38
Slika 6: Shematski prikaz elektroobločne peči [3].	40
Slika 7: Proces pridobivanja in pridelave žindre iz elektroobločne peči [14].	41
Slika 8: Črna EAF C žindra [21].	42
Slika 9: Bela EAF S žindra [21].	43
Slika 10: Količine proizvedene metalurške žindre [12].	44
Slika 11: Količine proizvedene jeklarske žindre [12].	45
Slika 12: Uporaba plavžne žindre [12].	47
Slika 13: Uporaba jeklarske žindre [12].	48
Slika 14: Odlagališče bele žindre na brežini Save ob podjetju Acroni [24].	52
Slika 15: Značilna ureditev sodobnega vozišča [27].	53
Slika 16: Vgrajevanje betonskega vozišča na pasu za počasna vozila [31].	61
Slika 17: Vgrajevanje valjanega betona z valjarji [33].	63
Slika 18: Laserski granulometer Cilas 920 [40].	67
Slika 19: Micromeritics ASAP 2020 [43].	67
Slika 20: Priprava izlužka.	70
Slika 21: Kompozit I.	71
Slika 22: Kompozit II.	72
Slika 23: Kompozit III.	72
Slika 24: kompozit IV.	73
Slika 25: Predelana deponijska bela žindra.	74
Slika 26: Priprava kompozita II v laboratorijskem mešalcu.	75
Slika 27: Zgoščevanje po modificiranem Proctorjevem postopku.	76
Slika 28: Preizkušanje tlačne trdnosti.	77
Slika 29: Posed betonskega stožca.	78
Slika 30: Določanje vsebnosti zraka.	79
Slika 31: Določanje tlačne trdnosti.	81
Slika 32: Globina prodora vode.	82
Slika 33: Razpadli kompozit I po 4-urni negi v vodi.	92

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Količine odpadkov glede na vrsto nastanka [11]. .....	30
Grafikon 2: Količine odpadkov glede na vrsto odpadka [11]. .....	31
Grafikon 3: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/31 mm za nevezane nosilne plasti [28].	54
Grafikon 4: Območje sestave zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti, stabilizirane s hidravličnimi vezivi [29]. .....	57
Grafikon 5: Zrnavostna krivulja vzorca predelane deponijske bele žindre.....	84
Grafikon 6:Krivulja zrnivosti delcev velikosti 0,1 do 200 µm vzorca predealne deponijske bele žindre. ....	85
Grafikon 7: Difraktogram vzorca predealne deponijske bele žindre .....	87
Grafikon 8: Vsebnost vode v kompozitih z oznakami I, II in III.....	90
Grafikon 9: Primerjava gostote kompozitov z oznakami I, II in III.....	92
Grafikon 10: Tlačna trdnost kompozita II po 7. in 28. dneh.....	94
Grafikon 11: Tlačna trdnost kompozita III po 7. in 28. dneh.....	95
Grafikon 12: Tlačna trdnost kompozitov z oznakami I, II in III po 28. dneh. ....	95
Grafikon 13: Gostota kompozita IV po 7. in 28. dneh. ....	98
Grafikon 14: Tlačna trdnost kompozita IV po 7. in 28. dneh. ....	99

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Zahteve za nenevarne odpadke, ki se odlagajo na odlagališču za nenevarne odpadke [4].	24
Preglednica 2: Zahteve za inertne odpadke, ki se odlagajo na odlagališču za inertne odpadke [4].	25
Preglednica 3: Ukrepi, ki vplivajo na kvaliteto žindre iz elektroobločne peči [14].	42
Preglednica 4: Prikaz letne proizvodnje jeklarskih žindrer v Evropi za leto 2010 [3].	45
Preglednica 5: Letna proizvodnja jeklarskih žindrer v obdobju 2009-2012 v Sloveniji [3].	45
Preglednica 6: Evropski standardi za uporabo žindre v gradbeništvu [12].	46
Preglednica 7: Vrste uporabe žindre v obliki agregata [22].	49
Preglednica 8: Vrste uporabe žindre v nevezani zmesi [22].	50
Preglednica 9: Debelina zgoščene nevezane nosilne plasti v odvisnosti od maksimalnega zrna v zmesi [28].	55
Preglednica 10: Zahtevane vrednosti deformacijskih modulov na nevezanih nosilnih plasteh [28].	56
Preglednica 11: Zahtevane lastnosti zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti, stabilizirane s.....	57
Preglednica 12: Zahtevane lastnosti cementa za stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti [29].	58
Preglednica 13: Skupna količina cementa in kamnitih zrn velikosti do 0,25 mm v betonski mešanici [30].	60
Preglednica 14: Razredi tlačne trdnosti betona za krovne plasti [30].	62
Preglednica 15: Razredi natezne trdnosti betona za krovne plasti [30].	62
Preglednica 16: Recepture za posamezne vezane kompozite.	74
Preglednica 17: Vsebnost vlage vzorca predelane deponijske bele žindre.	83
Preglednica 18: Prostorninska masa vzorca predelane deponijske bele žindre.	83
Preglednica 19: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm vzorca predelane deponijske bele žindre.	84
Preglednica 20: Porazdelitev velikosti zrn vzorca predelane deponijske bele žindre.	84
Preglednica 21: Zrnavostna sestava delcev v razponu od 0,1 do 200 µm vzorca predelane deponijske bele žindre.	85
Preglednica 22: Rezultati plinske sorpcije predelane deponijske bele žindre.	86
Preglednica 23: Mineralna sestava predelane deponijske bele žindre.	86
Preglednica 24: Vsebnost kloridov v vzorcu predelane deponijske bele žindre.	87
Preglednica 25: Vsebnost žvepla v vzorcu predelane deponijske bele žindre.	88
Preglednica 26: Vsebnost sulfatov v vzorcu predelane deponijske bele žindre.	88



Preglednica 27: Rezultati meritev pH in električne prevodnosti za predelano deponijsko belo žindro.....	88
Preglednica 28: Kemična analiza izlužka iz predelane deponijske bele žindre.....	89
Preglednica 29: Vsebnost vode v kompozitih o oznakami I, II in III. ....	90
Preglednica 30: Gostota kompozita I. ....	91
Preglednica 31: Gostota kompozita II. ....	91
Preglednica 32: Gostota kompozita III. ....	91
Preglednica 33: Tlačna trdnost kompozita I po 28. dneh.....	93
Preglednica 34: Tlačna trdnost kompozita II po 7. dneh.....	93
Preglednica 35: Tlačna trdnost kompozita II po 28. dneh.....	93
Preglednica 36: Tlačna trdnost kompozita III po 7. dneh.....	93
Preglednica 37: Tlačna trdnost kompozita III po 28. dneh.....	94
Preglednica 38: Temperatura svežega betona.....	96
Preglednica 39: Posed betonskega stožca. ....	96
Preglednica 40: Gostota svežega kompozita IV. ....	96
Preglednica 41: Vsebnost zraka v kompozitu IV. ....	97
Preglednica 42: Gostota kompozita IV po 7. dneh. ....	97
Preglednica 43: Gostota kompozita IV po 28. dneh. ....	97
Preglednica 44: Tlačna trdnost kompozita IV po 7. dneh. ....	98
Preglednica 45: Tlačna trdnost kompozita IV po 28. dneh. ....	98
Preglednica 46: Prodor vode kompozita IV. ....	99
Preglednica 47: pH vrednost in električna prevodnost izlužka iz kompozitov z oznakami I, II, III in IV po 7. dneh.....	100
Preglednica 48: pH vrednost in električna prevodnost izlužka iz kompozitov z oznakami I, II, III in IV po 28. dneh.....	100
Preglednica 49: Koncentracija elementov v kompozitih z oznakami I, II, III in IV po 7. dneh. ....	100
Preglednica 50: Koncentracija elementov v kompozitih z oznakami I, II, III in IV po 28. dneh. ....	101

**Ta stran je namenoma prazna.**

## **1 UVOD**

### **1.1 Predstavitev problema**

Žindra je stranski produkt, ki nastane v metalurških procesih. Njena naloga v postopku pridobivanja kovin je, da talino kovine očisti s pomočjo svoje rafinacijske sposobnosti. Evropski katalog odpadkov (EWC) žindro v svojem klasifikacijskem seznamu odpadkov razvršča v dve skupini, glede na to ali je predelana ali nepredelana.

Vedno večja svetovna potreba po surovinah in materialih nam v skladu s trajnostnim razvojem narekuje iskanje vedno novih alternativnih rešitev, med katerimi je tudi uporaba predelanih odpadkov. Glede na to, da v metalurški industriji nastaja velika količina žindre, ki ima ugodne lastnosti, bi jo bilo smotrno uporabiti v gradbeništvu, kjer so potrebe po materialu zelo velike.

### **1.2 Namen diplomske naloge**

V diplomski nalogi smo poskušali ugotoviti ali je predelano deponijsko belo žindro možno uporabiti v gradbeništvu za potrebe v cestogradnji tako z okoljskega kot tehničnega vidika. Vse preiskave smo opravili v okviru Laboratorija za betone, kamen in reciklirane materiale na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Preiskave smo razdelili na dva dela.

V prvem delu smo preiskali predelano deponijsko belo žindro, ki je stranski produkt proizvodnje v jeklarni Acroni, predeljujejo pa jo v podjetju Harsco Minerali z namenom pridobiti iz nje kovine. Na predelani deponijski beli žindri smo tako preiskali fizikalne, kemične in mineraloške lastnosti v skladu z veljavnimi evropskimi standardi.

Drugi del preiskav smo namenili uporabi predelane deponijske bele žindre v cestogradnji, kot dodatek agregatu v posameznih plasteh cestnega telesa. Pripravili smo štiri vezane betonske kompozite z agregatom in predelano deponijsko belo žindro ter z različno količino in vrsto hidravličnega veziva glede na namen uporabe v cestnem telesu. Na svežih in strnjenih vezanih kompozitih smo opravili standardne laboratorijske preiskave ter teste izluževanja.

## **2 ZAKONODAJA**

### **2.1 Zakon o varstvu okolja (ZVO-1-UPB1), Uradni list RS, št. 39/2006**

#### **2.1.1 Namen**

Zakon o varstvu okolja določa temeljna načela in ukrepe za varstvo okolja. Spodbuja trajnostni razvoj, tako da ne ogrozi obstoja prihodnjih generacij družbe ter ohranja biotsko raznovrstnost okolja [1].

#### **2.1.2 Cilji**

Cilji varstva okolja so [1]:

- preprečevanje in zmanjšanje obremenjevanja okolja,
- ohranjanje in izboljševanje kakovosti okolja,
- trajnostna raba naravnih virov,
- zmanjšanje rabe energije in uporaba obnovljivih virov energije,
- odpravljanje posledic obremenjevanja okolja,
- večja snovna učinkovitost proizvodnje in potrošnje,
- opuščanje in nadomeščanje uporabe nevarnih snovi.

#### **2.1.3 Ukrepi**

Ukrepi za varstvo okolja so [1]:

- spodbuditi tako proizvodnjo in potrošnjo, ki prispeva k manjšemu obremenjevanju okolja,
- razviti in uporabiti sodobno tehnologijo, ki je energetska in ekološko učinkovita,
- zaračunavanje onesnaževanja,
- raba naravnih virov.

### **2.2 Uredba o odpadkih, Uradni list RS, št. 103/2011**

#### **2.2.1 Namen**

Uredba določa načine ravnanja in pogoje za preprečevanje ali zmanjševanje škodljivih vplivov nastajanja odpadkov in ravnanja z njimi ter zmanjševanje celotnega vpliva uporabe naravnih virov in izboljšanje učinkovitosti uporabe naravnih virov z namenom varstva okolja in varovanja človekovega zdravja [2].

## 2.2.2 Vrste odpadkov

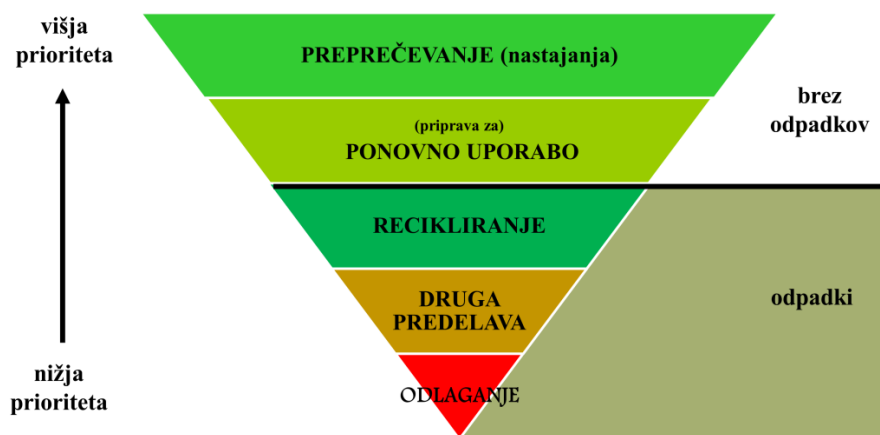
Odpadek je snov ali predmet, ki ga imetnik zavrže, namerava zavreči ali mora zavreči. Nevarni odpadki so odpadki, ki imajo eno ali več nevarnih lastnosti iz Priloge 1 Uredbe o odpadkih. Nenevarni odpadki so odpadki, ki jih ne uvrščamo med nevarne odpadke [2].

## 2.2.3 Klasifikacijski seznam odpadkov

Odpadki se glede na vir nastanka razvrščajo v skupine, označene z dvomestno številčno oznako, in podskupine, označene s štirimestno številčno oznako. Sestava odpadka in mejne vrednosti koncentracije nevarnih snovi določajo ali se odpadki uvrstijo kot nenevarni ali kot nevarni označeni z zvezdico [2].

## 2.2.4 Hierarhija ravnanja z odpadki

Uredba o odpadkih uvaja petstopenjsko hierarhijo ravnanja z odpadki (slika 1), kjer je najbolj zaželeno preprečevanje nastajanja odpadkov in najmanj odlaganje odpadkov [2].



Slika 1: Hierarhija ravnanja z odpadki [3].

## 2.2.5 Varstvo okolja in človekovega zdravja

Pri ravnanju z odpadki ne smemo ogrožati človekovega zdravja ter povzročati škodljivih vplivov na okolje ter spodbujati tako načrtovanje, proizvodnjo, distribucijo, potrošnjo in uporabo izdelkov, da pripomorejo k preprečevanju nastajanja odpadkov [2].

## 2.2.6 Stranski proizvod

Ostanek proizvodnje je snov ali predmet, ki nastane pri proizvodnem procesu, vendar ni glavni namen te proizvodnje. Z ostankom proizvodnje se lahko ravna kot s stranskim proizvodom in ne kot z odpadkom, če so izpolnjeni sledeči pogoji [2]:

- nadaljnja uporaba ostanka proizvodnje je zagotovljena, če:
  - ima imetnik ostanka proizvodnje pogodbo z nadaljnjimi uporabniki o njegovi prodaji ali
  - dolgoročno obstaja trg za prodajo ostanka proizvodnje,
  - je ostanek proizvodnje uporaben v celoti in
  - se ostanek proizvodnje pred prodajo ne skladišči dlje kot tri leta.
- ostanek proizvodnje se lahko neposredno uporabi brez kakršne koli nadaljnje obdelave, razen običajnih industrijskih postopkov, kot so spiranje, sušenje, homogenizacija, nadzor nad kakovostjo ali drug običajen industrijski postopek, ki je potreben zaradi spremembe velikosti ali oblike materiala, homogenizacije ali sušenja. Med običajne industrijske postopke se ne štejejo postopki, ki se izvedejo zaradi izločitve neželenih ali nevarnih snovi od ostanka proizvodnje.
- ostanek proizvodnje nastaja kot sestavni del proizvodnega procesa in je pripravljen za nadaljnjo uporabo.
- ostanek proizvodnje izpolnjuje zahteve, določene za uporabo take snovi ali predmeta s predpisi, ki urejajo proizvode ter varstvo okolja in varovanje človekovega zdravja, njegova nadaljnja uporaba pa ne bo škodljivo vplivala na okolje in človekovo zdravje. Ostanek proizvodnje mora ustrezati tudi zahtevam iz predpisov, ki urejajo varstvo okolja in varovanje človekovega zdravja, ter Uredbe REACH, če zahteve iz nje za tak stranski proizvod veljajo.

Pri tem je potrebno upoštevati Sporočilo Komisije Svetu in Evropskemu parlamentu Razlaga o odpadkih in stranskih proizvodih (COM (2007) 59 konč., z dne 21. februarja 2007), ki opredeljuje odpadke in stranske proizvode [2].

### **2.2.7. Prenehanje statusa odpadka**

Odpadek preneha biti odpadke, ko se ga predela v proizvod, material ali snov za uporabo v prvotni ali drug namen ali pridobivanje energije [2].

## **2.3 Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih, Uradni list RS, št. 61/2011**

### **2.3.1 Namen**

Uredba določa mejne vrednosti emisij snovi v okolje zaradi odlaganja odpadkov, obvezna ravnanja in druge pogoje za odlaganje ter pogoje in ukrepe za zmanjšanje škodljivih učinkov na okolje ter preprečitev tveganja za zdravje ljudi [4].

### **2.3.2 Vrste odpadkov in mejne vrednosti emisij snovi v okolje**

Nevarni odpadki so odpadki, ki imajo eno ali več nevarnih lastnosti iz Priloge 1 Uredbe o odpadkih. Nenevarni odpadki so vsi odpadki, ki niso uvrščeni med nevarne odpadke [4].

Inertni odpadki se fizikalno, kemično ali biološko bistveno ne spreminjajo, ne razpadejo, ne zgorejo ali kako drugače kemijsko ali fizikalno ne reagirajo, se biološko ne razgradijo in ne vplivajo škodljivo na druge snovi ob stiku z njimi na način, ki bi lahko povzročil onesnaženje okolja ali škodoval zdravju [4].

Mejne vrednosti emisij snovi v okolje zaradi odlaganja odpadkov so mejne vrednosti parametrov onesnaženosti odpadkov in parametrov izlužka odpadkov, ki se ga pridobi z laboratorijskim testom izluževanja [4].

### **2.3.3 Odlagališča odpadkov**

Odpadke je dovoljeno odlagati samo na odlagališčih. Odlagati je dovoljeno samo obdelane odpadke. Obstajajo tri vrste odlagališč [4]:

- odlagališče za nevarne odpadke,
- odlagališče za nenevarne odpadke in
- odlagališče za inertne odpadke.

Na odlagališče za nevarne odpadke je dovoljeno odlagati [4]:

- nevarne odpadke, katerih onesnaženost ne presega mejnih vrednosti parametrov onesnaženosti in mejnih vrednosti parametrov izlužka za nevarne odpadke, določenih v Prilogi 3 iz te Uredbe.

Na odlagališče za nenevarne odpadke je dovoljeno odlagati [4]:

- nenevarne odpadke, katerih onesnaženost ne presega mejnih vrednosti parametrov onesnaženosti in mejnih vrednosti parametrov izlužka za nenevarne odpadke iz Priloge 3 te Uredbe (preglednica 1),
- obdelane nenevarne odpadke z visoko vsebnostjo biološko razgradljivih snovi z lastnostmi parametrov iz 5. točke Priloge 3 te Uredbe,
- stabilne in nereaktivne nevarne odpadke, katerih onesnaženost ne presega mejnih vrednosti parametrov onesnaženosti in mejnih vrednosti parametrov izlužka za nenevarne odpadke iz Priloge 3 te Uredbe,
- odpadke, ki vsebujejo azbest, če izpolnjujejo zahteve iz Priloge 3 te Uredbe.

Preglednica 1: Zahteve za nenevarne odpadke, ki se odlagajo na odlagališču za nenevarne odpadke [4].

Parameter	Izražen kot	Enota	Mejna vrednost parametra izlužka L/S = 10 l/kg
Arzen	As	mg/kg s.s.	2
Barij	Ba	mg/kg s.s.	100
Kadmij	Cd	mg/kg s.s.	1
Celotni krom	Cr	mg/kg s.s.	10
Baker	Cu	mg/kg s.s.	50
Živo srebro	Hg	mg/kg s.s.	0,2
Molibden	Mo	mg/kg s.s.	10
Nikelj	Ni	mg/kg s.s.	10
Svinec	Pb	mg/kg s.s.	10
Antimon	Sb	mg/kg s.s.	0,7
Selen	Se	mg/kg s.s.	0,5
Cink	Zn	mg/kg s.s.	50
Kloridi	Cl	mg/kg s.s.	15.000
Fluoridi	F	mg/kg s.s.	150
Sulfati	SO <sub>4</sub>	mg/kg s.s.	20.000
Raztopljeni organski ogljik – DOC*	C	mg/kg s.s.	800
Celotne raztopljene snovi**	-	mg/kg s.s.	60.000

\* Če izmerjena vrednost parametra izlužka presega mejno vrednost parametra izlužka iz tabele pri lastni pH vrednosti izlužka, se lahko izvede analiza pri pH vrednosti med 7,5 in 8,0, pri čemer je treba uporabiti merilno metodo iz standarda SIST-TS CEN/TS 14429 ali drugo, tej enakovredno.

\*\* Vsebnost celotnih raztopljenih snovi v izlužku se lahko uporablja namesto vsebnosti sulfatov in kloridov v izlužku.

Na odlagališče za inertne odpadke je dovoljeno odlagati [4]:

- inertne odpadke, katerih onesnaženost ne presega mejnih vrednosti parametrov onesnaženosti in mejnih vrednosti parametrov izlužka za inertne odpadke iz Priloge 3 te Uredbe (preglednica 2),
- odpadke, določene v Prilogi 4 te Uredbe.



Preglednica 2: Zahteve za inertne odpadke, ki se odlagajo na odlagališču za inertne odpadke [4].

Parameter	Izražen kot	Enota	Mejna vrednost parametra izlužka L/S = 10 l/kg
Arzen	As	mg/kg s.s.	0,5
Barij	Ba	mg/kg s.s.	20
Kadmij	Cd	mg/kg s.s.	0,04
Celotni krom	Cr	mg/kg s.s.	0,5
Baker	Cu	mg/kg s.s.	2
Živo srebro	Hg	mg/kg s.s.	0,01
Molibden	Mo	mg/kg s.s.	0,5
Nikelj	Ni	mg/kg s.s.	0,4
Svinec	Pb	mg/kg s.s.	0,5
Antimon	Sb	mg/kg s.s.	0,06
Selen	Se	mg/kg s.s.	0,1
Cink	Zn	mg/kg s.s.	4
Kloridi	Cl	mg/kg s.s.	800
Fluoridi	F	mg/kg s.s.	10
Sulfati	SO <sub>4</sub>	mg/kg s.s.	1.000*
Fenolni indeks	-	mg/kg s.s.	1
Raztopljeni organski ogljik – DOC**	C	mg/kg s.s.	500
Celotne raztopljene snovi***	-	mg/kg s.s.	4.000

\* Odpadki ustrezajo zahtevam za inertne odpadke, če izmerjena vrednost sulfatov v izlužku ne presega 6.000 mg/kg suhe snovi.

\*\* Če izmerjena vrednost parametra izlužka presega mejno vrednost parametra izlužka iz tabele pri lastni pH vrednosti izlužka, se lahko opravi analiza pri pH vrednosti med 7,5 in 8,0, pri čemer je treba uporabiti merilno metodo iz standarda SIST-TS CEN/TS 14429 ali drugo, tej enakovredno.

\*\*\* Vsebnost celotnih raztopljenih snovi se lahko uporablja namesto vsebnosti sulfatov in kloridov.

## **2.4 Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro), Uradni list RS, št. 52/2000**

### **2.4.1 Namen**

Zakon ureja pogoje za izročanje gradbenih proizvodov v promet, podeljevanje tehničnih soglasij gradbenim proizvodom, izvedbo postopkov ugotavljanja in potrjevanja skladnosti s predpisanimi zahtevami, izvajanje inšpekcijskega nadzora ter izvajanje posebnih postopkov priznavanja skladnosti gradbenih proizvodov [5].

### **2.4.2 Bistvene zahteve**

Bistvene zahteve za gradbene objekte, ki morajo biti izpolnjene ves čas njihove življenjske dobe in ki jih je potrebno upoštevati pri določitvi zahtevanih lastnosti gradbenih proizvodov, so [5]:

- mehanska odpornost in stabilnost,
- varnost pred požarom,
- higienska in zdravstvena zaščita in varovanje okolja,
- varnost pri uporabi,
- zaščita pred hrupom in
- varčevanje z energijo in ohranjanje toplote.

Z Uredbo (EU) št. 305/2011 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 9. marca 2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov in razveljavitvi Direktive Sveta 89/106/EGS je bila dodatno vpeljana nova zahteva za gradbene objekte [6]:

- trajnostna raba naravnih virov.

Gradbeni objekti morajo biti načrtovani, grajeni in zrušeni tako, da je raba naravnih virov trajnostna in da se zagotovi predvsem [6]:

- ponovna uporaba ali možnost recikliranja gradbenih objektov, gradbenega materiala in delov po zrušenju,
- trajnost gradbenih objektov in
- uporaba okoljsko združljivih surovin in sekundarnih materialov v gradbenih objektih.

Vsi člani te uredbe so stopili v veljavo s 1. 7. 2013. Na podlagi določil Uredbe št. 305/2011 je Vlada Republike Slovenije dne 30. 5. 2013 določila besedilo predloga novega Zakona o gradbenih proizvodih in ga poslala v obravnavo Državnemu zboru Republike Slovenije po rednem postopku.

### **2.4.3 Gradbeni proizvod**

Gradbeni proizvod je proizvod, izdelan za trajno vgraditev v gradbene objekte, kot so stavbe in gradbeni inženirski objekti. Imeti mora take lastnosti, da bodo gradbeni objekti, v katere je vgrajen, s predpisi o graditvi gradbenih objektov izpolnjevali določene bistvene zahteve. Gradbeni proizvod mora biti skladen [5]:

- z ustreznimi slovenskimi nacionalnimi standardi, ki so nastali s prevzemom harmoniziranih standardov, ali
- z evropskim tehničnim soglasjem, ali
- s priznanimi nacionalnimi tehničnimi specifikacijami.

Če tehničnih specifikacij ni, sme biti dan v promet gradbeni proizvod, če je skladen:

- z ustreznimi slovenskimi nacionalnimi standardi, ali
- s slovenskim tehničnim predpisom, ali
- s slovenskim tehničnim soglasjem, podeljenim v skladu z 19. do 21. členom tega zakona.

V predlogu novega Zakona o gradbenih proizvodih z dne 30. 5. 2013 in skladno z Uredbo št. 305/2011 mora namesto dosedanje izjave o skladnosti imeti gradbeni proizvod izjavo o lastnostih, ki jo za vsak gradbeni proizvod, za katerega obstaja harmonizirana tehnična specifikacija iz 10. odstavka 2. člena Uredbe 305/2011/EU, zagotovi proizvajalec. V kolikor gradbeni proizvod ni zajet v harmoniziranih tehničnih specifikacijah, mora proizvajalec lastnosti gradbenega proizvoda dokazati na podlagi [7]:

- veljavnih slovenskih nacionalnih standardov ali
- slovenskega tehničnega soglasja ali
- drugih javno dostopnih tehničnih specifikacij, ki predstavljajo stanje tehnike in tehnologije.

## **2.5 Pravilnik o bistvenih zahtevah za gradbene objekte, ki jih je treba upoštevati pri določitvi lastnosti gradbenih proizvodov, Uradni list RS, št. 9/2001**

### **2.5.1 Namen**

Pravilnik opredeljuje bistvene zahteve za gradbene objekte, ki morajo biti izpolnjene skozi njihovo celotno življenjsko dobo in ki jih je treba upoštevati pri določitvi zahtevanih lastnosti gradbenih proizvodov [8].

### **2.5.2 Mehanska odpornost in stabilnost**

Gradbeni objekt mora biti projektiran in grajen tako, da obremenitve, ki jim bo verjetno izpostavljen med gradnjo in uporabo, ne bodo povzročile [8]:

- porušitve celotnega ali dela gradbenega objekta,
- deformacij, večjih od dopustne ravni,
- škode na drugih delih gradbenega objekta ali na napeljavi ali vgrajeni opremi,
- škode, katere obseg je nesorazmerno velik glede na osnovni vzrok.

### **2.5.3 Varstvo okolja in človekovega zdravja**

Gradbeni objekt mora biti projektiran in grajen tako, da ne bo ogrožal higiene ali zdravja oseb v gradbenem objektu ali sosedov, predvsem ne zaradi [8]:

- uhajanja strupenih plinov,
- prisotnosti nevarnih delcev ali plinov v zraku,
- emisij nevarnega sevanja,
- onesnaženja ali zastrupitve vode ali tal,
- napačnega odstranjevanja odpadnih voda, dima, trdnih ali tekočih odpadkov ali
- prisotnosti vlage v delih gradbenega objekta ali na površinah znotraj gradbenega objekta.

### **3 INDUSTRIJSKI ODPADKI**

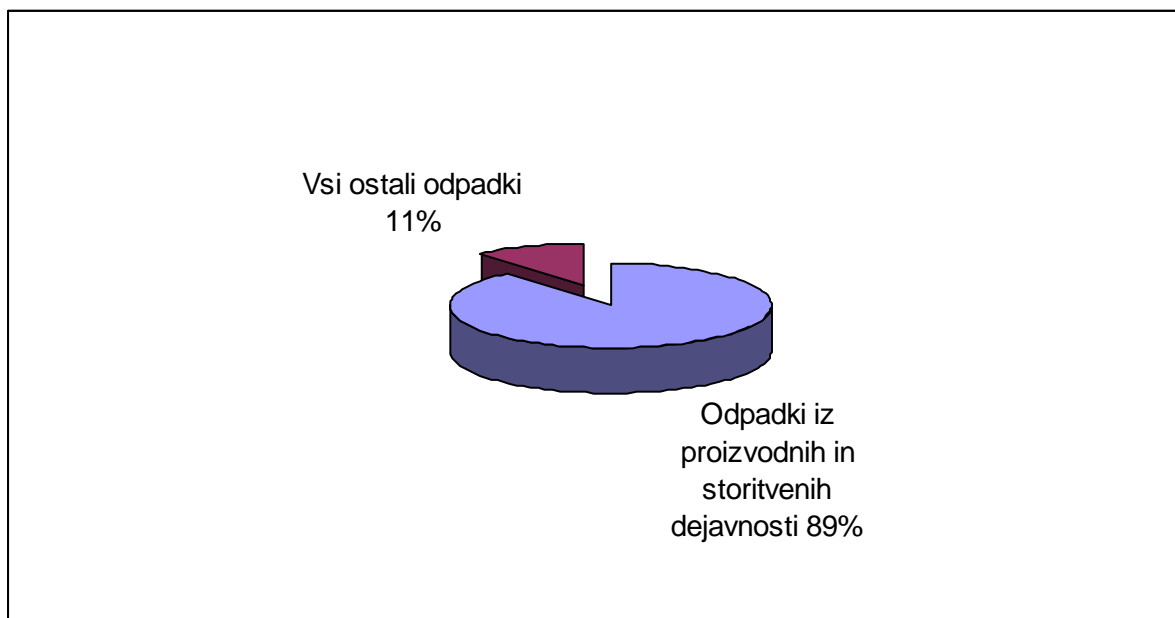
Vse večja raba naravnih virov surovin in energije na eni strani in želja po ohranjanju okolja na drugi strani, nas sili v iskanje alternativnih rešitev, ki se odražajo v povečani uporabi novih in obnovljivih virov energije, uporabi recikliranih odpadkov ter uporabi alternativnih materialov. Del teh alternativnih materialov so industrijski odpadki, ki nastajajo v različnih proizvodnih procesih. Z ustreznim znanjem o ravnanju z njimi, njihovi predelavi in možnostih ponovne uporabe, skupaj s sodobno tehnologijo in na podlagi ustreznih administrativnih postopkov, lahko industrijski odpadek preneha biti odpadek in postane vir surovin [9].

Za industrijske odpadke je značilna velika stopnja sortiranosti glede na vir nastanka, kar znatno poenostavi njihovo nadaljnjo predelavo. Danes industrija v procesu nastanka industrijskih odpadkov vključuje dodatne postopke z namenom boljšega ločevanja in izboljšanja njihove kvalitete. Poleg tega se načrtuje nove in modernizira obstoječe proizvodne procese, ki bodo zmanjšali količino odpadkov. Odpadki iz industrije se večinoma odlagajo na industrijskih deponijah ali skladiščijo na območju podjetij [10].

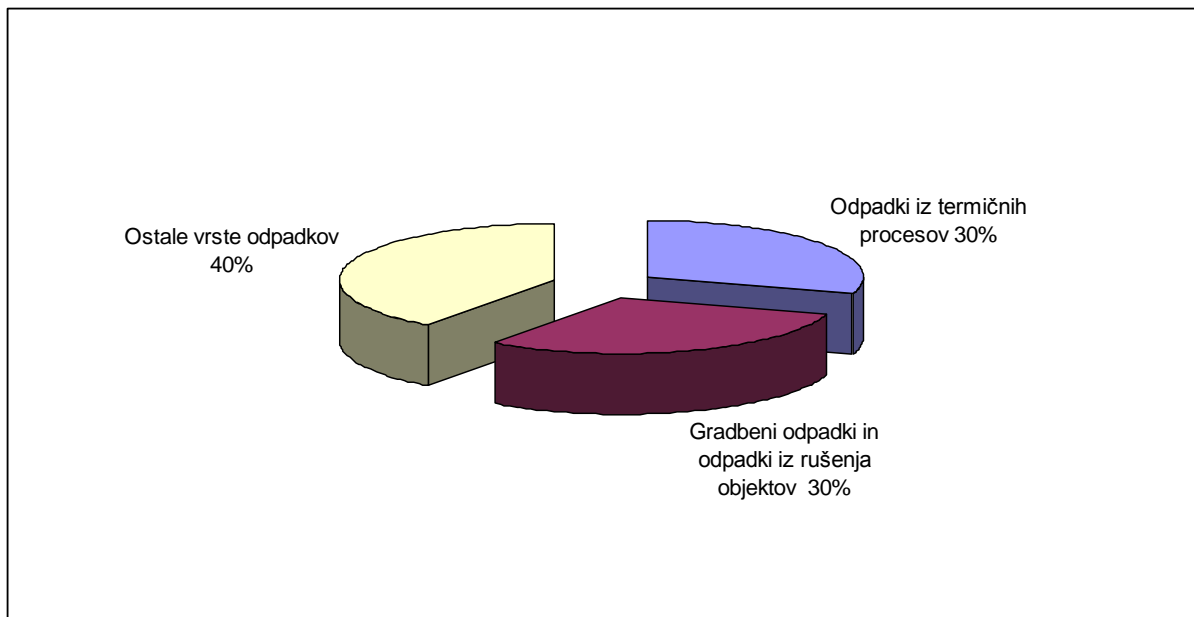
Če se združijo znanja na področju ravnanja z odpadki, predelave in možnosti ponovne uporabe skupaj s sodobno tehnologijo, lahko odpadek postane uporaben vir surovin. Med najbolj perspektivne industrijske odpadke tako spadajo tudi jeklarske žindre [3].

#### 4 STATISTIKA ODPADKOV

V Sloveniji je nastalo v letu 2011 preko 6,5 milijona ton vseh vrst odpadkov, od tega 89 % v proizvodnih in storitvenih dejavnostih (grafikon 1). Zgolj v proizvodnih dejavnostih je nastalo za okoli 4,1 milijona ton odpadkov. Glede na vrsto odpadka iz proizvodnih in storitvenih dejavnosti je nastalo največ odpadkov iz termičnih procesov, kar predstavlja 30 % celotne količine odpadkov (grafikon 2). Vseh nevarnih odpadkov je nastalo za približno 138.000 ton, od tega predstavljajo odpadki iz proizvodnih in storitvenih dejavnosti 97 % celotne količine. Nevarni odpadki iz proizvodnih dejavnosti so predstavljali 86 % vseh nevarnih odpadkov iz proizvodnih in storitvenih dejavnosti. Skupno se je predelalo več kot 6 milijonov ton vseh vrst odpadkov, odstranjenih pa je bilo za okoli 1 milijon ton. Podjetja so približno polovico lastnih odpadkov predelala ali odstranila interno [11].



Grafikon 1: Količine odpadkov glede na vrsto nastanka [11].



Grafikon 2: Količine odpadkov glede na vrsto odpadka [11].

## 5 ŽLINDRA

### 5.1 Pravni status

O pravnem statusu žlindre, torej njena uvrstitev kot odpadek, izdelek ali stranski produkt, se je razpravljalo po vsem svetu že več kot 25 let [12].

Evropska direktiva o odpadkih 2008/98/ES je jasno opredelila merila za stranske produkte (5. člen), kakor tudi za snovi ali materiale, ki so prenehali biti odpadki (6. člen) in na koncu postali uporaben izdelek/sekundarna surovina [12].

EU Direktiva o odpadkih 2008/98/ES se je prenesla v slovenski pravni red kot Uredba o odpadkih, Uradni list RS, št. 103/2011. V njej je v 7. členu opredeljen pojem stranski proizvod, v 8. členu pa so opredeljeni pogoji za prenehanje statusa odpadka.

V primeru žlindre torej obstajata dve možnosti [12]:

- žindra se šteje kot stranski proizvod, ki je v tekočem stanju, neposredno po njenem nastanku, z ali brez procesnih postopkov, ali
- žindra se najprej upošteva kot odpadek, vendar preneha biti odpadek po predelavi po R5 postopku (recikliranje/pridobivanje drugih anorganskih materialov z drobljenjem, mletjem, sortiranjem, klasiranjem ali sejanjem).

Pred revizijo EU direktive o odpadkih ni bilo opredelitve stranskih proizvodov v evropski zakonodaji. Evropska komisija je priznala potrebo po pojasnilu in izdala Sporočilo komisije Svetu in Evropskemu parlamentu - razlaga o odpadkih in stranskih proizvodih (COM (2007) 59 konč.) [12].

O žlindrah in prahu iz proizvodnje železa in jekla je Evropska komisija zapisala [13]:

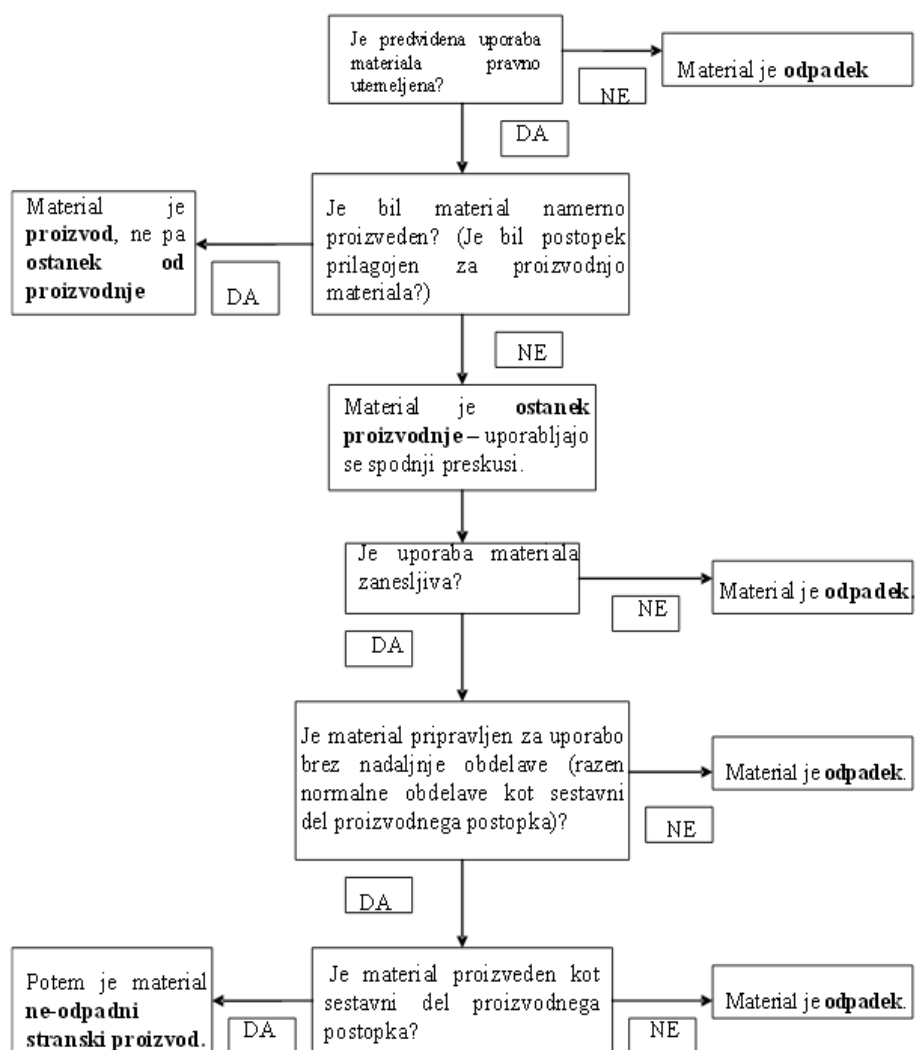
*»Žindra plavžne peči se proizvaja vzporedno z vročim železom v plavžni peči. Proizvodni postopek železa je prilagojen za zagotavljanje, da ima žindra predpisane tehnične kakovosti. Tehnična izbira je narejena na začetku proizvodnega postopka, ki določa vrsto proizvedene žlindre. Poleg tega je uporaba žlindre zanesljiva v številnih jasno opredeljenih končnih uporabah in povpraševanje je veliko. Žindra plavžne peči se lahko uporabi neposredno na koncu proizvodnega postopka, brez nadaljnje obdelave, ki ni sestavni del tega proizvodnega postopka (kot je drobljenje do ustrezne velikosti delca). Zato se lahko za ta material šteje, da ne sodi v opredelitev odpadkov.*

*Nasprotno je razžvepljana žindra proizvedena zaradi potrebe po odstranjevanju žvepla pred predelavo železa v jeklo. Nastala žindra je bogata z žveplom, se ne more uporabiti ali reciklirati v metalurškem krogu in se zato ponavadi odlaga na deponijah. Druga vrsta primera*



je prah, pridobljen iz proizvodnega postopka jekla pri čiščenju zraka znotraj obrata. Ta se med postopkom ekstrakcije ujame v filtrih. Te filtre se lahko čisti ter kovinsko vsebino s postopkom recikliranja vrne v gospodarski cikel. Ta ostanka proizvodnje sta zato od točke proizvodnje z železno vsebino, iz filtrov, odpadka in prenehata biti odpadka, ko sta enkrat reciklirana».

V prilogi II je Evropska komisija priložila shemo, s katero se določi, ali gre za odpadke ali za stranski proizvod (slika 2).



Slika 2: Shema odločanja, ali gre za odpadke ali za stranski proizvod [13].

Evropski katalog odpadkov (EWC) vsebuje dve postavki žindre kot odpadke iz železarske in jeklarske industrije, ki nastane s termičnim procesom:

- 10 02 01 odpadki iz predelave žindre
- 10 02 02 nepredelana žindra

Metalurška industrija je sprejela, da se v nekaterih primerih lahko žindra klasificira bodisi z 10 02 01 ali 10 02 02, vendar pa je glede nepredelanih žlinder pomembno poudariti, da je že v letu 2002 na zahtevo Nemčije Komisija EU odgovorila, da so naslednje dejavnosti primer predelave žindre [12]:

- granulacija,
- peletiranje,
- penjenje,
- pravilno strjevanje povezano z določeno toplotno obdelavo in
- ločevanje, drobljenje, sejanje, rezkanje (brušenje).

Obdelava tekoče žindre z  $O_2$  in  $SiO_2$  kot tudi z boraksom in drugimi podobnimi stabilizacijskimi snovmi se danes uporablja kot dobro uveljavljen industrijski proces za stabilizacijo žindre že v tekoči fazi. Ti naštetih industrijski procesi predelave žindre pripadajo popolnoma integriranemu procesu oblikovanja žindre. Kemična sestava žindre se s tem ne spremeni, izboljšajo se zgolj njene fizikalne in mehanske lastnosti, kot nadaljevanje proizvodnega procesa brez prekinitvev. Zgoraj navedeno pomeni, da žindra, ki je doživela enega ali več teh postopkov, ni zajeta v Evropskem katalogu odpadkov (EWC) [12].

## 5.2 Metalurška žindra

Metalurgija je industrijska dejavnost, ki pridobiva kovine ali sekundarne surovine in jih predeluje v polproizvode in končne proizvode. Metalurgija se loči na procesno metalurgijo, fizikalno metalurgijo, metalurgijo železa in jekla («črna metalurgija»), metalurgijo neželeznih kovin («barvno metalurgija») in metalurgijo prahov [14].

Metalurška žindra je trden ostanek pri pridobivanju kovin v različnih metalurških postopkih, ki s svojo rafinacijsko sposobnostjo očisti talino kovine [3].

Rafinacija kovin z žindro poteka tako, da se določene sestavine v talini porazdelijo med kovino in žindro. Žindre morajo dobro teči, se ločiti od kovine in nase prevzeti različne elemente, ki škodijo tehnološkim lastnostim kovin ter njihovim zlitinam. Žindra uravnava hitrost prenosa kisika iz oksidacijske faza v staljeno kovino ter jo ščiti pred plini. Kovine ščiti tudi pred pregretjem, predvsem pri taljenju v elektroobložni peči [15].

Žindre, steklaste (amorfne) ali kristalinične sestave, so kamenemu agregatu podobni anorganski pretežno nekovinski strjeni ostanki taline kovin iz procesov metalurgije. Kemijska in morfološka sestava žindre je odvisni od postopka in uporabljenega procesa ohlajanja [14].

### **5.3 Kemična sestava žlindre**

Glede na kemično sestavo delimo metalurške žlindre na [15]:

- kisle (prevladuje  $\text{SiO}_2$ ),
- bazične (prevladuje  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$  itd.),
- nevtralne (prevladuje  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

### **5.4 Fizikalne lastnosti žlindre**

#### **5.4.1 Viskoznost metalurških žlindre**

Žlindra mora imeti v metalurških procesih visoko stopnjo gibljivosti, kar pa je odvisno od viskoznosti. Hitrost difuzije pri metalurških reakcijah, s katero se uravnava prenos mase, je obratno sorazmerna viskoznosti metalurških žlinder [16].

V industrijski praksi je žlindra kislá, če pada njena viskoznost počasi z višjo temperaturo. Pri bazičnih žlindrah je nasprotno. Njihova viskoznost naglo pada z višjo temperaturo [17].

#### **5.4.2 Toplotna kapaciteta žlindre**

Toplotna kapaciteta žlindre vpliva na termodinamični potek posameznih metalurških reakcij in na stroške v smislu dovedene zahtevane toplotne energije. Do danes niti toplote taljenja niti toplotne kapacitete metalurških žlinder niso zadosti preučene, da bi jih lahko sistematsko razporedili [16].

#### **5.4.3 Električna prevodnost žlindre**

Električna prevodnost žlinder je pomembna pri izdelavi jekla po postopkih sekundarne metalurgije. Žlindre v elektroobločni peči slabo prevajajo električni in toplotni tok zaradi stabilne mreže plinskih mehurčkov. V elektroobločni peči se na relaciji električni oblok-žlindra-jeklo vzpostavi drugačen način prenosa toplote, ki je energijsko učinkovit [16].

#### **5.4.4 Toplotna prevodnost žlindre**

Toplotna prevodnost je podobna električni prevodnosti. Prenos toplote v metalurškem procesu ni odvisen samo od toplotne prevodnosti žlindre, temveč tudi od hitrostnih parametrov poteka metalurških reakcij preko faznih mej plinska atmosfera-žlindra-kovinska kopel. Za intenziteto prenosa toplote je sestava in fizična aktivnost kopeli zelo pomembna [16].

## 5.5 Tehnološke funkcije žindre

Žindra [16]:

- omogoča, da se metalurški procesi odvijajo termodinamično blizu ravnotežnim razmeram,
- prevzema za kovino škodljive primesi, ki močno negativno vplivajo na kvaliteto končnega proizvoda (žveplo, fosfor,...),
- ima sposobnost ločevanja od tekoče kovinske faze,
- sprejema delce trdnih dispergiranih nekovinskih faz, ki nastajajo kot produkti reakcij, ki potekajo med kovinsko, žindrino in plinasto fazo,
- ščiti tekoče kovine pred absorpcijo škodljivih plinov ( $N_2$ ,  $H_2$  in  $O_2$ ).

## 5.6 Zgodovina uporabe žindre

Uporaba žindre v gradbeništvu izhaja že iz grških in rimskih časov. Začetki segajo v leto 27 pr.n.št., ko so Rimljani uporabljali lomljene kose železarske žindre za nosilne konstrukcije v cestogradnji [18].

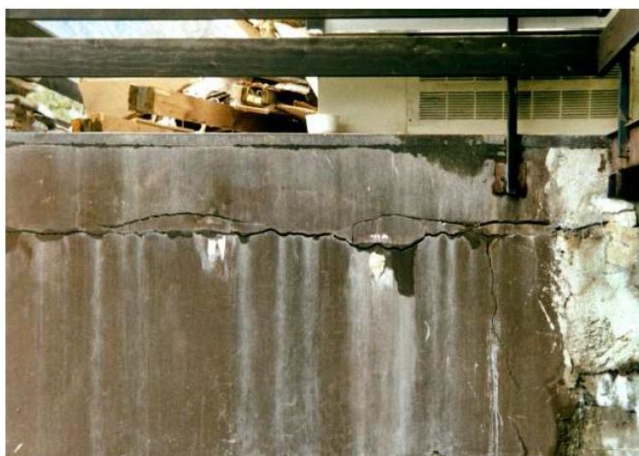
Z novim vekom se je začela bolj razširjena uporaba žindre. Nemci so v 16. stoletju iz lite železove žindre za vojne potrebe izdelovali topovske krogle. V 17. stoletju so začeli z uporabo žindre v ZDA, kjer so jo uporabljali za ladijski balast. V 18. stoletju so se v Evropi kamni iz lite železove žindre uporabljali za potrebe gradnje stavb. Anglija je v začetku 19. stoletja začela z uporabo žindre v cestogradnji, zgrajena je bila prva cesta iz žindre. Konec 19. stoletja so v Evropi in ZDA začeli s tlakovanjem cest z bloki iz žindre. Začetek uporabe žindre v cementu sega v 18. stoletje, ko so žindro kombinirali z gašenim apnom. Sredi 19. stoletja so v Nemčiji začeli v tržne namene proizvajati cement z dodatkom žindre. Ker so s cementom z dodatkom žindre dosegli velik uspeh, so konec 19. stoletja z njim zgradili pariški podzemni metro. Napredek na tem področju do sredine 20. stoletja je privedel do uporabe žindrinega cementa kot samostojnega produkta. Kljub temu, da je žindra izkazovala široko uporabnost v Evropi, so v ZDA uporabljali žindro večinoma za gramozne grede železniških tirov (slika 3) [18].

V sodobni zgodovini se je z odkritjem latentno hidravličnih lastnosti žindre omogočilo množično uporabo žindre skupaj s cementom [18].



Slika 3: Uporaba žindre za gramozno gredo železniških tirov [19].

V Sloveniji sega uporaba jeklarske žindre v gradbeništvu v sedemdeseta in osemdeseta leta prejšnjega stoletja. Takrat je v podjetju Železarna Jesenice nastajala Siemens-Martinova žindra, ki se je uporabljala v nosilnih in nevezanih nosilnih plasteh ter pod objekti. Slaba lastnost te žindre je bila, da ni bila stabilna. Zaradi slabega poznavanja same žindre in stihijske, nekontrolirane uporabe je nabrekala, kar pa je povzročilo poškodbe na cestiščih in objektih (slika 4). Zaradi tega se je razvoj uporabe jeklarske žindre v gradbene namene končal. Žindra je prišla na slab glas [9].

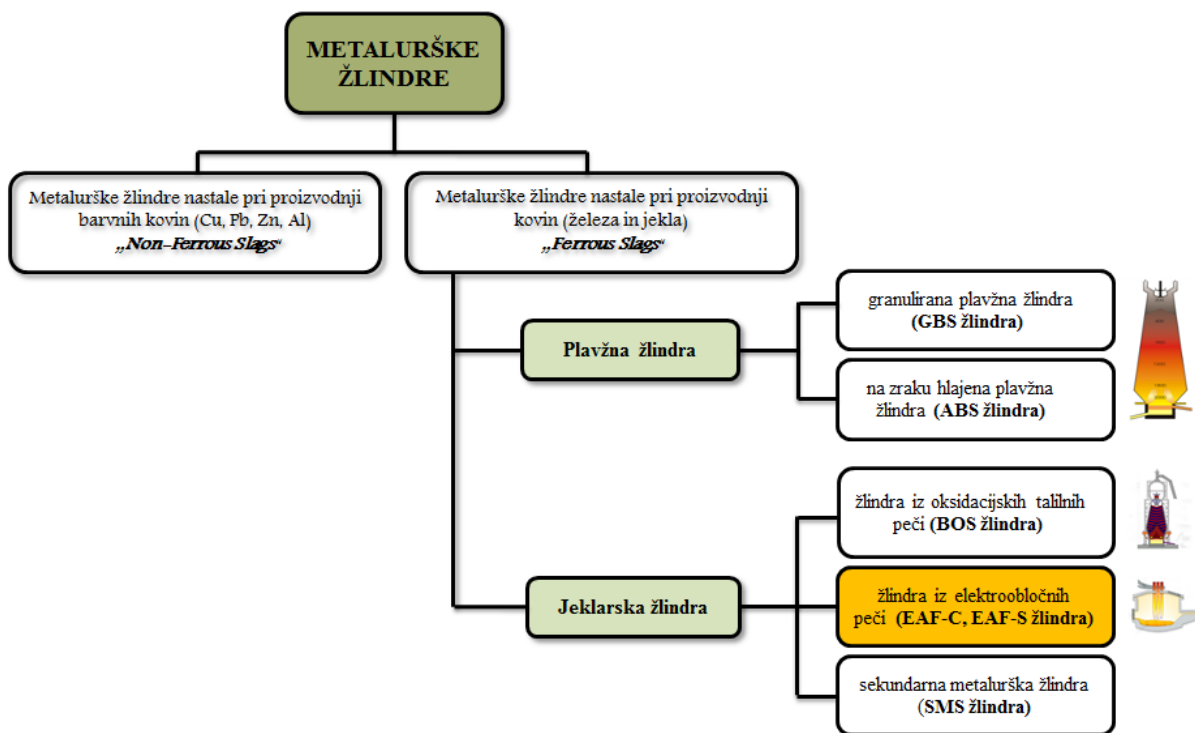


Slika 4: Posledice nabrekanja zaradi Siemens-Martinove žindre v trgovini na Hrušici [20].

### 5.7 Delitev metalurških žlinder

Metalurške žindre v grobem delimo glede na njihov izvor v dve različni skupini (slika 5). Manjši delež (12 %) metalurških žlinder predstavljajo žindre nastale v industriji barvnih kovin

(npr. baker, svinec, cink, aluminij), večji delež (88 %) pa žindre nastale pri proizvodnji jekla in železa [3].



Slika 5: Delitev metalurških žindrer glede na izvor [3].

### 5.7.1 Metalurške žindre pri proizvodnji jekla in železa

Metalurške žindre nastale pri proizvodnji železa in jekla (plavžna žindra, jeklarska žindra) so industrijski stranski produkti, ki nastanejo z metalurškimi procesi. Imajo ugodne fizikalne in mehanske lastnosti, kar omogoča razširjeno uporabo v gradbeništvu. Nastajajo pri procesu pridobivanja železa iz železove rude, jekla iz vroče kovine in pri taljenju rude ali starega odpadnega železa in kovine v pečeh ter s poznejšo obdelavo surovega jekla. Vrsta žindre je odvisna od vrste proizvodnega procesa pri pridobivanju železa in jekla [14].

Metalurške žindre pri proizvodnje jekla in železa se glede na vrsto proizvodnega procesa delijo na [14]:

- železarske žindre:
  - plavžne žindre (Blast Furnace Slag - BFS):
    - granulirane plavžne žindre (Granulated Blast Furnace Slags – GBS),
    - na zraku hlajene plavžne žindre (Air-Cooled Blast Furnace Slags - ABS).
- jeklarske žindre:

- žindre iz konverterskih peči (Basic Oxygen Furnace Slag - BOS),
- žindre iz elektroobločnih peči (Electric Arc Furnace Slag - EAF C in EAF S),
- žindre iz procesov sekundarne metalurgije (Secondary metallurgical slag - SMS).

➤ druge vrste žlinder

#### **5.7.1.1 Plavžna žindra**

Plavžna žindra se proizvaja v plavžih. Je stranski produkt pri proizvodnji surovega železa s termo-kemično redukcijo in taljenjem oksidne železove rude. Pri segrevanju rude dodajajo apnenec, dolomit in ostale dodatke ter redukcijski sredstvi (koks in premog). Surovo železo in tekoča žindra se zbirata v spodnjem delu plavža. Žindra zaradi manjše gostote od staljenega železa leži v plasti nad njim. Obstaja več načinov kako lahko obdelujemo talino žindre potem, ko jo odvedemo iz plavža. To je odvisno od predvidenega namena končne uporabe [14].

Žindro se lahko deponirana na ustreznem odlagališču, kjer se počasno ohlaja pod atmosferskimi vpliv. Tako se formira kristalinična struktura. S tem nastane ABS žindra (Air-Cooled Blast Furnace Slag) svetlo sive barve, podobna kamenemu agregatu z veliko poroznostjo [14].

Če želimo, da se v žindri ohrani steklasta faza, se jo hitro ohladi in granulira. V tem primeru nastane granulirana plavžna žindra oz. (G)GBS žindra (Ground Granulated Blast Furnace Slag), ki ima latentne hidravličnine lastnosti. To omogoča njeno uporabo v cementu in betonu [14].

#### **5.7.1.2 Jeklarska žindra**

Jeklarske žindre nastajajo pri procesu proizvodnje in plemenitenja jekel. Pri proizvodnji jekla se uporabljata dva različna postopka. Prevladujoča je primarna proizvodnja jekla s predelavo železove rude v plavžih in proizvodnjo jekla v oksidacijskih talilnih pečeh. V zadnjem času narašča sekundarna proizvodnja jekla, proizvedenega v elektroobločnih pečeh. Napoveduje se, da bo ta vrsta proizvodnje jekla preseгла primarno proizvodnjo. V obeh primerih se jeklo pridobiva s pretaljevanjem odpadnega jekla in/ali železa [3].

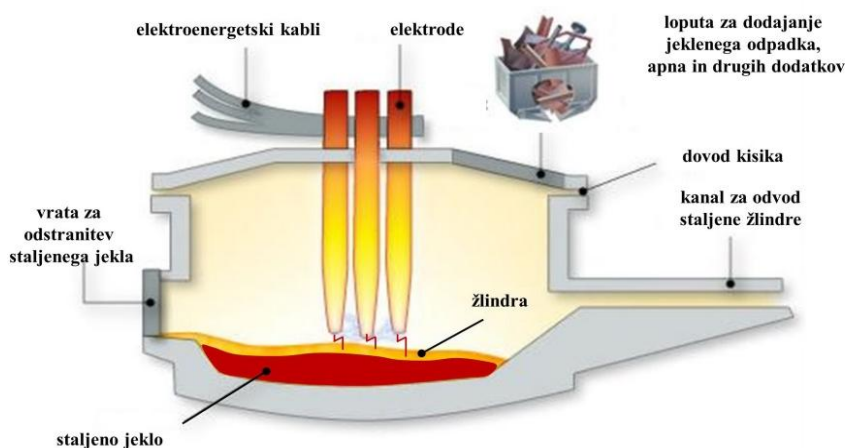
Glede na vrsto procesa se jeklarske žindre med seboj razlikujejo po sestavi in lastnostih. Večina žlinder nastane pri proizvodnji surovega jekla v oksidacijskih talilnih (BOS žindra) ali v elektroobločnih pečeh (EAF žindra) [3].

### 5.7.1.2.1 Žindra iz oksidacijskih talilnih peči (BOS žindra)

V oksidacijskih talilnih pečeh se obdeluje talino surovega železa, ki je bogata z ogljikom. Z vpihovanjem čistega kisika v vročo talino surovega železa, se raven ogljika v talini zniža in s tem se ta pretvori v nizko legirano jeklo [3].

### 5.7.1.2.2 Žindra iz elektroobločnih peči (EAF C, EAF S žindra)

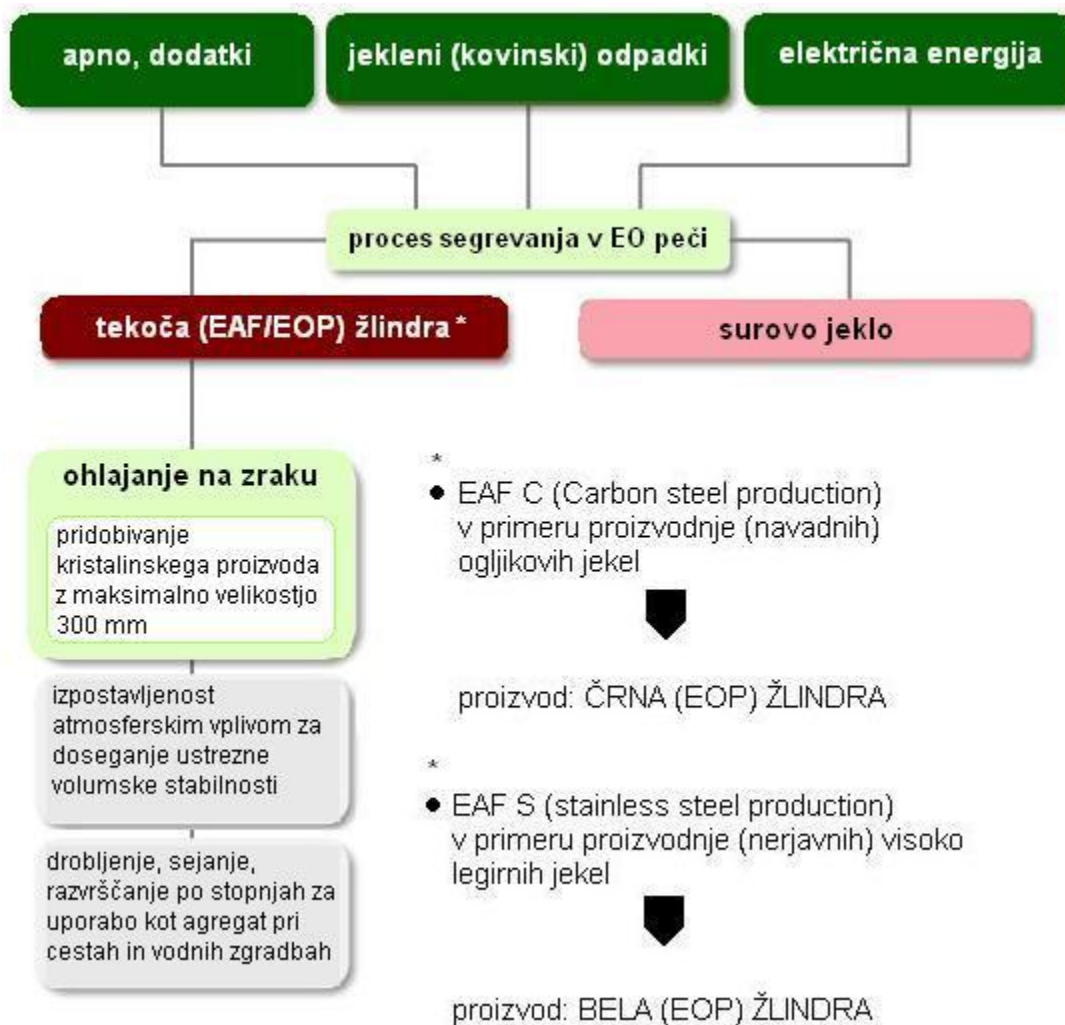
V elektroobločno peč se dodaja jekleni ali železni odpadke. Poleg kovinskega odpadka se dodajajo tudi apno, kisik in drugi potrebni dodatki, ki vežejo nečistoče v žindro. Vertikalno proti kovinskemu odpadku potekajo grafitne elektrode (slika 6). Ob stiku elektrod s kovinskim odpadkom se ob prisotnosti električne energije peč segreje do približno 1.600 °C. Žindra se zbira v plasti nad talino kovine, zaradi njene manjše prostorninske mase. Po končanem postopku se žindro odlije pod peč, kjer se prične strjevati (preglednica 3). Pri elektroobločnem procesu na 1 tono pridobljenega jekla tako nastane od 120 do 150 kg žindre [3].



Slika 6: Shematski prikaz elektroobločne peči [3].

Glede na vrsto procesa v elektroobločni peči nastajata dve vrsti žindre, ki se ločita po kemijskih, mineraloških in fizikalnih lastnostih, kar vpliva na njuno možnost uporabe (slika 7) [3].





Slika 7: Proces pridobivanja in pridelave žindre iz elektroobločne peči [14].

Največ nastaja EAF C žindre (Electric Arc Furnace Slag from Carbon Steel production) s proizvodnjo ogljičnih nelegiranih jekel (slika 8). Vhodna surovina je odpadno jeklo (navadnih) ogljikovih jekel. Zaradi njenih odličnih lastnosti je zelo primerna za uporabo v gradbeništvu. Laično je poimenovana »črna jeklarska žindra« [3, 14].



Slika 8: Črna EAF C žindra [21].

Preglednica 3: Ukrepi, ki vplivajo na kvaliteto žindre iz elektroobločne peči [14].

Faza procesa	Ukrepi, ki vplivajo na kvaliteto žindre	Vpliv na lastnosti
Priprava surovin	izbira, razvrstitev in predhodna obdelava surovih materialov v skladu s kemično sestavo EOP plavžne žindre	kemijska sestava (npr. CaO, SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , FeO <sub>x</sub> , MgO, mikroelementi)
Proces taljenja	izbira ustreznih pogojev procesa (deleža kisika, deleža dodanega apna, kvalitete odpadnih kovin, stopnje redukcije, ...)	- temperatura - sestava proizvoda (npr. FeO, MgO <sub>prosti</sub> ) - volumska stabilnost
Toplotna obdelava	počasno ohlajanje	- sestava - poroznost - trdnost - porazdelitev velikosti zrn (zrnava sestava)
Predelava	- drobljenje - sejanje - razvrščanje po stopnjah	- velikost zrna - oblika zrna - porazdelitev velikosti zrn (zrnava sestava)

Pri procesu proizvodnje nerjavnih, visoko legiranih jekel v elektroobločnih pečeh nastaja EAF S žindra (Electric Arc Furnace Slag from Stainless Steel production). Vhodna surovina je odpadki iz visoko ali nizko legiranih jekel in drugih dodanih zlitin. Laično poimenovanje »bela žindra« je najverjetneje posledica fizikalne značilnosti, saj zaradi mineraloških sprememb pri ohlajanju razpada v svetlosiv prah (slika 9) [3, 14].



Slika 9: Bela EAF S žindra [21].

Črna in bela jeklarska žindra imata večjo prostorninsko maso kot plavžna žindra in večina naravnih agregatov kamenega izvora. Vsebuje tudi večji delež kovin, katere se z magnetno separacijo odstrani. Črna žindra se po izstopu iz elektroobločne peči deponira na prostem in se intenzivno moči ali prši, s čimer se počasi ohlaja v material s kristalinično strukturo. S takšnim načinom ohlajanja pospešimo tudi proces karbonatizacije apna v žindri in s tem zagotovimo stabilnost žindre (ob poznejšem stiku z vodo ne nabreka). Po izločanju kovin iz žindre sledi predelava, ki obsega večstopenjsko drobljenje, sejanje in frakcioniranje v proizvode različne zrnivosti. Kovinski ostanek v beli žindri se iz procesa magnetne separacije vrne nazaj v elektroobločno peč, s čimer se ohranja naravne vire. Preostali mineralni produkt pa ima potencial za uporabo v gradbeništvu [14].

#### **5.7.1.2.3 Sekundarne metalurške žindre (SMS žindre)**

Če je v procesu surovo jeklo iz primarne proizvodnje jekla obdelano z nekaterimi drugimi metalurškimi procesi (v LF, VOD, VD, AOD procesih), nastajajo manjše količine žindre. Te žindre so po sestavi in lastnostih podobne EAF S žindri. Zaradi tega se tudi zanje uporablja laično ime »bela žindra« [3].

Vakuumski oksidacijski postopek (VOD) se uporablja za izdelavo nerjavnih jekel. Predtalina iz primarnega agregata iz elektroobločne peči se zlije v livno ponev, kjer se odstrani žindra.

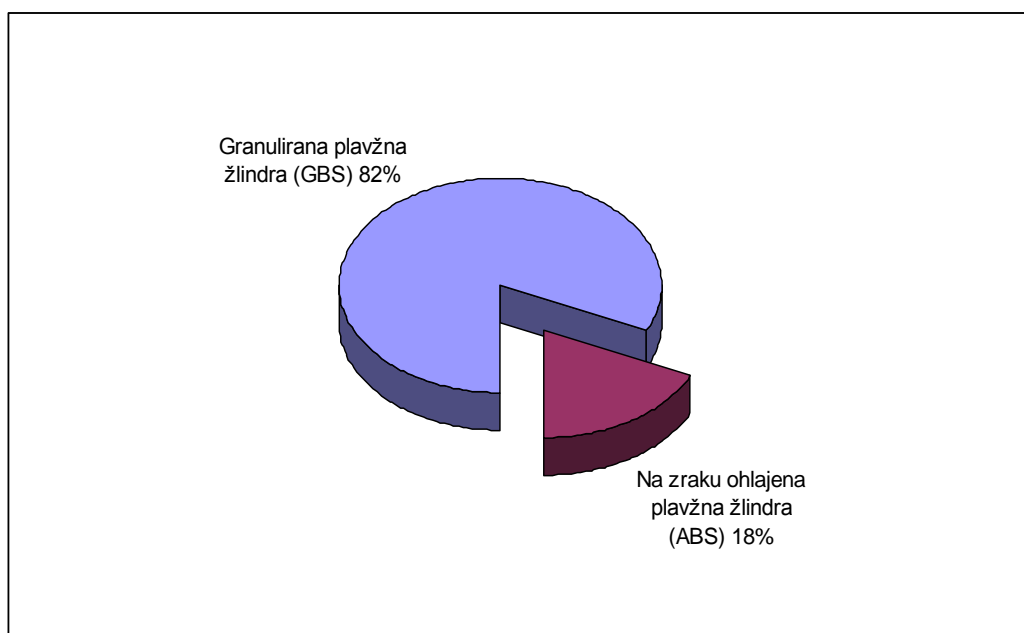
Livno ponev s predtalino se vloži v vakuumski kotel in zapre. Kisik, potreben za oksidacijo, se injektira na površino predtaline. Predtalino se nato meša z inertnim plinom, ki se ga dovaja v reaktorsko posodo. Značilnost tega VOD postopka je v izjemno nizki vsebnosti ogljika pri visoki vsebnosti kroma [16].

#### 5.7.1.2.4 Druge vrste žindre

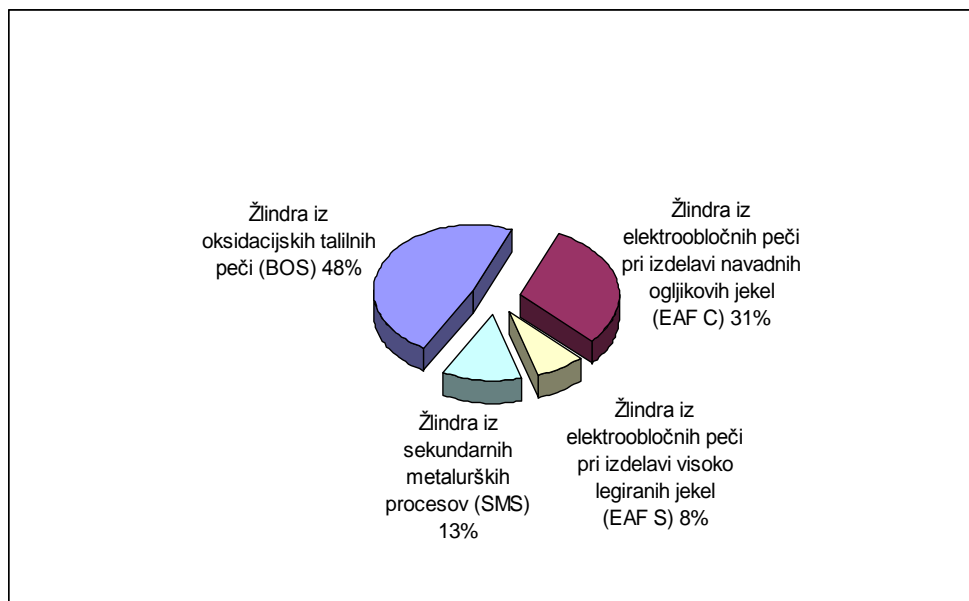
Z dodatnimi metalurškimi procesi nastanejo tudi druge vrste žinder (npr. žindre nastale pri razžveplanju jekla) [14].

### 5.8 Količine proizvedene žindre

Letna evropska proizvodnja metalurških žinder iz proizvodnje železa in jekla je za leto 2010 znašala približno 45 milijonov ton (sliki 10, 11). Delež jeklarske žindre je bil 48 % oziroma 21,8 milijonov ton (preglednica 4). Na podlagi statističnih podatkov Euroslaga je razvidno, da se je letna proizvodnja jeklarskih žinder v Evropi za leto 2010 v primerjavi z letom 2006 povečala za približno 30 % [3].



Slika 10: Količine proizvedene metalurške žindre [12].



Slika 11: Količine proizvedene jeklarske žindre [12].

Preglednica 4: Prikaz letne proizvodnje jeklarskih žlinder v Evropi za leto 2010 [3].

Vrsta jeklarske žindre	Delež [%]	Letna proizvodnja [milijonov ton]
žindra iz oksidacijskih talilnih peči (BOS)	48	10,5
jeklarska žindra iz :		
elektroobločnih peči pri izdelavi ogljikovih jekel (EAF C)	31	6,8
elektroobločnih peči pri izdelavi visoko legiranih jekel (EAF S)	8	1,7
jeklarska žindra iz sekundarnih metalurških procesov (SMS)	13	2,8

Večino žlinder v Sloveniji predstavljajo jeklarske žindre, ki nastajajo pri proizvodnji ogljičnih jekel v elektroobločnih pečeh (preglednica 5). Manjši del žlinder pa nastaja v procesih sekundarne metalurgije [3].

Preglednica 5: Letna proizvodnja jeklarskih žlinder v obdobju 2009-2012 v Sloveniji [3].

Proizvajalci žlindre v Sloveniji	Letna proizvodnja žlindre za leto [t]			
	2009	2010	2011	2012
Acroni Jesenice d.o.o. (EAF C, EAF S)	67.471	82.817	90.123	89.058
Metal Ravne d.o.o. (EAF C)	10.834	15.401	15.781	16.818
Štore Steel d.o.o. (EAF C, EAF S)	13.564	26.999	27.372	24.063
Skupaj	91.869	125.217	133.276	129.939

## 5.9 Standardizacija proizvodov iz žindre

Najpomembnejši evropski standardi, ki so relevantni za uporabo žindre v gradbeništvu so navedeni v preglednici 6 [12].

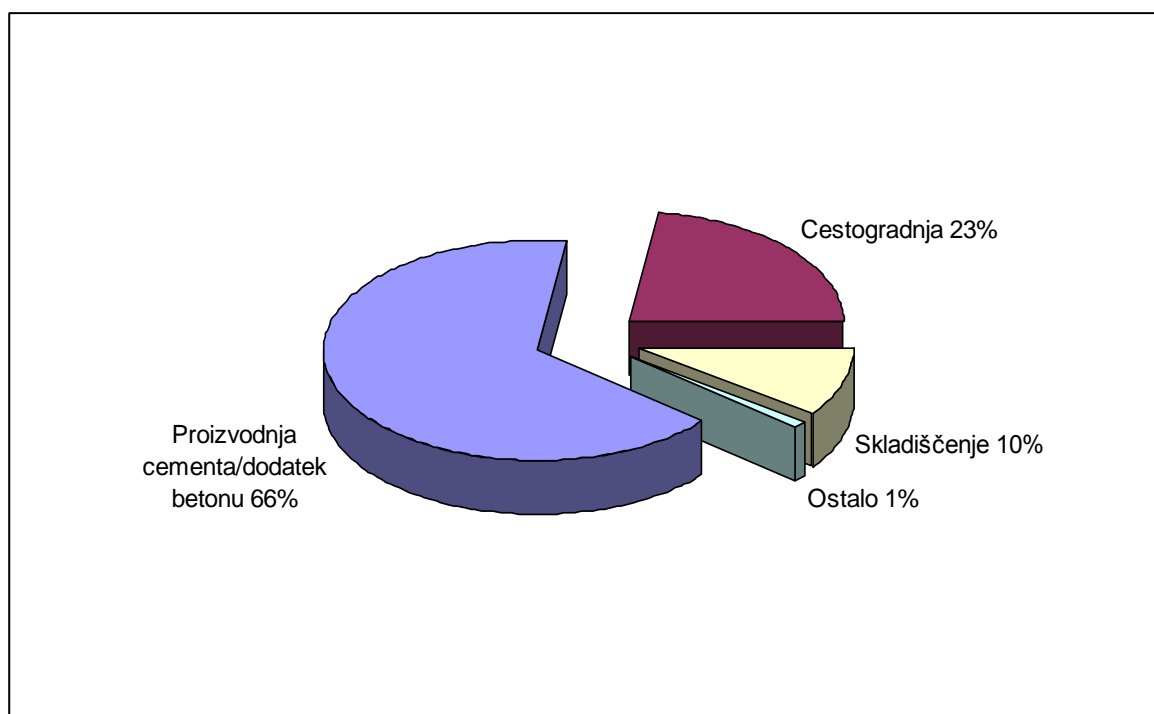
Preglednica 6: Evropski standardi za uporabo žindre v gradbeništvu [12].

SIST EN 197-1:2011: Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente
SIST EN 206-1: 2000 Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, ki ga bo kmalu nadomestil nov standard, trenutno dostopen kot končni osnutek FprEN 206: junij 2013: Beton - Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost
SIST EN 1744-1:2009+A1:2012: Preskusi kemičnih lastnosti agregatov - 1. del: Kemijska analiza
SIST EN 1744-3:2002: Preskusi kemičnih lastnosti agregatov - 3. del: Priprava izlužkov agregatov
SIST EN 12620:2013: Agregati za beton
SIST EN 13139:2013: Agregati za malte
SIST EN 13043:2013: Agregati za bitumenske zmesi in površinske prevleke za ceste, letališča in druge prometne površine
SIST EN 13242:2013: Agregati za nevezane in hidravlično vezane materiale za uporabo v inženirskih objektih in za gradnjo cest
SIST EN 13383-1:2013: Kamen za obloge pri vodnih zgradbah in drugih gradbenih delih - 1. del: Specifikacija
SIST EN 13383-2:2013: Kamen za obloge pri vodnih zgradbah in drugih gradbenih delih - 2. del: Preskusne metode
SIST EN 13285:2010: Nevezane zmesi - Zahteve
SIST EN 14227-2:2013: Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije - 2. del: Vezane zmesi z žindro
SIST EN 14227-12:2006: Hidravlično vezane zmesi - Specifikacije - 12. del: Izboljšanje zemljin z granulirano plavžno žindro
SIST EN 15167-1:2006: Grobozrnata plavžna žindra za uporabo v betonu, malti in injekcijski malti - 1. del. Definicije, specifikacije in merila skladnosti
SIST EN 13282-1:2013: Hidravlična veziva za ceste - 1. del: Hidravlična veziva za ceste, ki se hitro strjujejo - Sestava, zahteve in merila skladnosti
SIST EN 13282-3:2013: Hidravlična veziva za ceste - 3. del: Vrednotenje skladnosti
SIST EN 13450:2013: Agregati za grede železniških prog

### 5.10 Uporaba žindre

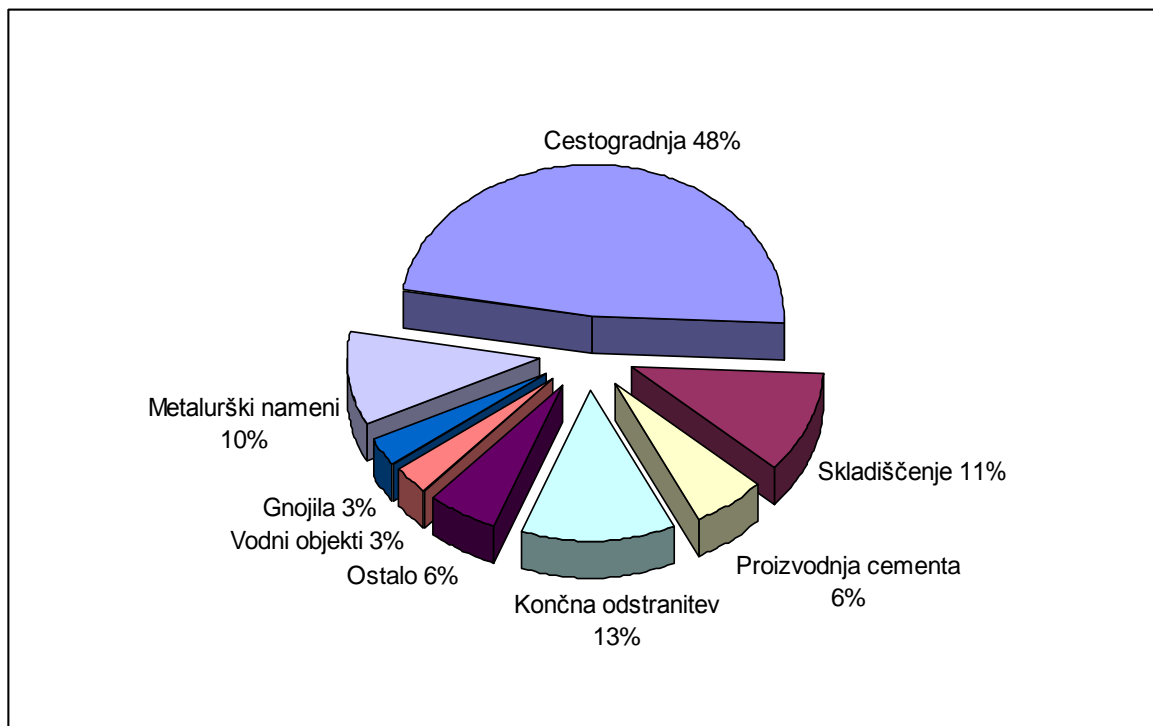
Metalurška industrija ne pridobiva samo kovin, temveč tudi stranske produkte (metalurške žindre), ki se jih uspešno uporablja v gradbeništvu in kmetijstvu. Približno 87 % žinder iz proizvodnje železa in jekla proizvedenih v Evropi se uporabi v gradbeništvu. Uporaba žindre namesto naravnih materialov predstavlja trajnostno alternativo [22].

V Evropi se je v letu 2010 okoli 66 % proizvedene plavžne žindre uporabilo kot sestavino za proizvodnjo cementa ali kot mineralni dodatek v betonu (slika 12). Uporaba žindre kot agregat v cestogradnji je znašala približno 23 %. Le majhen delež žindre se je skladiščil. Običajno je v večini evropskih držav stopnja izkoriščenosti te žindre blizu 100 % [12].



Slika 12: Uporaba plavžne žindre [12].

V Evropi se je v letu 2010, v odvisnosti od razmer na trgu, tehničnih in pravnih vidikov, uporabilo okoli 76 % proizvedene jeklarske žindre (slika 13). Največji delež je predstavljala uporaba žindre kot agregat v cestogradnji (48 %). Približno 11 % se je začasno skladiščilo za kasnejšo uporabo. Le majhen del jeklarske žindre (predvsem sekundarna metalurška žindra) se je trajno deponiral, predvsem zaradi njene fine granulacije in neželenih lastnosti v zvezi z izpiranjem. Majhna količina te žindre, pod 10 %, se je uporabila za druge namene, kot npr. za gnojilo in v metalurške namene (ponovno vračanje v elektroobložno peč) [12].



Slika 13: Uporaba jeklarske žindre [12].

### 5.10.1 Agregat

Uporaba žindre kot agregata sega že v obdobje Rimljanov, ko so jo uporabljali pri gradnji cest. Uporaba pa ni omejena samo na cestogradnjo, temveč se lahko uporablja za različne gradbene namene. Granuliran žlindrin agregat pri pravilni uporabi prispeva k trdnosti in mehanski stabilnosti konstrukcije [22].

Zrna žindre prerazporejajo napetosti v strukturi. Žindra je še posebej uporabna kot agregat, zaradi visoke mehanske odpornosti zrn, ki presega veliko naravnih agregatov (preglednica 7). Za proizvodnjo agregatov se žindra v glavnem pridobiva z drobljenjem in/ali sejanjem. Žlindrin agregat se lahko uporablja kot gradbeni material za nevezane strukture ter kot polnilo v vezanih strukturah (mešanice, ki vsebujejo veziva, kot so cement, bitumen ali druga veziva) [22].



Preglednica 7: Vrste uporabe žindre v obliki agregata [22].

Vrsta uporabe	Plavžna žindra		Jeklarska žindra
	GBS	ABS	BOS, EAF C, EAF S
nevezane in hidravlično vezane strukture	X	X	X
bitumenske mešanice	X	X	X
beton	X	X	X
malta	X	X	X
oporni zidovi			X
gabioni		X	X
grede železniških tirov		X	X
kritina strehe		X	X
nasipi	X	X	X
tesnilne mase	X		X
peskanje	X		
čiščenje odpadnih voda		X	X
nadzor kakovosti zraka			X

### 5.10.2 Asfalt

Poleg tega, da prinaša uporaba žindre kot agregata v asfaltnih zmesih okoljske koristi, zaradi zmanjšanja potrebe po naravnem mineralnem agregatu in izogibanja nepotrebni odlaganju, lahko uporaba žindre kot agregata v proizvodnji asfaltnih zmesi tudi bistveno izboljša lastnosti teh zmesi. To velja predvsem v državah, ki nimajo na voljo kvalitetnih eruptivnih agregatov ali so njihove količine premajhne. Asfaltne zmesi z žlindrinim agregatom se lahko uporabljajo za majhne prometne obremenitve, pa tudi za zelo težke prometne obremenitve [22].

Jeklarska žindra kot agregat za asfaltne zmesi [22]:

- je izometrične oblike, kar zagotavlja visoko odpornost proti nastanku kolesnic na asfaltni površini,
- je alkalna, zato zagotavlja podobne lastnosti kot bitumensko vezivo, to pa je zagotovilo za dolgo življenjsko dobo cestišč,
- je odporna na abrazijo, kar zagotavlja trajnost materiala, ki se ne bo obrabil,
- je odporna na zaglajevanje, zato lahko zagotovi varne vozne površine za celotno življenjsko obdobje obrabne plasti asfaltnega vozišča.

Uporaba žindre v asfaltu mora ustrezati harmoniziranemu standardu SIST EN 13043 [22].

### 5.10.3 Nevezane zmesi

Žindra je zaradi svoje grobe površine, ostrorobe oblike zrn in visoke odpornosti na obremenitve, zelo primerna za uporabo v nevezanih plasteh, kjer se zahteva mehansko stabilna konstrukcija (preglednica 8). Ker žindra s časom nekoliko hidratizira in s tem deloma veže, se togost v nevezani plasti povečuje s časom. To povečuje življenjsko dobo cestišča in zmanjša potrebo po vzdrževanju. Za uporabo v nevezanih plasteh mora žindra izpolnjevati zahteve standarda SIST EN 13242 [22].

Preglednica 8: Vrste uporabe žindre v nevezani zmesi [22].

Vrsta uporabe	Plavžna žindra		Jeklarska žindra
	GBS	ABS	BOS, EAF C, EAF S
neasfaltirane ceste		X	
temeljna tla, nevezana nosilna plast		X	X
nasipi	X	X	X
oporni zidovi			X
gabioni		X	X
grede železniških tirov		X	X
kritina strehe		X	

### 5.10.4 Hidravlično vezane in delno vezane zmesi

Posebna prednost plavžne žindre je v dejstvu, da je latentno hidravlična, zato lahko nadomešča tradicionalno vezivo, kot je denimo cement. S tem v zmesi povečuje nosilnost. Zahteve glede lastnosti žinder za take zmesi so podane v SIST EN 14227-2. Potek utrjevanja je odvisen od sestavin, uporabljenih v z žindro vezanih zmesih. To se lahko pospeši z dodatkom npr. granulirane žindre ali bele jeklarske žindre, ki pospeši razvoj trdnosti [22].

### 5.10.5 Beton in cement

GGBS žindra se zaradi svojih hidravličnih lastnosti uporablja kot sestavina cementa ali kot mineralni dodatek pri pripravi betonov. V okviru standarda za cement SIST EN 197-1, lahko cement vsebuje med 6 % in 95 % žindre. Obstaja tudi evropski standard SIST EN 15167 za GGBS v dveh delih [22].

Žlindrin cement ali GGBS ima visoko odpornost proti kemičnim reakcijam in nizko toploto hidratacijo. Beton iz žlindrinega cementa ali večje količine čistega GGBS ima zaradi nizke kapilarne poroznosti visoko obstojnost na vplive okolja. Te lastnosti so prednost v posebnih področjih uporabe, npr. za vodotesne kleti, jezove, vodne konstrukcije, mostove, telekomunikacijske stolpe in podobno. Z zamenjavo portlandskega cementnega klinkerja z GGBS v cementu ali betonu se je poraba naravnih surovin, kot tudi potrebe po energiji za proizvodnjo cementa in emisijah CO<sub>2</sub> močno zmanjšala [22].

Nemleta granulirana žindra (GBS), kot tudi zračno hlajena plavžna žindra (ABS), se lahko uporablja tudi kot agregat v betonu in za gradnjo cest [22].

### **5.10.6 Druge vrste uporabe**

#### **Čiščenje odpadnih voda**

Učinkovitost žindre uporabljene v ta namen je bila dokazana z več znanstvenimi študijami. Čistilna naprava za industrijske odpadne vode na Novi Zelandiji uporablja filtrno plast narejeno iz žindre za odstranjevanje fosforja [22].

#### **Gnojila**

Uporaba gnojil in snovi za zmanjšanje kislosti tal proizvedenih iz plavžnih in jeklarskih žlinder ima dolgo tradicijo. Kalcij in magnezij v žindri imata dobro topnost, služita kot hranilo za rastline ter povečujeta ali vzdržujeta pH vrednost tal [22].

#### **Žlindrin pesek**

Žlindrin pesek nastane s fino mokro obdelavo žindre nastale v elektroobločni peči pri proizvodnji nerjavečega jekla (EAF S žindra) in s sekundarnimi metalurškimi procesi (SMS žindra). Mineralni agregat je pretežno kalcijev silikat, s približno 50 % delcev manjših kot 75 mikrometrov [22].

Žlindrin pesek se lahko uporablja za [22]:

- kmetijstvo - uravnavanje pH vrednosti tal,
- stabilizacijo tal,
- nosilna in temeljna tla pri cestah,
- nasipe,
- stabilizacijo blata,
- stabilizacijo nevarnih odpadkov,
- cement in beton,
- asfalt.

### 5.11 Bela žindra iz podjetja Acroni

Družba Acroni s predelavo odpadnega železa z dodatki kovinskih zlitin in žindrotvornih komponent pridobiva različne vrste jekel [23].

Pri proizvodnji jekel tako v Acroniju nastajajo kot stranski produkt jeklarske žindre. Količinsko največ nastaja EAF C žlinder, pomemben delež pa odpade tudi na EAF S in SMS žindre, torej na bele žindre [24].

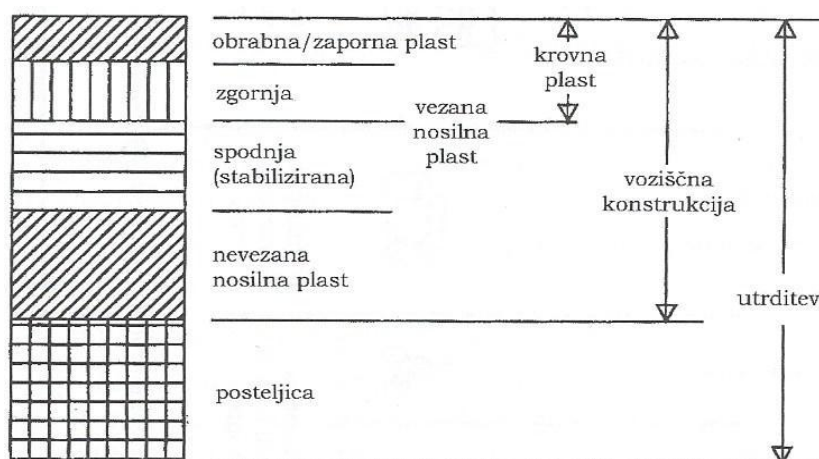
Vsako leto v podjetju Acroni nastane približno 30.000 ton bele žindre. V podjetju Acroni belo žindro prevzema podjetje Harsco Minerali, ki je konec junija 2013 pridobilo gradbeno dovoljenje za predelavo bele žindre. Postavljene so predelovalne linije, kjer se na osnovi mokrega postopka ločujejo mineralni produkt od kovinskih ostankov. Kovinski delci se tako vračajo nazaj med taljenje jeklenega vložka v elektroobložni peči, vlažen mineralni ostanke pa predstavlja potencialno surovino za uporabo v gradbeništvu. Na tak način se zmanjša tudi letna količina odpadnih produktov. Harsco Minerali ima namen predelati tudi vso belo žindro, ki je bila v zadnjih letih odložena na deponiji ob Savi, in za katero se ocenjuje, da jo je približno 300.000 ton (slika 14) [24, 25, 26].



Slika 14: Odlagališče bele žindre na brežini Save ob podjetju Acroni [24].

## 6 CESTNO TELO

Cesta je gradbeni objekt, namenjena uporabi različnim vrstam prometa ter služi povezovanju krajev med seboj. Sestavljen je iz več plasti različnih materialov (slika 15). Izbrani materiali morajo prenesti mehanske obremenitve prometa ter biti obstojni na druge npr. vremenske vplive v času celotne življenjske dobe. Cesta mora zagotavljati varno, udobno in gospodarno vožnjo, ki se doseže z ustrezno torni sposobnostjo, ravnostjo in nosilnostjo. Togost posameznih plasti mora v cestnem telesu postopoma naraščati od spodaj navzgor, vodoprepustnost pa lahko narašča od zgoraj navzdol. To se doseže s tem, da velikost nazivne zrnivosti zmesi in vsebnost votlin od zgoraj navzdol narašča, delež veziva pa upada. Prečni prerez ceste je sestavljen iz voziščne konstrukcije, ki je temeljena na posteljici ali izboljšanih temeljnih tleh [27].



Slika 15: Značilna ureditev sodobnega vozišča [27].

Posteljica je spodnji del utrditve, ki povečuje nosilnost in zmanjšuje učinek zmrzovanja cestnega telesa. To se doseže z različnimi geotehničnimi posegi (izboljšava, utrditev, stabilizacija) ter ustreznim odvodnjavanjem [27].

Voziščna konstrukcija predstavlja zgornji del utrditve cestnega telesa. Sestavlja jo ena ali več nosilnih plasti ter obrabno/zaporna plast. Njena naloga je prevzeti prometne obremenitve ter jih prenesti na posteljico [27].

Nosilna plast je plast med obrabno/zaporno plastjo ter posteljico in omogoča raznos prometnih obremenitev. Sestavljata jo nevezana in vezana nosilna plast. Je različne sestave, lahko je stabilizirana z vezivom [27].

Obrabna plast je vrhnja plast voziščne konstrukcije, ki prevzema prometne obremenitve in jih prenaša na nižje vgrajene plasti. Obrabno plast skupaj z zgornjim delom vezane nosilne

plasti imenujemo krovna plast, ki prevzema in prenaša obremenitve ter preprečuje vdor vode v voziščno konstrukcijo [27].

## 6.1 Nevezana nosilna plast

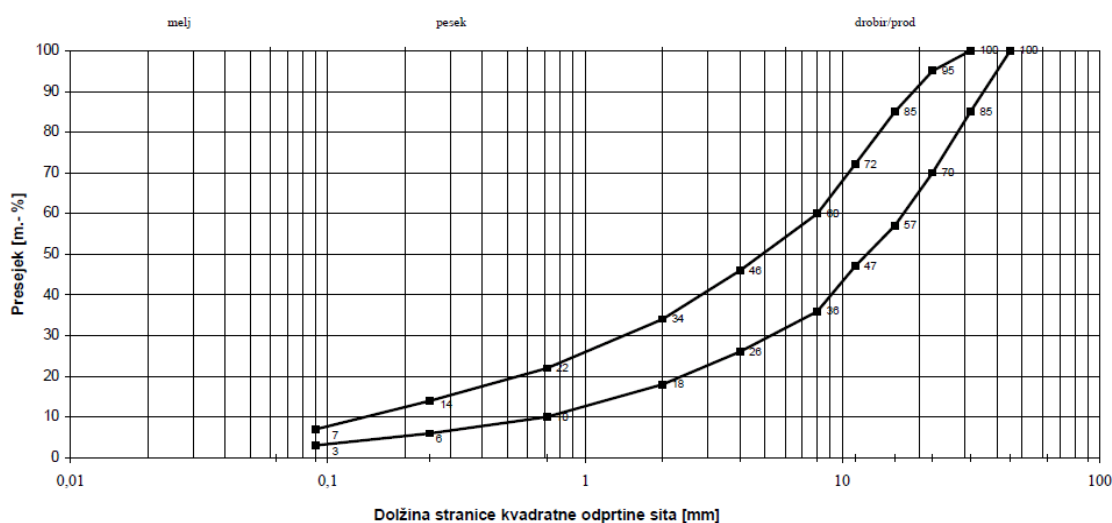
Nevezana nosilna plast je najnižje ležeča nosilna plast v voziščni konstrukciji, podvržena tlačnim obremenitvam, ki se jo mehansko stabilizira. Podlaga nevezani nosilni plasti je kamnita posteljica, ki zagotavlja ustrezno nosilnost [28].

Nevezana nosilna plast mora biti odporna proti preoblikovanju, zagotavljati potrebno in trajno nosilnost ter ščititi materiale v posteljici pred učinkom zmrzovanja [27].

### 6.1.1. Agregat

Nevezana nosilna plast je lahko sestavljena iz zmesi naravnih, drobljenih ali mešanih kamnitih zrn. Lastnosti zmesi zrn, kot so delež drobljenih zrn, delež finih delcev, oblika grobih zrn so podane v SIST EN 13242 [28].

Trajno nosilnost nevezane plasti zagotavlja ustrezna zmes kamnitih zrn, ki so odporna na vodo in mraz. Izogibati se je potrebno prekomernemu deležu drobnih zrn, saj taka zmes zaradi navzemanja vode na mrazu ni prostorsko stabilna. Potrebno nosilnost pa je potrebno zagotoviti zaradi zahtevane ustrezne vgraditve oz. zgostitve materialov v zgornjih plasteh voziščne konstrukcije. Sestava zmesi kamnitih zrn, ki se vgradi v nevezano nosilno plast, se določi glede na predvideno prometno obremenitev. Krivulja zrnivosti zmesi mora biti znotraj mejnih krivulj za določeno frakcijo zmesi zrn (grafikon 3) [27].



Grafikon 3: Območje sestave zmesi kamnitih zrn 0/31 mm za nevezane nosilne plasti [28].

Mehanske in kemijske lastnosti zmesi kamnitih zrn morajo ustrezati standardu SIST EN 13242. Odpornost zmesi zrn proti drobljenju (metoda Los Angeles) je določena glede na prometno obremenitev, nosilnost zmesi zrn (CBR) pa glede na vrsto zrn in količino zdrobljenih zrn [27].

Prav tako morata delež organskih primesi v zmesi kamnitih zrn in odpornost kamnitih zrn proti zmrzovanju in tajanju ustrezati standardu SIST EN 13242 [28].

### 6.1.2 Vgrajevanje

Nevezana nosilna plast se razprostira z grederjem. Pri vgradnji nevezane nosilne plasti je potrebno paziti na optimalno vlažnost zmesi (+/- 2 m.%), saj le tako dosežemo maksimalen učinek zgoščevanja. V primeru prenizke vlažnosti se mora zmes kamnitih zrn dodatno navlažiti. Plast mora biti zgoščena povprečno na najmanj 98 % na podlagi modificiranega Proctorjevega postopka. Spodnja meja zgoščenosti lahko odstopa od povprečja za največ 3 %. Pri zgoščevanju je potrebno paziti, da ne pride do segregacije zmesi kamnitih zrn [27, 28].

Minimalna debelina plasti nevezane nosilne plasti je odvisna od velikosti zrn v zmesi (preglednica 9) [27].

Preglednica 9: Debelina zgoščene nevezane nosilne plasti v odvisnosti od maksimalnega zrna v zmesi [28].

Velikost zrn v zmesi [mm]	Debelina plasti [cm]
do 22	> 12
do 31	> 15
do 45	> 20

### 6.1.3 Zahtevane vrednosti

Po opravljenem zgoščevanju se mora izmeriti gostoto in vlago z neporušnim postopkom z izotopskim merilnikom po TSC 06.711, nosilnost z določitvijo statičnega in dinamičnega deformacijskega modula (preglednica 10) opredeljeno v TSC 06.720 ter določiti optimalno vlago in gostoto po modificiranem Proctorjevem postopku v skladu s standardom SIST EN 13286-2 [28].

Preglednica 10: Zahtevane vrednosti deformacijskih modulov na nevezanih nosilnih plasteh [28].

Vrsta zmesi kamnitih zrn	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

## 6.2 Vezana nosilna plast

Vezana nosilna plast leži nad nevezano nosilno plastjo, ki jo sestavljata spodnja vezana (stabilizirana) nosilna plast in zgornja vezana nosilna plast. Vezano nosilno plast sestavlja zmes kamnitih zrn vezanih s hidravličnim ali bitumenskim vezivom. V spodnjo vezano (stabilizirano) nosilna plast se vgrajuje manj kakovostne stabilizirane zmesi zrn, medtem ko se v zgornjo vezano nosilno plast vgrajuje kakovostnejše vezane zmesi zrn. Plast, ki mora biti odporna proti preoblikovanju in utrujanju, je podvržena tlačnim in upogibno-nateznim obremenitvam. Odporna mora biti pred preoblikovanjem in utrujanju. Ker zmesi zrn običajno ne vsebujejo ustreznega deleža frakcij, se to lahko popravi z dodajanjem veziva. Vezivo ustvari večje stične površine ter tako zmanjša specifično obremenitev posameznih zrn. Vezana zmes tako omogoča boljši raznos obremenitev ter je sposobna prevzeti tudi majhne natezne napetosti [27, 29].

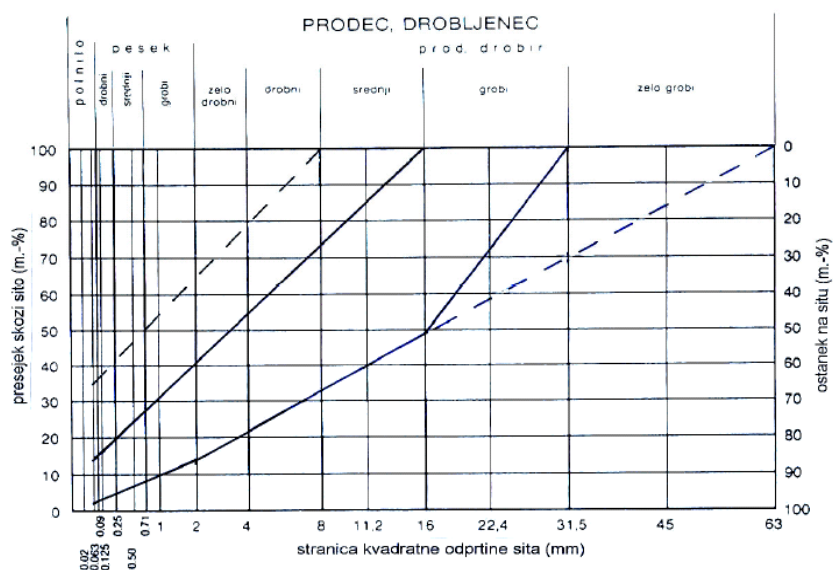
### 6.2.1 Spodnja vezana (stabilizirana) nosilna plast

Naloga te nosilne plasti je povečati raznos prometnih obremenitev. Z vezivi se poveže zrna in tako ustvari večje stične ploskve, ki zmanjšajo specifično obremenitev posameznih zrn v zmesi. Takšne nosilne plasti se v povezavi z zgornjo vezano nosilno plastjo uporablja v primeru težje prometne obremenitve. V primeru lažje prometne obremenitve pa se jo lahko uporabi kot edino vezano nosilno plast. Glede na vrsto veziva (bitumensko ali hidravlično) je določeno mejno območje za zmesi zrn (grafikon 4) [27].



### 6.2.1.1 Agregat

Za stabilizirano nosilno plast se lahko uporablja zaobljena, zdrobljena zrna, mešane zmesi zrn ali reciklirane zmesi zrn. Kamnita zrna v zmesi so omejena na velikost 32 mm. Kamnita zrna za nosilne plasti, stabilizirane s hidravličnimi vezivi, morajo imeti ustrezno tlačno trdnost, odpornost proti drobljenju (metoda Los Angeles) in odpornost zrn proti učinkom zmrzovanja (preglednica 11) [29].



Grafikon 4: Območje sestave zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti, stabilizirane s hidravličnimi vezivi [29].

Preglednica 11: Zahtevane lastnosti zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti, stabilizirane s hidravličnimi vezivi [29].

Lastnosti kamnitega materiala	Enote	Zahtevana vrednost
Tlačna trdnost kamnine zrn, najmanj	MN/m <sup>2</sup>	100
Odpornost zrn proti drobljenju, določena po ustreznem postopku Los Angeles:		
- na cestah z zelo težko in težko prometno obremenitvijo, največ	%	30
- na cestah s srednjo ali lažjo prometno obremenitvijo, največ	%	40
Odpornost zrn proti učinkom zmrzovanja, določena s 5 cikli kristalizacijskega preskusa z natrijevim sulfatom, izguba največ	%	10
Vsebnost slabo oblikovanih zrn, določena po postopku $l:d \geq 3:1$ , največ	%	35
Delež zrn velikosti do 0,063 mm, največ (na deponiji)	%	15

### 6.2.1.2 Hidravlično vezivo

Hidravlična veziva, ki se uporabljajo za stabilizirane nosilne plasti, so čisti portland cement, portland cement z dodatkom pucolana in/ali žindre, žlindrin cement ali cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela. Cement mora imeti ustrezno finost mletja, specifično površino po Blaineu ter čas vezanja (preglednica 12). Delež hidravličnega veziva se določi glede na sestavo zmesi kamnitih zrn. Minimalna priporočena količina hidravličnega veziva v stabilizirani nosilni plasti je  $50 \text{ kg/m}^3$ . Dopustna je tudi manjša količina hidravličnega veziva, če je predhodno dokazano enakomerno vmešanje veziva v zmes kamnitih zrn in zagotovljena zahtevana minimalna enoosna tlačna trdnost oziroma odpornost proti zmrzovanju [29].

Preglednica 12: Zahtevane lastnosti cementa za stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti [29].

Lastnosti cementa	Enota	Zahtevana vrednost
finost mletja (ostanek na situ 0,09 mm), največ	%	10
specifična površina po Blaineu, najmanj	$\text{m}^2/\text{kg}$	240
čas vezanja:		
- začetek, ne prej	h	1
- konec, ne pozneje	h	10
potrebna voda za standardno konsistenco, največ	%	31

Za stabiliziranje zmesi večjih zrn se uporablja manjša količina veziva, pri stabiliziranju manjših zrn pa se uporablja večja količina veziva. Širjenje razpok v višje plasti voziščne konstrukcije preprečimo z dilatacijami, ki se jih zalije z ustrezno zmesjo [27].

### 6.2.1.3 Voda

Za hidravlično vezanje je potrebno dodati ustrezno količino vode, ki zagotavlja standardno konsistenco. Za pripravo s cementom stabilizirane zmesi za nosilne plasti je praviloma uporabna vsaka naravna pitna voda [29].

### 6.2.1.4 Vgrajevanje

Stabilizirana nosilna plast mora biti ustrezno vgrajena s strojem (razdelilnikom), tako da preprečimo segregacijo zrn. Zagotovljena mora biti zahtevana ravnost in debelina plasti ter enakomerna predzgoščenost mešanice. Če se vgrajuje s hidravličnim vezivom stabilizirana

zmes v dveh plasteh, se stabilizacijska mešanica za spodnjo plast lahko vgradi tudi z grederjem ali buldozerjem [29].

Minimalna debelina s hidravličnim vezivom stabilizirane zmesi znaša 15 cm. Plast je potrebno zgostiti povprečno na najmanj 97 % na podlagi modificiranega Proctorjevega postopka [27].

#### **6.2.1.5 Zahtevane vrednosti**

Enoosna tlačna trdnost mora v povprečju znašati po 7. dneh  $3,5 \text{ MN/m}^2$ , vendar ne sme biti manjša od  $2,5 \text{ MN/m}^2$  ali večja od  $4,5 \text{ MN/m}^2$ . Količnik odpornosti stabilizacijske mešanice proti zmrzovanju mora znašati najmanj 0,7 [29].

#### **6.2.2. Zgornja vezana nosilna plast**

Ta plast je vgrajena pod obrabno oziroma krovno plastjo ter se uporablja za vse skupine prometnih obremenitev. Običajno se za te plasti uporablja bolj kvaliteten material, zato ima večjo nosilnost. Kot material se večinoma uporablja asfaltna zmes [27].

#### **6.3 Obrabna in zaporna plast**

Namen te plasti je zagotavljati odpornost proti obrabi, ki jo povzroča promet ter zaščititi cestno telo pred vodo in temperaturami. Od te plasti se zahteva ustrezna torna sposobnost, drenažna zmogljivost, odpornost proti obrabi in majhen odpor pri kotaljenju. Glede na količino prometne obremenitve se loči nevezane in vezane obrabne plasti. Nevezana obrabna plast se uporablja v primeru zelo lahke prometne obremenitve ali kot začasna utrditev vozne površine. Vezana obrabna in zaporna plast je predvidena za večje obremenitve. Njena naloga je prevzeti sile, ki nastanejo med vozilom in voziščno konstrukcijo. Zagotavlja ustrezno torno sposobnost in ravnost vozne površine ter ščiti cestno telo pred vodo. Glede na vrsto uporabljenega materiala se loči na asfaltno, betonsko in tlakovano vezano obrabno/zaporno plast [27].

##### **6.3.1 Betonska krovna plast**

Betonska krovna plast je mešanica mineralnega agregata, hidravličnega veziva in vode. Mešanici se lahko dodajo tudi kemijski in/ali mineralni dodatki. Podlaga za betonsko krovno plast mora zagotavljati ustrezno nosilnost in stabilnost glede na predvideno prometno obremenitev ter odpornost proti eroziji [30]. Osnovne zahteve za betonske krovne plasti so opredeljene v SIST EN 13877.

Betonska krovna plast je zelo toga, zaradi česar prevzema upogibne momente. Ker dobro prerazporedi obremenitve, je lahko nosilnost podlage manjša. Pod vplivom prometa in temperatur se ne preoblikuje. Njena izvedba je zahtevna. Uporablja se na cestah z veliko prometno in temperaturno obremenitvijo ter tam, kjer so veliki vzdolžni nagibi vozišča. Da beton lahko prevzame te vrste obremenitev, mora imeti veliko tlačno in upogibno trdnost. Odporen mora biti proti obrabi, učinkom zmrzovanja in soli. Imeti mora dobro torno sposobnost ter zagotavljati ravnost vozne površine. Svež beton mora biti homogen ter imeti ustrezno obdelovalnost zaradi zahtevne vgradnje [27].

### 6.3.1.1 Agregat

Za krovne plasti se običajno uporablja zmes kamnitih zrn do velikosti 32 mm v skladu s SIST EN 12620 [27].

Agregat mora biti odporen proti učinkom zmrzovanja in tajanja, drobljenju, obrabi in zaglajevanju. Odpornost proti zmrzovanju in tajanju se zagotovi z ustrezno vodovpojnostjo zrn, deležem odkruškov ter odsotnostjo slabih zrn. Agregat mora biti odporen tudi proti drobljenju (metoda Los Angeles) [30].

### 6.3.1.2 Hidravlično vezivo

Sestavo betona, njegovo proizvodnjo, zahteve za lastnosti svežega in strjenega betona določa standard SIST EN 206-1 [30].

Za izdelavo betona se uporablja portland cement CEM I ali CEM II z dodatkom mlete granulirane plavžne žindre v skladu s SIST EN 197-1 [27].

V betonu mora minimalna vsebnost cementa (preglednica 13) znašati  $340 \text{ kg/m}^3$ . Uporabljen cement mora imeti ustrezno kakovost, kemijsko sestavo, finost mletja in čas vezanja [30].

Preglednica 13: Skupna količina cementa in kamnitih zrn velikosti do 0,25 mm v betonski mešanici [30].

Največje zrno v mešanici $D_{\max}$ [mm]	Mejna vrednost količine cementa in zrn do 0,25 mm	
	najmanj [ $\text{kg/m}^3$ ]	največ [ $\text{kg/m}^3$ ]
16	450	520
32	400	460

### 6.3.1.3 Kemijski in mineralni dodatki

Kemijski dodatki betonu za krovne plasti voziščnih konstrukcij morajo biti skladni z zahtevami v SIST EN 934-2, mineralni dodatki pa skladni z zahtevami v SIST EN 13263 [30].

### 6.3.1.4 Voda

Voda mora ustrezati predpisanim zahtevam v SIST EN 1008 [30].

### 6.3.1.5 Vgrajevanje

Betonska krovna plast (slika 16), ki se vgrajuje s finišerji, je lahko grajena iz ene ali dveh plasti. Zaradi specifik vgradnje je minimalna debelina betonske krovne plasti 10 cm oz. 5 cm, če je zgrajena iz dveh plasti. Za preprečitev nastanka razpok je potrebno izvesti rege, ki omogočajo raztezanje in krčenje te plasti [30].



Slika 16: Vgrajevanje betonskega vozišča na pasu za počasna vozila [31].

### 6.3.1.6 Zahtevane vrednosti

Konsistenca svežega betona za krovne plasti se določi s posedom stožca v skladu s postopkom določenim v SIST EN 12350-2. Zahtevana vrednost poseda stožca je običajno 1 cm. Razmerje v/c sme znašati največ 0,45. Vsebnost zračnih por za zmes kamnite frakcije 0/16 mm mora biti v območju 5-7 % za frakcijo 0/32mm pa v območju 3-5 % [27].

Tlačna in natezna trdnost se predpiše z razredom tlačne trdnosti betona in njegove upogibne trdnosti, glede na prometno obremenitev (preglednica 14, 15). Navedene lastnosti strnjene betona se preverja v skladu s standardi iz skupine SIST EN 12390 [30].

Preglednica 14: Razredi tlačne trdnosti betona za krovne plasti [30].

Prometna obremenitev	Razred tlačne trdnosti
lahka in srednja	C 25/30
težka	C 30/37
zelo in izredno težka	C 35/45

Preglednica 15: Razredi natezne trdnosti betona za krovne plasti [30].

Prometna obremenitev	Razred upogibne natezne trdnosti [MN/m <sup>2</sup> ]
lahka in srednja	4,0
težka	5,0
zelo in izredno težka	5,5

Odpornost betona za obrabne plasti v voziščnih konstrukcijah na prodor vode, ki ustreza stopnji izpostavljenosti XF4 v skladu s SIST EN 206-1, mora biti v povprečju največ 5 mm, posamezni rezultat pa ne sme preseči vrednosti 10 mm. Odpornost na zmrzovanje in tajanje v prisotnosti soli mora ustrezati zahtevam za stopnjo izpostavljenosti XF4, opredeljenim v SIST EN 206-1 in SIST 1026. Največja dovoljena vrednost luščenja po 50 ciklih zmrzovanja/tajanja znaša v povprečju 0,4 mg/mm<sup>2</sup>, posamezna vrednost pa ne sme biti večja od 0,5 mg/mm<sup>2</sup> [27].

## 6.4 Valjani beton

Valjani beton je zemeljsko vlažen beton, ki se ga vgradi z valjarji. Valjani beton spada med masivne betone. Pri cestogradnji se uvršča med hidravlično vezane nosilne plasti in betonske krovne plasti [27, 30].

Valjani betoni imajo trdoplastično ali zemeljsko vlažno konsistenco, so skoraj suhi in zelo pusti. Uporabljajo se pri težnostnih pregradah, parkiriščih ob avtocestah, manj pomembnih cestah itd. [32].

### 6.4.1 Agregat

Valjani beton sestavlja stabilen skelet kamnitih zrn, ki po zgostitvi lahko takoj prevzame obremenitev [27].

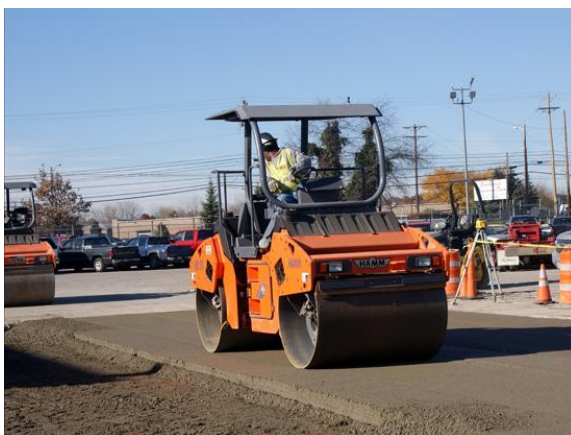
### 6.4.2 Hidravlično vezivo

Delež cementa je enak kot pri betonski krovni plasti (270 - 330 kg/m<sup>3</sup>). Zaradi lažje vgradnje se običajno uporablja portland cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela, ki poskrbi za

kasnejše vezanje. Zaradi majhnega deleža vode v zmesi (5 do 6 m.%) ima tak beton trdoplastično ali zemeljsko vlažno konsistenco ter tako omogoča zgoščevanje z valjarji [27].

### 6.4.3 Vgrajevanje

Valjani beton se vgrajuje z valjarji (slika 17) in finišeji. Beton se vgradi v debelini 20 do 25 cm. Neravnine na površini se odpravi s plastjo bitumenskega betona ali asfaltno krovno plastjo. Da preprečimo nastanek razpok, je potrebno izvesti dilatacije, ki se jih zalije z bitumensko zmesjo [27].



Slika 17: Vgrajevanje valjanega betona z valjarji [33].

### 6.4.4 Zahtevane vrednosti

Tlačna trdnost mora v povprečju doseči  $30 \text{ N/mm}^2$ , medtem ko mora cepilna natezna trdnost v povprečju doseči  $3 \text{ N/mm}^2$  [27].

## 7 EKSPERIMENTALNO DELO

### 7.1 Uvod

Vse preiskave v okviru diplomske naloge smo opravili v Laboratoriju za betone, kamen in reciklirane materiale na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, z izjemo kemične analize izlužkov, ki so jo opravili na Zavodu za zdravstveno varstvo Novo mesto. V prvem delu smo preiskali kemične, fizikalne in mineraloške lastnosti deponijske bele žindre predelane v podjetju Harsco Minerali. V drugem delu smo pripravili štiri različne betone - vezane kompozite iz agregata in predelane deponijske bele žindre z različno količino in vrsto hidravličnega veziva. Opravili smo standardne laboratorijske preiskave na svežih in strnjenih kompozitih ter teste izluževanja.

### 7.2 Namen preiskav

Namen preiskav, opravljenih v okviru diplome, je bilo ovrednotenje reaktivnosti in hidravličnosti predelane deponijske bele žindre iz podjetja Harsco Minerali ter ocena možnosti uporabe te vrste žindre v gradbeništvo.

### 7.3 Preiskave predelane deponijske bele žindre

Preiskali smo predelano deponijsko belo žindro iz podjetja Acroni, ki je bila zadnja leta odložena na deponijo ob Savi. Po oceni je sestavljena iz približno 70 % EAF S žindre ter 30 % SMS žindre (iz VOD procesa). Podjetje Harsco Minerali jo je predelalo z namenom pridobiti iz nje kovine, mi pa smo preiskali njen mineralni ostanek po predelavi. Podjetje Harsco Minerali je dostavil na Zavod za gradbeništvo Slovenije približno 600 kg predelane žindre. Iz te količine smo vzeli reprezentativen vzorec v skladu s SIST EN 932-1:1999 [34] in ga nato zmanjšali v skladu s SIST EN 932-2:1999 [35].

#### 7.3.1 Vsebnost vlage

Opis metode

Vsebnost vlage predelane deponijske bele žindre smo določili v skladu z določili standarda SIST EN 1097-5:2008 [36]. Zrnavost vzorca je bila 0/32 mm. Vzorec predelane deponijske bele žindre smo zmanjšali v skladu s SIST EN 932-2:1999 [35] in ga stehali. Nato smo vzorec posušili v sušilniku pri 110 °C do stalne mase. Vsebnost vlage v beli žindri smo določili kot razliko mase vlažnega in suhega vzorca, izraženo v odstotkih glede na maso suhega vzorca (enačba 1).



$$w = 100 \times (m_1 - m_2) / m_2 \quad (\text{enačba 1})$$

Pri čemer je:

$w$  – vsebnost vlage [%]

$m_1$  – masa vlažnega vzorca [g]

$m_2$  – masa suhega vzorca [g]

### 7.3.2. Prostorninska masa zrn

Opis metode

Prostorninsko maso zrn predelane deponijske bele žindre smo določili v skladu s SIST EN 1097-7:2008 s piknometrično metodo [37]. Vzorec smo zmanjšali v skladu s SIST EN 932-2:1999 [35], ga posušili v sušilniku pri 110 °C do stalne mase in ohladili v eksikatorju. Preiskali smo zdrobljen vzorec s frakcijo pod 0,125 mm. Piknometar znane mase smo napolnili z ustrežno količino vzorca ter mu dodali petrolej, tako da je bil vzorec potopljen. Nato smo piknometar dali v eksikator, ki smo ga za 30 min priklopili na vakuumsko črpalko. Nato smo piknometar vzeli iz eksikatorja, dodali petrolej do oznake na piknometru in ga postavili v vodno kopel s temperaturo 25 °C. Po 60 min smo vzeli piknometar iz kopeli, ga ohladili in stehali. Prostorninsko maso smo določili po enačbi 2.

$$\rho_f = (m_1 - m_0) / (V - (m_2 - m_1) / \rho_i) \quad (\text{enačba 2})$$

Pri čemer je:

$m_0$  - masa piknometra [g]

$m_1$  - masa piknometra z vzorcem [g]

$m_2$  - masa piknometra z vzorcem in tekočino [g]

$V$  - prostornina piknometra [ml]

$\rho_i$  - prostorninska masa petroleja [Mg/m<sup>3</sup>]

$\rho_f$  - prostorninska masa zrn [Mg/m<sup>3</sup>]

### 7.3.3. Zrnastostna sestava

Zrnastostno sestavo smo preiskali po dveh metodah. Pri metodi suhega sejanja smo preiskali grobo frakcijo 0,063/32 mm, pri laserski granulometriji pa fino frakcijo 0/0,063 mm, ki je ostala na dnu posode pri opravljanju metode suhega sejanja.

### 7.3.3.1 Metoda suhega sejanja

#### Opis metode

Zrnavost predelane deponijske bele žlindre smo določili s sejanjem skozi sita v skladu s standardom SIST EN 933-1:2012 [38]. Preskusni vzorec smo dobili iz laboratorijskega vzorca, ki smo ga zmanjšali v skladu s standardom SIST EN 932-2:1999 [35]. Zrnavost smo določili na frakciji 0,063/32 mm. Vzorec smo posušili v sušilniku pri 110 °C do stalne mase, ga ohladili in stehtali. Nato smo material presejali preko sita 0,063 mm. Ostanek vzorca smo posušili pri 110 °C do stalne mase in ga stehtali. Nato smo ta vzorec presejali skozi sistem sit z odprtini določenih velikosti, najprej strojno in nato ročno. Sejanje na posameznem situ smo končali, ko se masa vzorca med dvema zaporednima sejanjema ni zmanjšala za več kot 1 %. Odstotek finih delcev pod 0,063 mm smo izračunali po enačbi 3.

$$f = P/m_1 \times 100 \quad \text{(enačba 3)}$$

Pri čemer je:

$f$  - odstotek finih delcev pod 0,063 mm [%]

$m_1$  – masa suhega vzorca [g]

$P$  – masa preostalega materiala v posodi [g]

### 7.3.3.2 Laserska granulometrija

#### Opis metode

Lasersko granulometrijo smo izvedli po N.K. 10-003 - Navodilo za merjenje velikosti delcev od 0.1 do 400 µm z laserskimi žarki [39]. Preiskavo smo opravili na laserskem granulometru Cilas 920 v izopropanolu (slika 18). Analizirali smo frakcijo 0/0,063 mm. Najprej smo vzorec žlindre ročno presejali skozi sito 200 µm. Nato pa smo odvzeli ustrezno količino presejanega vzorca in ga dali v merilno kad aparature, mu dodali izopropanol ter pričeli z meritvijo.

Laser v aparaturi emitira svetlobni žarek, ki presvetljuje vzorec, pri čemer pride do difrakcije žarka in nastanka uklonskega spektra. Uklonski spekter je odvisen od oblike in velikosti delcev [39].



Slika 18: Laserski granulometer Cilas 920 [40].

### 7.3.4 BET površina in porazdelitev por

#### Opis metode

Preiskavo smo opravili v skladu s standardom ISO 15901-2:2006 [41]. Preiskali smo zdrobljen vzorec frakcije 0/2 mm. Meritve smo izvedli z napravo ASAP 2020 proizvajalca Micromeritics z volumetrično metodo (slika 19). Vzorec smo predhodno ročno zdrobili in presejali na situ 2 mm ter čez noč sušili v sušilniku pri temperaturi 105 °C ter dodatno 10 ur v razplinjevalnem delu naprave. Pri tem smo vzorec poleg ogrevanja tudi vakuumirali. Po pripravi vzorca smo analizo opravili s postopnim vtiskanjem/iztiskanjem dušika.

Osnova meritev pri metodi plinske sorpcije je, da fizična adsorpcija plinov na površini in v razpokah trdnih snovi narašča s padanjem temperature in z naraščajočim tlakom. Vzorec pri meritvi plinske sorpcije je pri konstantni nizki temperaturi izpostavljen postopoma naraščajočemu relativnem tlaku in točno znanim količinam plina. Merjenje količine adsorbiranega/desorbiranega plina poteka z merjenjem volumske spremembe [42].



Slika 19: Micromeritics ASAP 2020 [43].

### 7.3.5 Mineraloška analiza

#### Opis metode

Preiskavo smo izvedli na aparaturi Philips Norelco v skladu s N.K. 10-002 – Navodilo za mineraloško petrografske analize [44]. Uporabili smo metodo praškovne rentgenske difrakcije. Vir rentgenskega sevanja je bila bakrova anoda z nikljevim filtrom. Snemanje je potekalo s hitrostjo 1 ° na minuto.

Metoda temelji na principu uklona rentgenskih žarkov v kristalu. Kristali imajo urejeno strukturo iz atomov ali molekul, ki tvorijo virtualne ravnine in so med seboj oddaljene v pravilnem zaporedju. V vsakem kristalu je več sistemov vzporednih ravnin, ki so zanj karakteristične. Ta metoda omogoča kvalitativno in kvantitativno mineralno analizo ter kristalografske študije [44].

### 7.3.6 Vsebnost kloridov, celotnega žvepla in sulfatov

#### 7.3.6.1 Vsebnost kloridov

##### Opis metode

Vsebnost kloridov smo določili v skladu s standardom SIST EN 1744-1:2010 s potenciometrijo [45]. Laboratorijski vzorec smo zmanjšali v skladu s SIST EN 932-2:1999 ter ga posušili v sušilniku pri 110 °C do konstantne mase [35]. Iz vzorca smo nato pripravili ekstrakt z deionizirano vodo. Tako pripravljeno raztopino smo stresali ter jo prefiltrirali preko filter papirja. Nato smo s pomočjo potenciometra titrirali z raztopino srebrovega nitrata s pomočjo potenciometra. Vsebnost kloridov smo določili po enačbi 4.

$$W_{Cl} = c_{AgNO_3} \times V_{por} \times M_{Cl} \times 100 \times V_{cel} \times f / V_{al} \times m_{vz} \quad (\text{enačba 4})$$

Pri čemer je:

$W_{Cl}$  – vsebnost kloridov [%]

$c_{AgNO_3}$  - koncentracija standardne raztopine srebrovega nitrata za titracijo [mmol/m]

$V_{por}$  - volumen standardne raztopine srebrovega nitrata porabljenega pri titraciji vodotopnega klorida v ekstraktu analiznega vzorca [ml]

$M_{Cl}$  - molska masa kloridnega iona [35,45 mg/mmol]

$V_{cel}$  - volumen deionizirane vode za pripravo ekstrakta [ml]

$f$  - korekcijski faktor za standardno raztopino  $AgNO_3$  [/]

$V_{al}$  - volumen alikvota ekstrakta iz vzorca [ml]

$m_{vz}$  - masa vzorca [mg]

### 7.3.6.2 Vsebnost celotnega žvepla

Opis metode

Vsebnost celotnega žvepla smo določili v skladu s standardom SIST EN 1744-1:2010 in jo določili z raztapljanjem v kislini [45]. Laboratorijski vzorec smo zmanjšali v skladu s SIST EN 932-2:1999 [35] ter ga posušili v sušilniku pri 110 °C do konstantne mase. Vzorec smo obdelali z vodikovim peroksidom in solno kislino, pri čemer so se žveplove spojine pretvorile v sulfate. Sulfati so se oborili kot barijev sulfat, ki smo ga stehtali. Vsebnost žvepla smo izrazili kot odstotek glede na maso vzorca (enačba 5).

$$W_S = m_5/m_4 \times 13,74 \quad (\text{enačba 5})$$

Pri čemer je:

$W_S$  - vsebnost celotnega žvepla [%]

$m_5$  - masa oborine [g]

$m_4$  - masa preskusnega vzorca [g]

### 7.3.6.3 Vsebnost sulfatov

Opis metode

Vsebnost sulfatov smo določili v skladu s standardom SIST EN 196-2:2005 [46]. Sulfatne ione, ki smo jih razgradili s solno kislino, smo oborili pri pH med 1,0 in 1,5 z raztopino barijevega klorida. Obarjanje barijevega sulfata smo izvedli pri temperaturi vrelišča. Sulfatne ione smo določili gravimetrično in izrazili kot odstotek mase agregata (enačba 6).

$$W_{SO_3} = m_{10}/m_9 \times 34,30 \quad (\text{enačba 6})$$

Pri čemer je:

$W_{SO_3}$  - vsebnost sulfatov [%]

$m_{10}$  - masa barijevega sulfata [g]

$m_9$  - masa preskusnega vzorca [g]

### 7.3.7. Test izluževanja

#### 7.3.7.1 Priprava izlužka

##### Opis metode

Izlužek predelane deponijske bele žindre smo pripravili v skladu s standardom SIST EN 1744-3:2002 [47]. Preiskali smo frakcijo 0/32 mm. Vzorec žindre smo odvzeli v skladu s standardom SIST EN 932-1:1999 [34]. Vsebnost vode v vzorcih smo določili na vzporednem vzorcu s sušenjem pri 110 °C v skladu s standardom SIST EN 1097-5:2008 [36]. Velikost laboratorijskega vzorca smo zmanjšali v skladu s postopki, določenimi v SIST EN 932-2:1999 [35]. Posodo za izluževanje smo napolnili z vzorcem in destilirano vodo v razmerju 1:10. V posodo smo nato namestili električno mešalo in začeli z izluževanjem (slika 20). Izluževanje je potekalo 24 ur pri sobni temperaturi. Nato smo izlužek prefiltrirali preko membranskega filtra in mu določili pH ter električno prevodnost.



Slika 20: Priprava izlužka.

#### 7.3.7.2 Kemična analiza izlužka

##### Opis metode

Kemično analizo izlužkov iz predelane deponijske bele žindre so izvedli v skladu s standardi SIST EN ISO 17294-2:2005, SIST ISO 16590: 2001, ISO 10359-1: 1992 in SIST EN ISO 10304-1: 2009 na Zavodu za zdravstveno varstvo Novo mesto z uporabo induktivno sklopljene plazme z masno selektivnim detektorjem (ICP-MS).

## 7.4 Preiskave betonskih kompozitov

Pripravili in preiskali smo štiri različne betonske kompozite. V vseh betonskih kompozitih smo del agregata nadomestili s predelano deponijsko belo žindro. Agregat smo tako pripravili iz mešanice drobljenega apnenca in približno 13 % predelane deponijske bele žindre. Količino in vrsto hidravličnega veziva smo spreminjali glede na namen uporabe kompozita. Kompozite smo označili z oznakami od I do IV. Dva kompozita se uporabljata za stabilizacijo tampona v cestogradnji (kompozit I in II) in po en kompozit, ki se uporablja za valjane betone (kompozit III) ali nezahtevne masivne betone (kompozit IV).

### 7.4.1 Kompozit I – nevezana nosilna plast

Kompozit se uporablja za nevezano nosilno plast pri voziščnih konstrukcijah. Kompozit smo naredili iz mešanice tamponskega agregata in predelane deponijske bele žindre brez hidravličnega veziva (slika 21). Kompozite smo označili z oznako B\_272/13.



Slika 21: Kompozit I.

### 7.4.2 Kompozit II – vezana nosilna plast

Stabiliziran tampon se uporablja za vezano nosilno plast voziščne konstrukcije v primerih, ko je agregat slabe oblike, ko je zrnovostna krivulja neenakomerna ali ko se zahtevajo visoke trdnosti plasti. V mešanico agregata in predelane deponijske bele žindre smo dodali hidravlično vezivo (cement I), ki se običajno uporablja za stabilizacijo (slika 22). Kompozite smo označili z oznako B\_274/13.



Slika 22: Kompozit II.

#### 7.4.3 Kompozit III – valjani beton

Mešanici agregata in deponirane bele žindre smo dodali cement z oznako »cement I«. Valjane betone se vgrajuje z valjarji po plasteh za zgornje nosilne plasti voziščne konstrukcije (slika 23). Kompozite smo označili z oznako B\_277/13.



Slika 23: Kompozit III.

#### 7.4.4 Kompozit IV – masivni beton

Pripravili in preiskali smo nezahteven masiven konstrukcijski beton, ki se uporablja za betonsko vozišče (slika 24). Mešanici agregata in predelani deponijski beli žindri smo dodali cement »cement II«. Kompozite smo označili z oznako B\_278/13.





Slika 24: kompozit IV.

## 7.4.5 Uporabljeni materiali

### 7.4.5.1 Agregat

Za pripravo vseh betonskih kompozitov smo uporabili agregat iz drobljenega apnenca frakcije 0/32 mm.

### 7.4.5.2 Cement

Za pripravo kompozitov smo uporabili dve vrsti cementa, »cement I« in »cement II«. Za pripravo kompozitov II in III smo uporabili cement I, za pripravo kompozita IV pa cement II. Kompozit I smo pripravili brez cementa.

Mešani cement »cement I« je trdnostnega razreda 32,5. Poleg klinkerja ga sestavljata še dva mineralna dodatka, granulirana plavžna žindra in naravni pucolan. Cement II je čisti portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 [48].

### 7.4.5.3 Voda

Za potrebe preiskav smo uporabili vodo iz vodovoda.

### 7.4.5.4 Žindra

Uporabili smo predelano deponijsko belo žindro, ki jo je podjetje Acroni v preteklosti odlagalo v okolico svoje jeklarne (slika 25). Vsebovala je približno 70 % EAF S žindre ter 30 % SMS žindre (iz VOD procesa). Podjetje Harsco jo je predelalo z namenom pridobiti iz nje ostanke kovinskih zlitin. Ostanek po predelavi je zdrobljena žindra, ki smo jo uporabili v

okviru te diplomske naloge. V kompozitih je imela tako uporabljena predelana deponijska bela žindra vlogo agregata in veziva.



Slika 25: Predelana deponijska bela žindra.

#### 7.4.6 Recepture za posamezne betonske kompozite

Recepture za pripravo betonskih kompozitov so podane v preglednici 16.

Agregat je vseboval 2,6 mas.% celotne vlage, kar smo upoštevali pri dodajanju vode v mešanico.

Preglednica 16: Recepture za posamezne vezane kompozite.

	Kompozit I	Kompozit II	Kompozit III	Kompozit IV
<b>Agregat 0/32mm [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2123	2086	1855	1673
<b>Predelana deponijska bela žindra [kg/m<sup>3</sup>]</b>	318	312	279	296
<b>Cement I [kg/m<sup>3</sup>]</b>	0	48	169	0
<b>Cement II [kg/m<sup>3</sup>]</b>	0	0	0	332
<b>Voda [kg/m<sup>3</sup>]</b>	115	115	172	183
<b>Računska gostota [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2557	2562	2475	2484

### 7.4.7 Priprava kompozitov

Vse kompozite smo pripravili v laboratorijskem mešalcu za beton (slika 26). Odmerjeno količino agregata, cementa in žindre smo suho zmešali, nato pa ji dodali ustrezno količino vode. Mešanje je potekalo do homogenega videza mešanice.



Slika 26: Priprava kompozita II v laboratorijskem mešalcu.

### 7.4.8 Kompoziti I, II, III

#### 7.4.8.1 Vsebnost vode

Opis metode

Pripravljenim kompozitom I, II in III smo določili vsebnost vode na podlagi standarda SIST EN 1026:2008 [49]. Vzorce kompozitov smo odvzeli skladno s SIST EN 12350-1:2009 [50]. Vzorec posameznih svežih kompozitov smo stehali, nato pa jih posušili na plinskem gorilniku do stalne mase. Vlažnost kompozitov smo določili kot razliko mase vlažnega in posušenega vzorca izraženo v odstotkih glede na maso vlažnega vzorca (enačba 7).

$$w = (m_1 - m_2) / m_1 \quad (\text{enačba 7})$$

Pri čemer je:

$m_1$  – masa vlažnega vzorca [kg]

$m_2$  – masa posušenega vzorca [kg]

$w$  – vlažnost vzorca [%]

### 7.4.8.2 Zgoščevanje po Proctorju

#### Opis metode

Kompozite I, II in III smo zgostili v skladu s standardom SIST EN 13286-2:2010/AC:2013 [51]. Za vsak kompozit smo pripravili 7 vzorcev, ki smo jih zgostili po modificiranem Proctorjevem postopku (ki nam da podatek o maksimalni gostoti in optimalni vlažnosti) in se običajno uporablja za kamniti material. Vzorce smo zgostili v valjastih kalupih premera 15 cm in višine 15 cm (slika 27). Vsak vzorec smo zbili v 5 enakomerno debelih plasteh, vsako plast smo zgostili z 71 udarci. Po zbijanju smo vzorec stekali in na podlagi znanega volumna valja določili gostoto vzorca (enačba 8).

$$\rho = m/V \quad \text{(enačba 8)}$$

Pri čemer je:

$\rho$  – gostota vzorca [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$m$  – masa vzorca [g]

$V$  – volumen vzorca [ $\text{cm}^3$ ]



Slika 27: Zgoščevanje po modificiranem Proctorjevem postopku.

### 7.4.8.3 Nega kompozitov

#### Opis metode

Vse preizkušance zbite po modificiranem Proctorjevem postopku smo ustrezno označili. Preizkušance smo negovali v klimatizirani komori pri temperaturi  $20 \pm 2$  °C in relativni vlažnosti 95 % v skladu s SIST EN 12390-2:2013 [52]. Po 7 dneh smo vse preizkušance razkalupili.

#### 7.4.8.4 Tlačna trdnost

Opis metode

Na kompozitih I, II in III smo po 7. in 28. dneh preiskali tlačno trdnost v skladu s SIST EN 13286-41:2004 [53]. Pred preizkusom smo preizkušance dali za 4 ure v vodo.

Zaradi neravne površine preizkušancev, smo na zgornjo in spodnjo ploskev preizkušancev pred preizkusom tlačne trdnosti položili filc (slika 28). Tlačno trdnost smo določili po enačbi 9.

$$f_c = F/A$$

(enačba 9)

Pri čemer je:

$f_c$  – tlačna trdnost [MPa]

$F$  – porušna sila [N]

$A$  – površina preizkušanca [mm<sup>2</sup>]



Slika 28: Preizkušanje tlačne trdnosti.

#### 7.4.9 Kompozit IV

##### 7.4.9.1 Preizkušanje svežega betona

Opis metode

Vzorci svežega betona za potrebe preizkusov smo odvzeli v skladu z določili standarda SIST EN 12350-1:2009 [50]. Za posamezen preizkus smo vzeli vsaj 1,5-kratno večjo količino mešanice, kot smo ocenili, da je potrebna za preizkus. Svežemu betonu smo izmerili tudi temperaturo s termometrom.

#### 7.4.9.1.1 Preizkus s posedom

##### Opis metode

Posed kompozita IV smo preiskali v skladu s standardom SIST EN 12350-2:2009 za določitev konsistence svežega betona [54]. Vzorec kompozita smo odvzeli v skladu s standardom SIST EN 12350-1:2009 [50]. Pred izvedbo preizkusa smo vzorec premešali v posodi za mešanje z zidarsko žlico. Svež beton smo vgradili v kalup oblike prisekanega stožca postavljenega na vodoravno površino. Kalup smo napolnili v treh plasteh, tako da je vsaka plast po zgoščevanju zavzela približno tretjino višine kalupa. Vsako plast smo zgostili s 25 udarci kovinske palice. Po zgoščevanju smo vrhni sloj betona poravnali z vrhom posode s pomočjo kovinske palice. Nato smo kalup navpično dvignili in postavili ob betonski stožec. Tedaj smo izmerili posed betona, tako da smo s kovinsko palico položeno na zgornji rob kalupa izmerili razliko med višino kalupa in višino betonskega stožca (slika 29).



Slika 29: Posed betonskega stožca.

#### 7.4.9.1.2 Gostota

##### Opis metode

V skladu s standardom SIST EN 12350-6:2009 [55] za določanje gostote zgoščenega svežega betona smo določili gostota kompozita IV. Vzorec kompozita smo odvzeli v skladu s standardom SIST EN 12350-1:2009 [50], pred preizkusom pa ga premešali z lopatico v posodi za mešanje. Sveži beton smo zgostili z vibriranjem na vibracijski mizi, v togi za vodo nepropustni posodi znane prostornine in teže. Pri tem smo pazili, da ni prišlo do prekomerne segregacije ali izločanja cementnega mleka. Po zgoščevanju smo vrhni sloj betona poravnali z vrhom posode s pomočjo kovinske palice. Posodo s kompozitom smo nato stekali. Gostoto smo določili na podlagi enačbe 10.



$$D = (m_2 - m_1) / V \quad \text{(enačba 10)}$$

Pri čemer je:

$D$  – gostota svežega betona [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m_1$  – masa posode [kg]

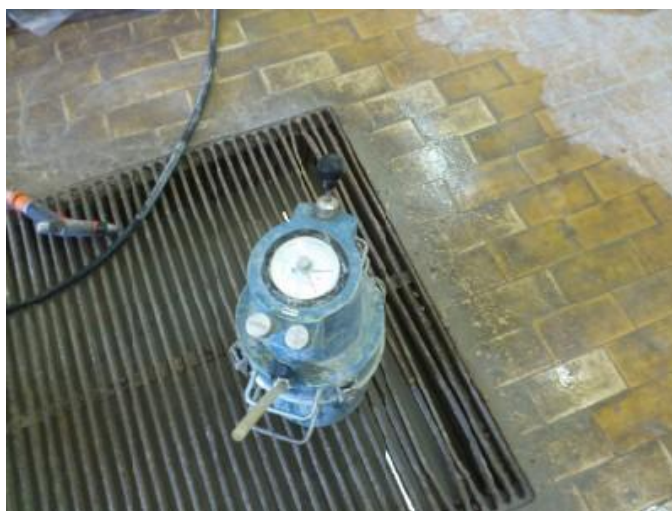
$m_2$  – masa posode skupaj z betonom v posodi [kg]

$V$  – prostornina posode [ $\text{m}^3$ ]

#### 7.4.9.1.3 Vsebnost zraka – metoda s pritiskom

Opis metode

Na podlagi standarda SIST EN 12350-7:2009 za določevanje vsebnosti zraka v zgoščenem svežem betonu [56] smo določili vsebnost zraka v kompozitu IV. Določili smo jo z manometrično metodo s porozimetrom. Vzorec kompozita smo odvzeli v skladu s standardom SIST EN 12350-1:2009 [50]. Pred izvedbo preizkusa smo vzorec premešali. Beton smo vgradili v posodo porozimetra v treh plasteh. Vsako od plasti smo zgostili z vibriranjem na vibracijski mizi. Pri tem smo pazili, da ni prišlo do prekomerne segregacije ali izločanja cementnega mleka. Po zgoščevanju smo vrhnji sloj betona poravnali z vrhom posode. Nato smo na posodo namestili pokrov (slika 30). Napravo smo nato napolnili z vodo preko odprtine ventila, dokler voda ni pritekla skozi drugi ventil. Ko je prenehal izhajati zrak, smo ventila zaprli. Z zračno črpalko smo v napravo vnesli zrak, da smo vzpostavili začetni pritisk. Po izravnavanju tlaka s pomočjo izpustnega ventila, smo odprli glavni zračni ventil in odčitali porozimetrijski indeks, ki predstavlja delež zraka v % v betonu.



Slika 30: Določanje vsebnosti zraka.

#### 7.4.9.2 Preizkušanje strnjenega betona

##### Opis metode

Za potrebe preiskav strnjenega betona smo pripravili 9 kock in 3 prizme oblike in dimenzij v skladu s standardom SIST EN 12390-1:2013 [57]. Vzorci smo vzorčili v skladu s SIST EN 12350-1:2009 [50]. Pred polnjenjem v kalup smo vzorce premešali z lopatico v posodi.

Polnjenje kalupov v skladu s SIST EN 12390-2:2013 [52] smo opravili v dveh plasteh. Vsako plast smo zgostili na vibracijski mizi, pri tem smo pazili, da ne bi prišlo do segregacije ali izločanja cementnega mleka. Odvečni beton nad zgornjim robom kalupa smo odstranili nato pa površino zgladili. Vse preizkušance smo ustrezno označili. Preizkušance smo pustili v kalupu 24 ur pri temperaturi  $20\pm 5$  °C. Nato smo preizkušance razkalupili in jih negovali v klimatizirani komori pri temperaturi  $20\pm 2$  °C in relativni vlažnosti 95 %.

##### 7.4.9.2.1 Gostota

##### Opis metode

Gostoto kompozita IV smo določili v skladu z določili standarda SIST EN 12390-7:2009 [58] za določanje gostote strnjenega betona po 7. in 28. dneh. Maso preizkušanca smo določili na podlagi mase preizkušanca v dostavljenem stanju. Prostornino preizkušanca smo izračunali na podlagi deklariranih dimenzij kalupov kock. Gostota smo izračunali iz mase preizkušanca in njegove prostornine (enačba 11).

$$D = m/V \quad \text{(enačba 11)}$$

Pri čemer je:

$D$  – gostota preskušanca [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m$  – masa preskušanca [kg]

$V$  – prostornina preskušanca [ $\text{m}^3$ ]

##### 7.4.9.2.2 Tlačna trdnost

##### Opis metode

Tlačno trdnost smo določili v skladu s standardom SIST EN 12390-3:2009 [59] za določanje tlačne trdnosti strnjenega betona na stiskalnici skladni s standardom SIST EN 12390-4:2009 [60]. Preizkušanci so morali izpolniti zahteve v skladu s standardi SIST EN 12350-1:2009, SIST EN 12390-1:2013 in SIST EN 12390-2:2009 [50, 57, 52]. S pomočjo stiskalnice smo ugotovili največjo (porušno) silo, ki jo je preizkušanec prenesel (slika 31). Na podlagi znanih dimenzij preizkušancev in porušne sile smo na podlagi enačbe (enačba 12) določili tlačno trdnost preizkušancev po 7. in 28. dneh.



$$f_c = F/A_c$$

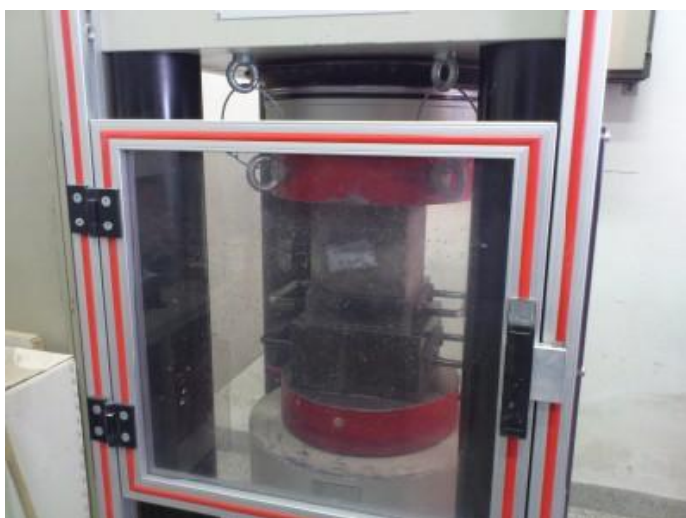
(enačba 12)

Pri čemer je:

$f_c$  – tlačna trdnost [MPa]

$F$  – porušna sila [N]

$A_c$  – površina preizkušanca, na katerega deluje tlačna sila [mm<sup>2</sup>]



Slika 31: Določanje tlačne trdnosti.

#### 7.4.9.2.3 Globina prodora vode pod pritiskom

Opis metode

Kompozitu IV smo določili globino prodora vode pod pritiskom v skladu s standardom SIST EN 12390-8:2009 [61]. Preizkušanece določenih dimenzij smo takoj po odstranitvi iz kalupa nahrapavili s krtačo na mestu, kjer bo izpostavljen vodnemu curku. Preizkus smo delali na preizkušancu staremu 28 dni. Preizkušanece smo postavili v ustrezno napravo in ga za 72 ur izpostavili delovanju vodnega pritiska. Po pretečenem času smo preizkušanece odstranili iz naprave in ga razcepili pravokotno na površino, na katero je deloval vodni pritisk (slika 32). Na razcepljeni površini smo označili globino prodora vode.



Slika 32: Globina prodora vode.

#### **7.4.10 Test izluževanja**

##### **7.4.10.1 Priprava izlužkov**

Opis metode

Izlužke iz kompozitov z oznakami I, II, III in IV z vključeno predelano deponijsko belo žindro, negovanih v standardnih pogojih, smo pripravili po 7. in 28. dneh po enakem postopku, kot je opisano v točki 7.3.7.1.

##### **7.4.10.2 Kemična analiza izlužkov**

Opis metode

Kemično analizo izlužkov kompozitov I, II, III in IV z vključeno predelano deponijsko belo žindro, negovanih pri standardnih pogojih, smo opravili po enakem postopku kot v točki 7.3.7.2. Določili smo samo vsebnosti celotnega kroma (Cr) in molibdena (Mo), saj sta bili njuni koncentraciji preseženi v izlužku predelane deponijske bele žindre.

## 8 REZULTATI IN ANALIZA

### 8.1 Preiskave predelane deponijske bele žindre

#### 8.1.1 Vsebnost vlage

Vsebnost vlage je podana v preglednici 17.

Preglednica 17: Vsebnost vlage vzorca predelane deponijske bele žindre.

<b>Masa vlažnega vzorca</b>	$m_1$ [g]	784,0
<b>Masa suhega vzorca</b>	$m_2$ [g]	703,5
<b>Vsebnost vlage</b>	$w$ [%]	11,4

#### 8.1.2 Prostorninska masa zrn

Rezultati določanja prostorninske mase zrn so podani v preglednici 18.

Preglednica 18: Prostorninska masa vzorca predelane deponijske bele žindre.

<b>Oznaka preskušanca</b>		1	2	3
<b>Oznaka piknometra</b>		11/3	9/6	5/25
<b>Masa piknometra z zamaškom</b>	$m_0$ [g]	29,785	28,685	30,561
<b>Masa vzorca in piknometra</b>	$m_1$ [g]	39,807	38,691	40,561
<b>Masa vzor., pik. in petroleja</b>	$m_2$ [g]	75,273	74,087	75,537
<b>Masa pikn. in petroleja</b>	$m_3$ [g]	78,108	76,902	78,253
<b>Volumen piknometra</b>	$V$ [ml]	48,465	48,358	47,832
<b>Prostorninska masa petroleja</b>	$\rho_l$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,77870	0,77870	0,77870
<b>Prostorninska masa zrn</b>	$\rho_f$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	3,43	3,45	3,43
<b>Povp. prostor. masa zrn</b>	$\rho_f$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	3,44		

#### 8.1.3 Zrnastostna sestava

##### 8.1.3.1 Metoda suhega sejanja

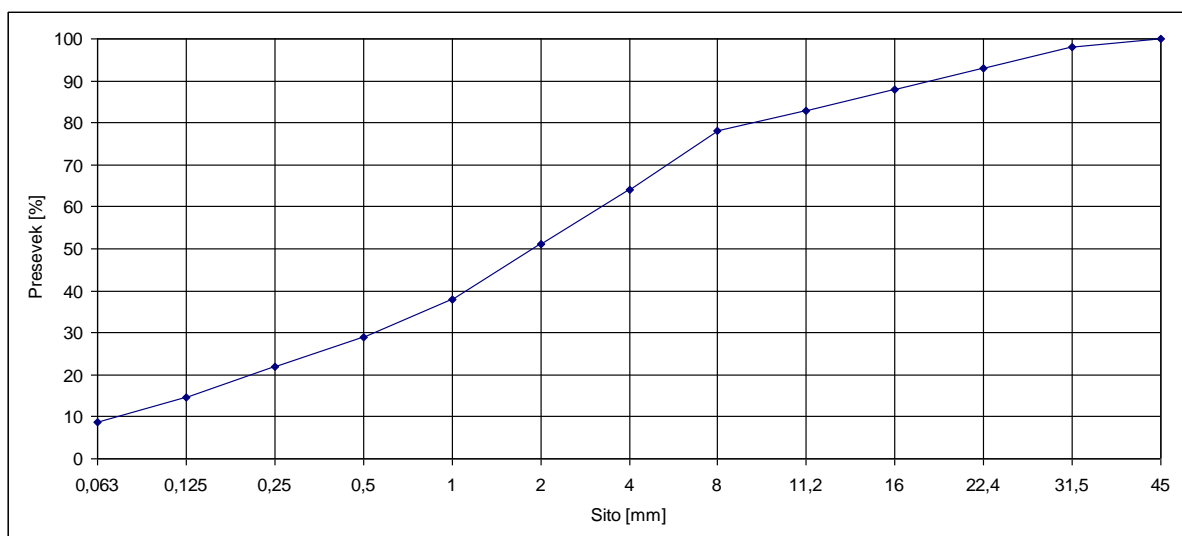
Odstotek finih delcev pod 0,063 mm je podan v preglednici 19, celokupna porazdelitev zrn pa v preglednici 20. Krivulja zrnastosti je podana na grafikonu 5.

Preglednica 19: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm vzorca predelane deponijske bele žindre.

<b>Masa vzorca</b>	$m_1$ [g]	2610
<b>Masa vzorca preostalega na dnu posode</b>	$P$ [g]	229
<b>Odstotek finih delcev pod 0,063mm</b>	$f$ [%]	8,8

Preglednica 20: Porazdelitev velikosti zrn vzorca predelane deponijske bele žindre.

Sito [mm]	Ostank na situ [g]	Ostank na situ [%]	Presevek [%]
45	0	0,0	100
31,5	41	1,6	98
22,4	152	5,8	93
16	128	4,9	88
11,2	110	4,2	83
8	140	5,4	78
4	369	14,1	64
2	346	13,3	51
1	324	12,4	38
0,5	251	9,6	29
0,25	176	6,7	22
0,125	192	7,4	14,6
0,063	152	5,8	8,8
ostanek na dnu posode	229	8,8	0



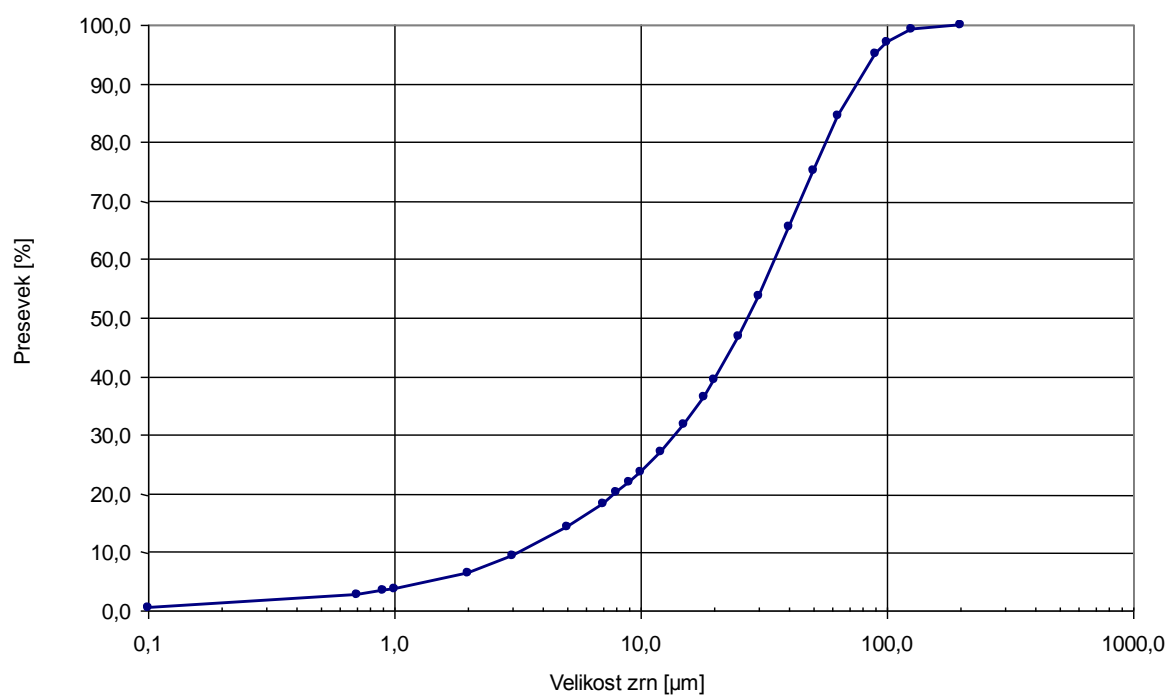
Grafikon 5: Zrnovostna krivulja vzorca predelane deponijske bele žindre.

### 8.1.3.2 Laserska granulometrija

Rezultati določanja zrnivosti z metodo laserske granulometrije so podani v preglednici 21. Zrnavostna krivulja je prikazana na grafikonu 6.

Preglednica 21: Zrnavostna sestava delcev v razponu od 0,1 do 200  $\mu\text{m}$  vzorca predelane deponijske bele žindre.

Velikost zrn [ $\mu\text{m}$ ]	Presevek [%]	Velikost zrn [ $\mu\text{m}$ ]	Presevek [%]
0,1	0,4	15	31,79
0,7	2,82	18	36,41
0,9	3,4	20	39,42
1	3,66	25	46,74
2	6,41	30	53,64
3	9,4	40	65,64
5	14,25	50	75,23
7	18,29	63	84,6
8	20,17	90	95,11
9	21,97	100	97,01
10	23,71	125	99,32
12	27,04	200	100



Grafikon 6: Krivulja zrnivosti delcev velikosti 0,1 do 200  $\mu\text{m}$  vzorca predelane deponijske bele žindre.

#### 8.1.4 BET površina in porazdelitev por

Rezultati BET površine, površine mikropor in povprečen premer por, določen iz desorpcijskega dela krivulje, so podani v preglednici 22.

Preglednica 22: Rezultati plinske sorpcije predelane deponijske bele žindre.

<b>Masa vzorca</b>	[g]	8,8317
<b>BET površina</b>	[m <sup>2</sup> /g]	9,1426
<b>Površina mikropor</b>	[m <sup>2</sup> /g]	1,2692
<b>Povprečen premer pore</b>	[nm]	18,1323

Vrednotenje rezultatov

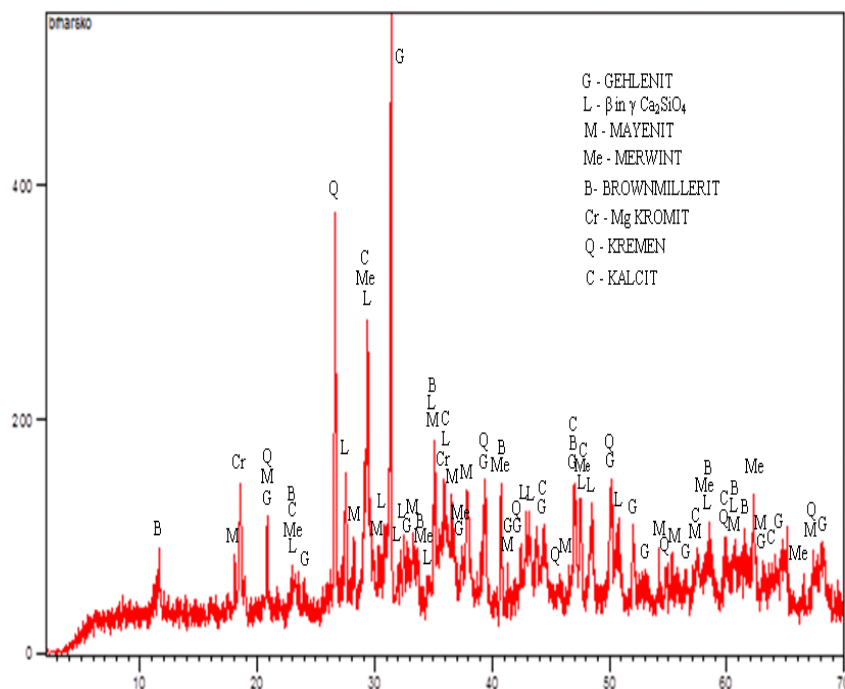
Pri cementih znaša BET površina med 15-30 m<sup>2</sup>/g [62]. Finost cementa je v splošnem večja, vendar lahko dodamo oz. delno nadomestimo portland cement z belo žindro brez ustvarjanja težav zaradi razlik v velikosti. Večja kot je specifična površina, bolj je material reaktiven in bolj vpliva na proces hidratacije. Finejša zrna popolneje hidratizirajo, razvijejo več toplote med hidratacijo in bolj se krčijo. BET površina in površina mikropor pri predelani deponijski beli žindri je tako pokazala na določeno reaktivnost žindre.

#### 8.1.5 Mineraloška analiza

Rezultati mineraloške analize so podani v preglednici 23. Minerali so navedeni v količinskem zaporedju. Na grafikonu 7 je prikazan difraktogram vzorca predelane deponijske bele žindre.

Preglednica 23: Mineralna sestava predelane deponijske bele žindre.

<b>Mineral</b>	<b>Kemična formula</b>
gehlenit	Ca <sub>2</sub> Al(AlSiO <sub>7</sub> )
β in γ dikalcijev silikat	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
mayenit	Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub>
merwinit	Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
brownmillerit	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
magnezijev kromit	MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
kremen	SiO <sub>2</sub>
kalcit	CaCO <sub>3</sub>



Grafikon 7: Difraktogram vzorca predelane deponijske bele žindre

### 8.1.6 Vsebnost kloridov, žvepla in sulfatov

#### 8.1.6.1 Vsebnost kloridov

Vsebnost kloridov je podana v preglednici 24.

Preglednica 24: Vsebnost kloridov v vzorcu predelane deponijske bele žindre.

Vzorec št.		1	2
Masa vzorca	$m_{vz}$ [mg]	500000	500000
Koncentracija $AgNO_3$	$c_{AgNO_3}$ [mmol/l]	0,02	0,02
Volumen $AgNO_3$	$V_{por}$ [ml]	0,167	0,2
Volumen deionizirane vode	$V_{cel}$ [ml]	500	500
Volumen alikvota	$V_{al}$ [ml]	50	50
Faktor redukcije	$f$ [l]	1,00528	1,00528
Vsebnost kloridov	$W_{Cl}$ [%]	0,0002	0,0003
Povprečna vsebnost kloridov	$W_{Cl}$ [%]	0,000	

### 8.1.6.2 Vsebnost celotnega žvepla

Rezultati določanja vsebnosti celotnega žvepla v predelani deponijski beli žindri so podani v preglednici 25.

Preglednica 25: Vsebnost žvepla v vzorcu predelane deponijske bele žindre.

Vzorec št.		1	2
Masa vzorca	$m_4$ [g]	1,0018	1,0021
Masa oborine	$m_5$ [g]	0,0071	0,0074
Vsebnost žvepla	$W_S$ [%]	0,097	0,101
Povprečna vsebnost žvepla	$W_S$ [%]	0,099	

### 8.1.6.3 Vsebnost sulfatov

Rezultati vsebnosti sulfatov so podani v preglednici 26.

Preglednica 26: Vsebnost sulfatov v vzorcu predelane deponijske bele žindre.

Vzorec št.		1	2
Masa vzorca	$m_9$ [g]	1,0013	1,0008
Masa barijevega sulfata	$m_{10}$ [g]	0,00620	0,00650
Vsebnost sulfatov	$W_{SO_3}$ [%]	0,212	0,223
Povprečna vsebnost sulfatov	$W_{SO_3}$ [%]	0,218	

## 8.1.7 Test izluževanja

### 8.1.7.1 Priprava izlužka

Rezultati pH vrednosti in električne prevodnosti izlužka predelane deponijske bele žindre so podani v preglednici 27.

Preglednica 27: Rezultati meritev pH in električne prevodnosti za predelano deponijsko belo žindro.

Masa vzorca	[g]	2262,2
pH vrednost	/	12,6
El. prevodnost	[mS/m]	170,5



### 8.1.7.2 Kemična analiza izlužka

Rezultati kemične analize izlužka iz vzorca predelane deponijske bele žindre so podani v preglednic 28.

Preglednica 28: Kemična analiza izlužka iz predelane deponijske bele žindre.

Elementi	Mejne vrednosti iz uredbe [4]		Deponirana bela žindra
	Inertni odpadki [mg/kg s.s.] L/S= 10 l/kg	Nenevarni odpadki [mg/kg s.s.] L/S= 10 l/kg	Koncentracija elementov v izlužku [mg/kg s.s.] L/S= 10 l/kg
Celotni krom (Cr)	0,5	10	1,2
Nikelj (Ni)	0,4	10	0,019
Baker (Cu)	2	50	< 0,07
Cink (Zn)	4	50	0,12
Arzen (As)	0,5	2	< 0,02
Selen (Se)	0,1	0,5	0,017
Molibden (Mo)	0,5	10	1,4
Kadmij (Cd)	0,04	3	< 0,005
Antimon (Sb)	0,06	0,7	0,0091
Barij (Ba)	20	100	1,3
Živo srebro (Hg)	0,01	0,2	< 0,001
Svinec (Pb)	0,5	10	0,17
Kloridi (Cl)	800	15000	14,8
Fluoridi (F)	10	150	17,2
Sulfati (SO <sub>4</sub> )	1000	20000	7,9

#### Vrednotenje rezultatov

Kemična analiza izlužka iz predelane deponijske bele žindre nam je pokazala, da za večino elementov žindra izpolnjuje zahteve za inertni material. Izjemi sta bili količini celotnega kroma (Cr) in molibdena (Mo). Celotni krom (Cr) in molibden (Mo) sta dosegla vrednosti, ki so višje od mejnih vrednosti za inertne odpadke, izpolnila pa sta zahteve za nenevarne odpadke.

## 8.2 Preiskave vezanih kompozitov

### 8.2.1 Kompoziti I, II in III

#### 8.2.1.1 Vsebnost vode

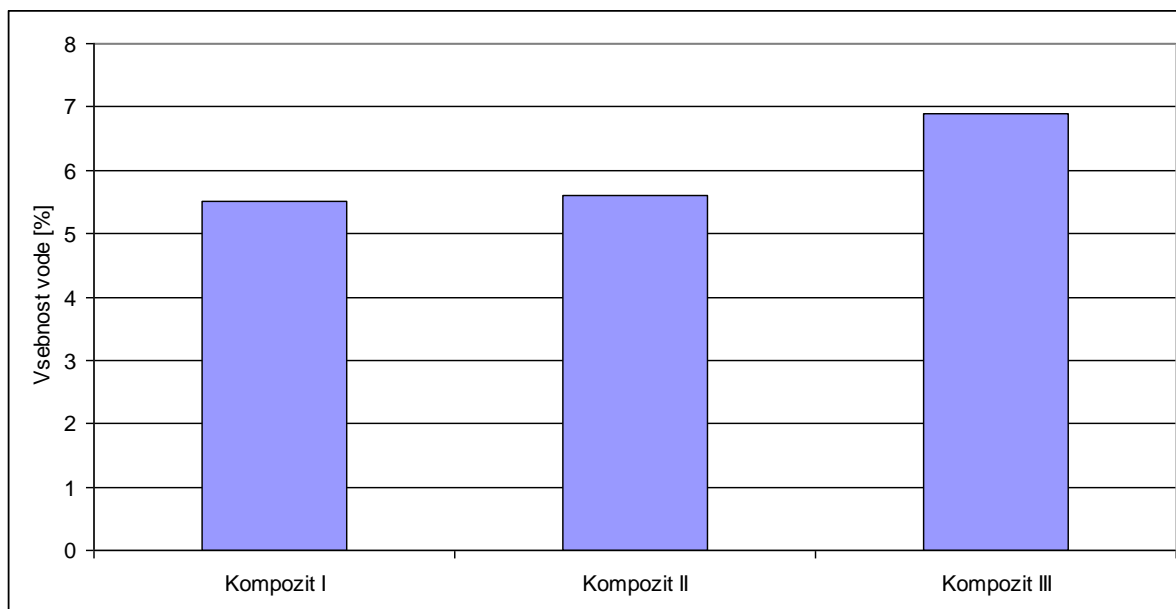
Rezultati vsebnosti vode v kompozitih z oznakami I, II in III so podani v preglednici 29.

Preglednica 29: Vsebnost vode v kompozitih o oznakami I, II in III.

Kompozit	Masa vlažnega vzorca	Masa posušenega vzorca	Vsebnost vode
	$m_1$ [kg]	$m_2$ [kg]	$w$ [%]
I	2,397	2,265	5,5
II	2,540	2,397	5,6
III	2,892	2,692	6,9

Vrednotenje rezultata

Vsebnost vode v kompozitih je variirala glede na količino dodane vode posameznemu kompozitu (grafikon 8).



Grafikon 8: Vsebnost vode v kompozitih z oznakami I, II in III.

#### 8.2.1.2 Zgoščevanje po Proctorju

Rezultati gostote kompozitov z oznakami I, II in III, ki smo jih zgostili po modificiranem Proctorjevem postopku, so podani v preglednici 30, 31 in 32.

Preglednica 30: Gostota kompozita I.

Kompozit I	Volumen	Masa	Gostota
	$V [\text{cm}^3]$	$m [\text{g}]$	$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$
B272/13_1	2653	6418,3	2,419
B272/13_2	2650	6496,1	2,451
B272/13_3	2653	6493,6	2,448
B272/13_4	2642	6515,8	2,466
B272/13_5	2640	6496	2,461
B272/13_6	2649	6485,4	2,448
B272/13_7	2645	6470,5	2,446
<b>Povprečna gostota:</b>			2,449

Preglednica 31: Gostota kompozita II.

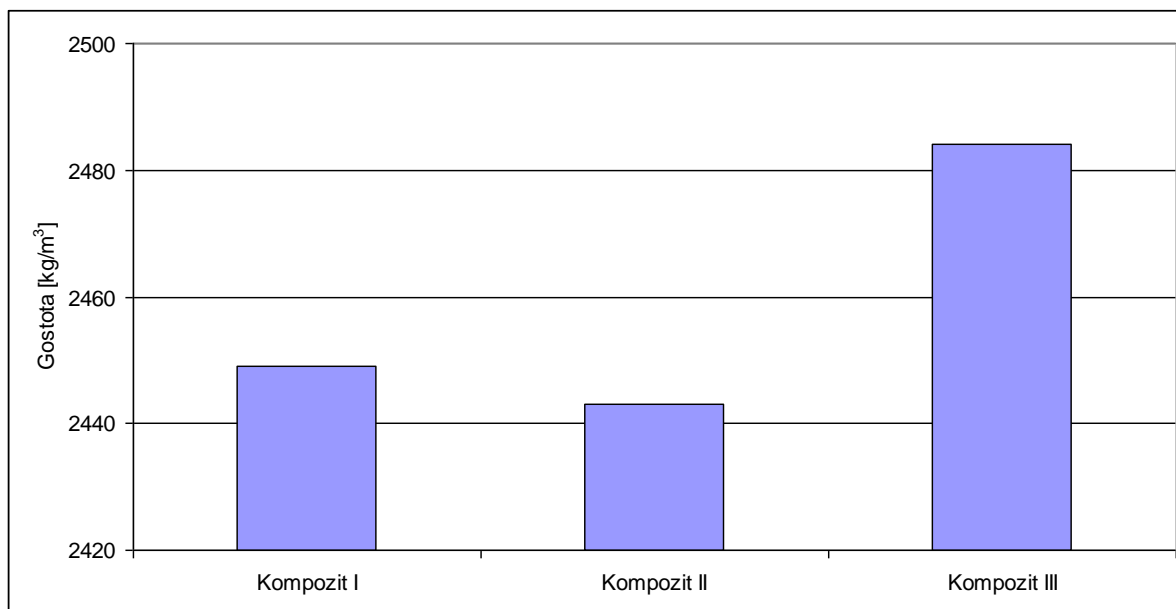
Kompozit II	Volumen	Masa	Gostota
	$V [\text{cm}^3]$	$m [\text{g}]$	$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$
B274/13_1	2646	6500	2,456
B274/13_2	2648	6456	2,438
B274/13_3	2640	6520,9	2,470
B274/13_4	2646	6450,4	2,438
B274/13_5	2654	6476,4	2,440
B274/13_6	2656	6474,2	2,437
B274/13_7	2648	6405,7	2,419
<b>Povprečna gostota:</b>			2,443

Preglednica 32: Gostota kompozita III.

Kompozit III	Volumen	Masa	Gostota
	$V [\text{cm}^3]$	$m [\text{g}]$	$\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$
B277/13_1	2656	6474,5	2,438
B277/13_2	2648	6611,9	2,497
B277/13_3	2652	6622,4	2,497
B277/13_4	2646	6593,2	2,491
B277/13_5	2653	6509,5	2,454
B277/13_6	2649	6632,5	2,504
B277/13_7	2644	6637,4	2,510
<b>Povprečna gostota:</b>			2,484

### Vrednotenje rezultatov

Primerjava gostote kompozitov z oznakami I, II in III je prikazana na grafikonu 9. Gostota posameznega kompozita je bila odvisna od njegove optimalne vlažnosti.



Grafikon 9: Primerjava gostote kompozitov z oznakami I, II in III.

#### 8.2.1.3 Tlačna trdnost

Rezultati tlačne trdnosti kompozitov z oznakami I, II in III po 7. in 28. dneh so podani v preglednici 33, 34, 35, 36 in 37.

Vzorci kompozita I po 7. dneh, ki smo jih pred preizkusom negovali 4 ure v vodi, so razpadli tako, da tlačne trdnosti nismo preiskali (slika 33). Odločili smo se, da ji pri preiskavi tlačne trdnosti po 28. dneh ne bomo negovali 4 ure v vodi.



Slika 33: Razpadli kompozit I po 4-urni negi v vodi.

Preglednica 33: Tlačna trdnost kompozita I po 28. dneh.

<b>Kompozit I</b>	<b>Površina</b>	<b>Porušna sila</b>	<b>Tlačna trdnost po 28. dneh</b>
	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
<b>B272/13_4</b>	17662,5	16000	0,9
<b>B272/13_5</b>	17662,5	15000	0,8
<b>B272/13_7</b>	17662,5	23000	1,3
<b>Povprečna tlačna trdnost</b>			1,0

Preglednica 34: Tlačna trdnost kompozita II po 7. dneh.

<b>Kompozit II</b>	<b>Površina</b>	<b>Porušna sila</b>	<b>Tlačna trdnost po 7. dneh</b>
	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
<b>B274/13_4</b>	17662,5	42430	2,4
<b>B274/13_5</b>	17662,5	48830	2,8
<b>B274/13_6</b>	17662,5	46580	2,6
<b>Povprečna tlačna trdnost</b>			2,6

Preglednica 35: Tlačna trdnost kompozita II po 28. dneh

<b>Kompozit II</b>	<b>Površina</b>	<b>Porušna sila</b>	<b>Tlačna trdnost po 28. dneh</b>
	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
<b>B274/13_1</b>	17662,5	86000	4,9
<b>B274/13_2</b>	17662,5	77000	4,4
<b>B274/13_7</b>	17662,5	86000	4,9
<b>Povprečna tlačna trdnost</b>			4,7

Preglednica 36: Tlačna trdnost kompozita III po 7. dneh.

<b>Kompozit III</b>	<b>Površina</b>	<b>Porušna sila</b>	<b>Tlačna trdnost po 7. dneh</b>
	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
<b>B277/13_1</b>	17662,5	131000	7,4
<b>B277/13_2</b>	17662,5	137000	7,8
<b>B277/13_3</b>	17662,5	128000	7,2
<b>Povprečna tlačna trdnost</b>			7,5

Preglednica 37: Tlačna trdnost kompozita III po 28. dneh.

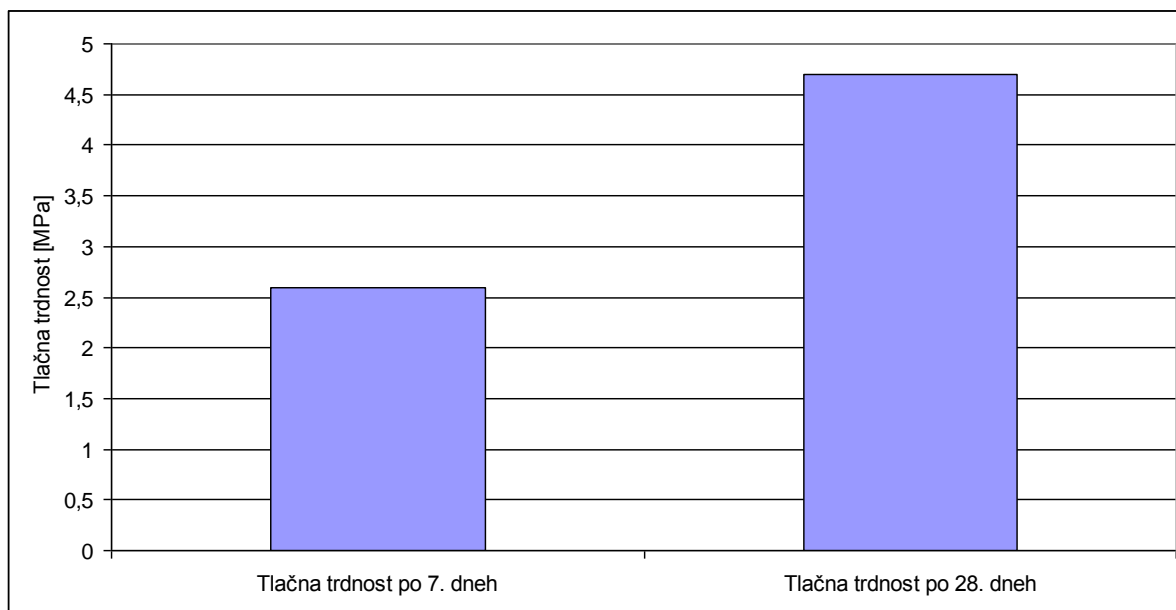
Kompozit III	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost po 28. dneh
	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
<b>B277/13_5</b>	17662,5	198000	11,2
<b>B277/13_6</b>	17662,5	236000	13,4
<b>B277/13_7</b>	17662,5	224000	12,7
<b>Povprečna tlačna trdnost</b>			12,4

## Vrednotenje rezultatov

Tlačna trdnost kompozitov z oznakama II in III je s časom naraščala (grafikon 10 in 11), kar je posledica ustrezne nege kompozitov.

Tlačna trdnost kompozita II je ustrezala zahtevam iz TSC 06-320: 2001, kjer je priporočena tlačna trdnost po 7. dneh 2,5 MPa [29].

Kompozit III je dosegel tlačno trdnost, ki jo dosegajo običajni valjani betoni (7 – 30 MPa) [32].

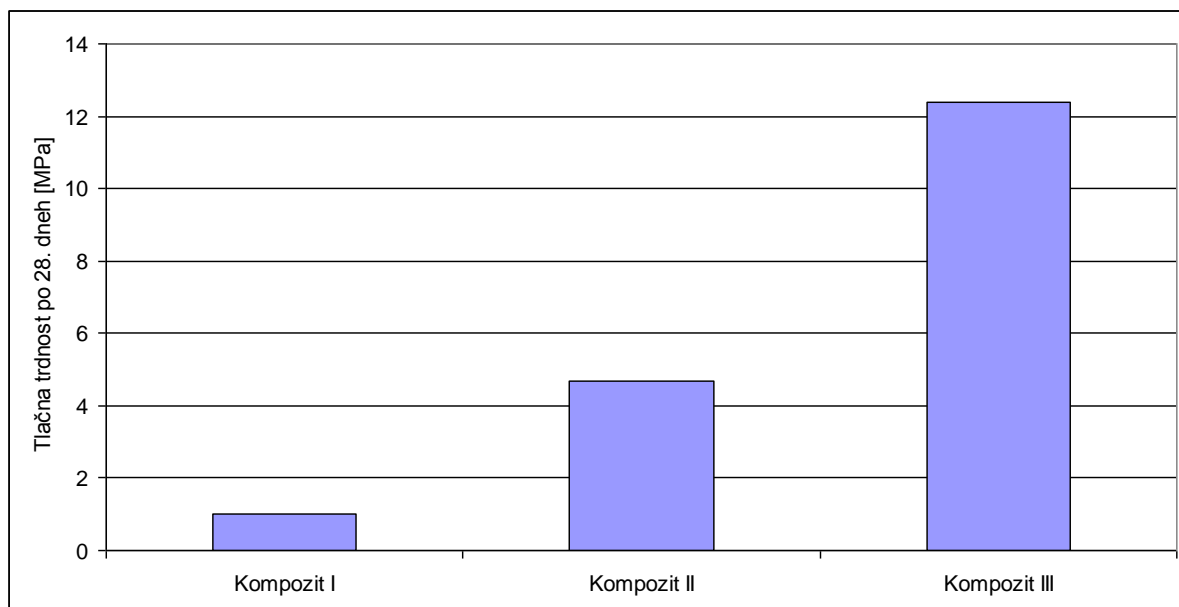


Grafikon 10: Tlačna trdnost kompozita II po 7. in 28. dneh.



Grafikon 11: Tlačna trdnost kompozita III po 7. in 28. dneh.

Z večanjem količine cementa v posameznem kompozitu je naraščala tudi tlačna trdnost (grafikon 12).



Grafikon 12: Primerjava tlačnih trdnosti kompozitov z oznakami I, II in III po 28. dneh.

## 8.2.2 Kompozit IV

### 8.2.2.1 Preizkušanje svežega betona

#### 8.2.2.1.1 Temperatura

Temperatura svežega betona je podana v preglednici 38.

Preglednica 38: Temperatura svežega betona.

<b>Temperatura</b>	$T$ [°C]	19,3
--------------------	----------	------

#### 8.2.2.1.2 Posed betonskega stožca

Rezultat poseda betonskega stožca je v preglednici 39.

Preglednica 39: Posed betonskega stožca.

<b>Posed betonskega stožca</b>	$\Delta h$ [mm]	10
--------------------------------	-----------------	----

Vrednotenje rezultata

Posed betona je spadal v razred S1 ter ustrezal predpisanim vrednostim za uporabo v betonskem vozišču na podlagi TSC 06-420: 2003 [30]. Konsistenca svežega betona je bila enaka konsistenci običajnih betonov, ki se uporabljajo za betonsko vozišče ter tako omogoča ustrezno vgradljivost, obdelavo in zgotitev.

#### 8.2.2.1.3 Gostota svežega betona

Gostota kompozita IV je navedena v preglednici 40.

Preglednica 40: Gostota svežega kompozita IV.

<b>Masa posode</b>	$m_1$ [kg]	12,8
<b>Masa posode skupaj z betonom v posodi</b>	$m_2$ [kg]	20,9
<b>Prostornina posode</b>	$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,003375
<b>Gostota svežega betona</b>	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2400

Vrednotenje rezultata

Gostota svežega betona je bila podobna gostoti, ki jo dosegajo masivni betoni [32].



#### 8.2.2.1.4 Vsebnost zraka

Vsebnost zraka v betonu je navedena v preglednici 41.

Preglednica 41: Vsebnost zraka v kompozitu IV.

<b>Vsebnost zraka</b>	$\Delta\rho$ [%]	1,7
-----------------------	------------------	-----

Vrednotenje rezultata

Izmerjen delež zraka v betonu je bil v skladu s pričakovanim deležem zraka v neaeriranih betonih.

#### 8.2.2.2 Preizkušanje strjenega betona

##### 8.2.2.2.1 Gostota

Gostota kompozita IV po 7. in 28. dneh je prikazana v preglednici 42 in 43.

Preglednica 42: Gostota kompozita IV po 7. dneh.

<b>Kompozit IV</b>	<b>Masa preskušanca</b>	<b>Prostornina preskušanca</b>	<b>Gostota po 7. dneh</b>
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>B278/13_1</b>	8,292	0,003375	2457
<b>B278/13_2</b>	8,286	0,003375	2455
<b>B278/13_3</b>	8,301	0,003375	2460
<b>Povprečna gostota</b>			2457

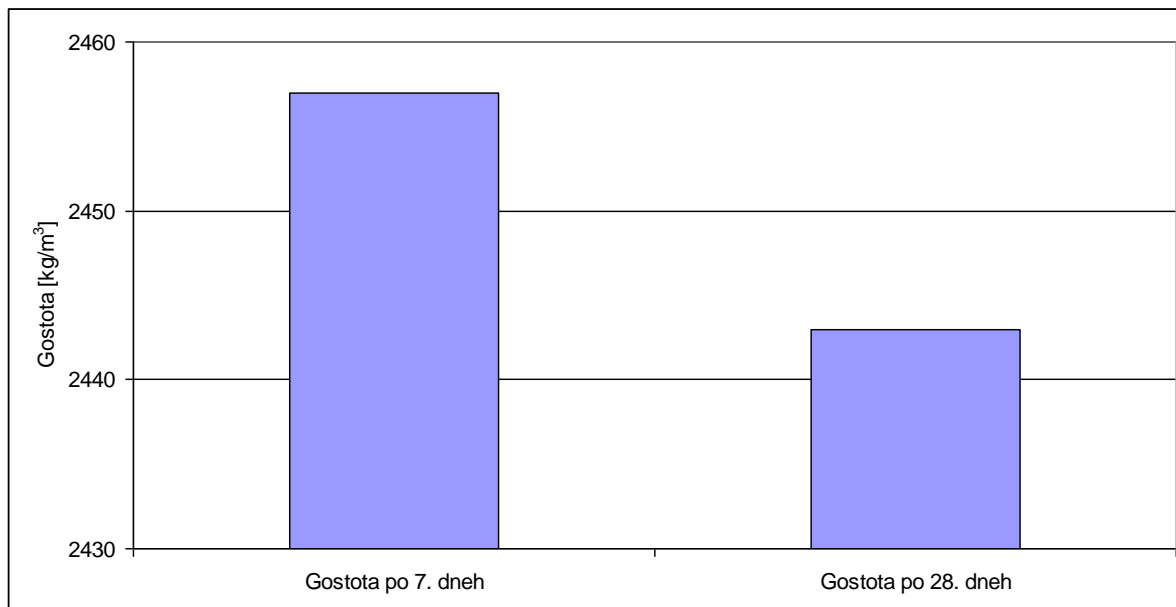
Preglednica 43: Gostota kompozita IV po 28. dneh.

<b>Kompozit IV</b>	<b>Masa preskušanca</b>	<b>Prostornina preskušanca</b>	<b>Gostota po 28. dneh</b>
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>B278/13_4</b>	8,292	0,003375	2457
<b>B278/13_5</b>	8,189	0,003375	2426
<b>B278/13_6</b>	8,253	0,003375	2445
<b>Povprečna gostota</b>			2443

Vrednotenje rezultata

Gostota strjenega betona je dosegla takšno gostoto, kot jo dosegajo masivni betoni [32]. Primerjava gostote strjenega kompozita IV po 7. in 28. dneh (grafikon 13) je pokazala, da se

je gostota strnjenege betona s časom zmanjšala, kar je bila posledica izhlapevanja vode med procesom strjevanja betona.



Grafikon 13: Gostota kompozita IV po 7. in 28. dneh.

#### 8.2.2.2 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost kompozita IV po 7. in 28. dneh je podana v preglednici 44 in 45.

Preglednica 44: Tlačna trdnost kompozita IV po 7. dneh.

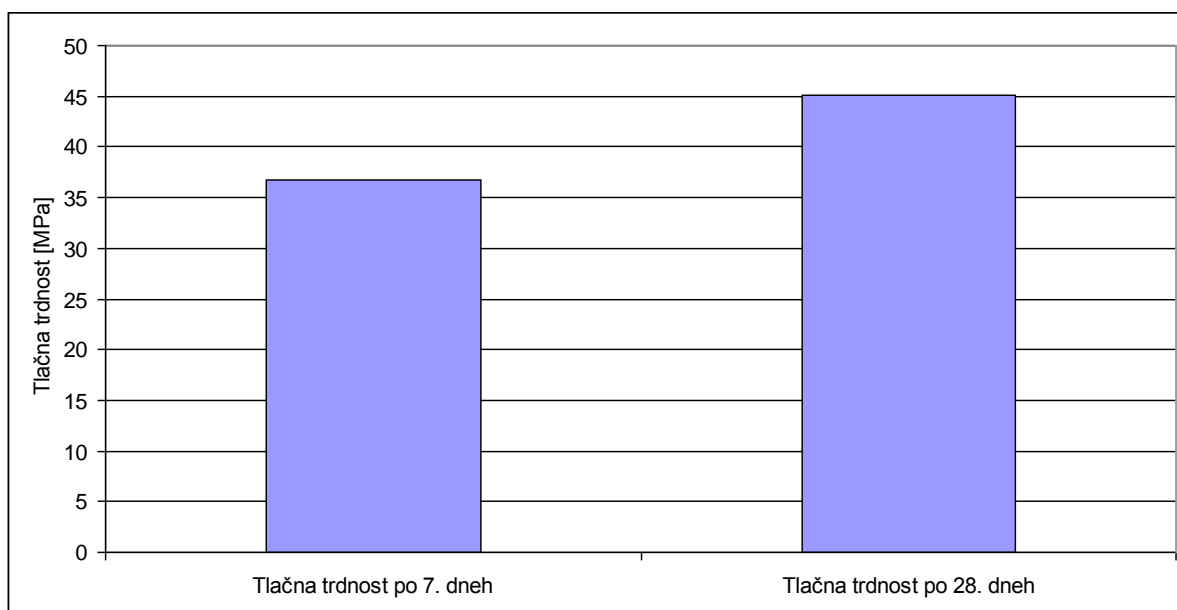
Kompozit IV	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost po 7. dneh
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
B278/13_1	22500	839000	37,3
B278/13_2	22500	857000	38,1
B278/13_3	22500	783000	34,8
<b>Povprečna tlačna trdnost</b>			36,7

Preglednica 45: Tlačna trdnost kompozita IV po 28. dneh.

Kompozit IV	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost po 28. dneh
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
B278/13_4	22500	1036000	46,0
B278/13_5	22500	977000	43,4
B278/13_6	22500	1029000	45,7
<b>Povprečna tlačna trdnost</b>			45,1

### Vrednotenje rezultata

Tlačna trdnost kompozita IV iz predelane deponijske bele žindre je s časom naraščala (grafikon 14), kar je bila posledica ustrezne nege betona med njegovim strjevanjem. Tlačna trdnost betona je po 28. dneh ustrezala zahtevam standarda SIST EN 206-1:2003/A2:2005 [63] za trdnostni razred C 30/37. Ta razred tlačne trdnosti izpolnjuje zahteve TSC 06.420:2003 za težko prometno obremenitev.



Grafikon 14: Tlačna trdnost kompozita IV po 7. in 28. dneh.

#### 8.2.2.2.3 Prodor vode

Globina prodora vode je podana v preglednici 46.

Preglednica 46: Prodor vode kompozita IV.

Kompozit IV	Maksimalni prodor vode
	$h$ [mm]
B 278/13_7	6
B 278/13_8	12
B 278/13_9	12
<b>Povprečen prodor vode</b>	10

### Vrednotenje rezultata

Zahteve TSC 06-420: 2003 o globina prodora vode betonsko vozišče ni izpolnilo, saj povprečna vrednost prodora vode ne sme biti večja od 5 mm [30].

### 8.2.3 Test izluževanja

#### 8.2.3.1 Priprava izlužka

Električna prevodnost in pH vrednost izlužka iz kompozitov z oznakami I, II, III in IV po 7. in 28. dneh je podana v preglednici 47 in 48.

Preglednica 47: pH vrednost in električna prevodnost izlužka iz kompozitov z oznakami I, II, III in IV po 7. dneh.

		Kompozit I	Kompozit II	Kompozit III	Kompozit IV
<b>Masa vzorca</b>	[g]	2110,2	1079,83	1705,91	1035,90
<b>pH vrednost</b>	/	11,24	10,30	10,64	10,19
<b>Ei. prevodnost</b>	[mS/m]	30,50	10,80	10,84	13,66

Preglednica 48: pH vrednost in električna prevodnost izlužka iz kompozitov z oznakami I, II, III in IV po 28. dneh.

		Kompozit I	Kompozit II	Kompozit III	Kompozit IV
<b>Masa vzorca</b>	[g]	2111,07	2104,80	2133,85	1824,36
<b>pH vrednost</b>	/	11,14	11,16	11,10	10,04
<b>Ei. prevodnost</b>	[mS/m]	22,4	9,21	12,87	8,77

#### 8.2.3.2. Kemična analiza izlužka

Koncentracije elementov v kompozitih z oznakami I, II, III in IV po 7. in 28. dneh so navedene v preglednici 49 in 50.

Preglednica 49: Koncentracija elementov v kompozitih z oznakami I, II, III in IV po 7. dneh.

Element	Mejne vrednost iz uredbe [4]		Koncentracija elementov v izlužku po 7. dneh [mg/kg s.s.] L/S = 10 l/kg			
	Inertni odpadki [mg/kg s.s.] L/S = 10 l/kg	Nenevarni odpadki [mg/kg s.s.] L/S = 10 l/kg	Kompozit I	Kompozit II	Kompozit III	Kompozit IV
<b>Celotni krom (Cr)</b>	0,5	10	0,45	0,12	0,012	0,048
<b>Molibden (Mo)</b>	0,5	10	<0,05	0,11	<0,05	<0,05

Preglednica 50: Koncentracija elementov v kompozitih z oznakami I, II, III in IV po 28. dneh.

Element	Mejne vrednost iz uredbe [4]		Koncentracija elementov v izlužku po 28. dneh [mg/kg s.s.] L/S = 10 l/kg			
	Inertni odpadki [mg/kg s.s.] L/S = 10 l/kg	Nenevarni odpadki [mg/kg s.s.] L/S = 10 l/kg	Kompozit I	Kompozit II	Kompozit III	Kompozit IV
<b>Celotni krom (Cr)</b>	0,5	10	0,39	0,041	0,013	0,022
<b>Molibden (Mo)</b>	0,5	10	0,30	0,055	<0,05	<0,05

Vrednotenje rezultata

Kemična analiza izlužkov iz kompozitov je pokazala, da sta koncentraciji celotnega kroma (Cr) in molibdena (Mo) v vseh kompozitih tako po 7. kot po 28. dneh pod mejno vrednostjo, ki jo predpisuje Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih za inertne odpadke. V procesu hidratacije sta se celotni krom (Cr) in molibden (Mo) uspešno povezala v hidratacijske produkte. Na podlagi teh ugotovitev je bilo možno sklepati, da je uporaba predelane deponijske bele žindre v vseh vrstah kompozitov možna, saj smo dobili inertne kompozite, ki ne predstavljajo več okoljskega problema.

## 9 ZAKLJUČEK

Prvi del preiskav predelane deponijske bele žindre je pokazal, da se zaradi svojih kemičnih, fizikalnih in mineraloških lastnosti lahko uporabi kot agregat in kot vezivo v betonskih kompozitih.

Mineraloška analiza je pokazala, da so v predelani deponijski beli žindri prisotne mineralne faze, ki izkazujejo hidravlične lastnosti. Predelana deponijska bela žindra je zaradi izpostavljenosti atmosferskim vplivom verjetno izgubila del svoje hidravličnosti in reaktivnosti.

Preiskava tlačne trdnosti betonskih kompozitov I, II in III iz predelane deponijske bele žindre je pokazala, da ustrezajo zahtevam za uporabo v posameznih plasteh cestnega telesa.

Preiskava svežega in strnjenegega betonskega kompozita IV je pokazala, da večina preiskanih lastnosti ustreza zahtevam, ki jih predpisuje TSC 06.420:2003 za beton za betonska vozišča. Za izpolnitev vseh zahtev bi bilo potrebno sestavo kompozita IV nekoliko modificirati – vključiti zrak z dodatkom aeranta in morda nekoliko povečati delež veziva.

V bodoče bi bilo potrebno pri predelani deponijski beli žindri, ki bi se uporabljala kot agregat, v betonih preveriti njeno odpornost proti drobljenju (Los Angeles) in odpornost proti učinkom zmrzovanja.

Glede na zahteve TSC 06.420:2003 za betonska vozišča pa bi bilo potrebno pri masivnem betonu, če bi ga želeli uporabiti za betonsko vozišče, dodatno preveriti njegovo odpornost proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilnih soli, odpornost na karbonatizacijo in odpornost na prodor kloridov.

Kemična analiza izlužka je pokazala povečano koncentracijo celotnega kroma (Cr) in molibdena (Mo) v predelani deponijski beli žindri, ki tako ne izpolnjuje pogoja inertnosti v skladu z zakonodajo. Vključitev predelane deponijske bele žindre v vezane kompozite je omogočila imobilizacijo obeh elementov, tako da sta bili koncentraciji obeh elementov v izlužkih iz kompozitov pod mejno vrednostjo inertnosti, ki jo predpisuje zakonodaja. Zaradi tega je iz okoljskega stališča možna uporaba predelane deponijske bele žindre v vezanih kompozitih za potrebe gradbeništva.

Uporaba predelane deponijske bele žindre v vezanih kompozitih v posamezni plasti cestnega telesa je torej možna tako z okoljskega kot tehničnega vidika. Ocenjujemo, da bi za

izpolnjevanje vseh zahtev, podanih v relevantnih standardih ali TSC-jih, sestavo mešanic, preizkušenih v okviru te diplomske naloge, bilo potrebno le nekoliko modificirati. Istočasno pa je potrebno opozoriti na dejstvo, da gre v primeru predelane deponijske bele žindre za kombinacijo EAF S in SMS žindre, ki je lahko nestabilna. Zato bi bilo potrebno za vsak možen namen uporabe te žindre natančno določiti zahteve, ki jih mora le-ta izpolniti.

**VIRI**

[1] Zakon o varstvu okolja (uradno prečiščeno besedilo) (ZVO-1-UPB1). Uradni list RS št. 39-1682/2006: 4151.

[2] Uredba o odpadkih. Uradni list RS št. 103-4514/2011: 13935.

[3] Jurjavčič, P., Mladenovič, A., Cotič, Z. 2013. Priročnik za uporabo agregata iz črne jeklarske žindre v asfaltnih obrabnih plasteh. ReBirth: str. 7-9, 15-16.

<http://www.re-birth.eu/prirocniki-za-uporabo-odpadkov/> (Pridobljeno 12. 4. 2013.)

[4] Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih. Uradni list RS št. 61-2892/2011: 8857.

[5] Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro). Uradni list RS št. 52-2448/2000: 6936.

[6] Uredba (EU) št. 305/2011 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 9. marca 2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov in razveljavitvi Direktive Sveta 89/106/EGS. Uradni list EU št. 305-L88/5/2011: 5.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:SL:PDF> (Pridobljeno 5. 7. 2013.)

[7] Predlog Zakona o gradbenih proizvodih (ZGPro-1) – predlog za obravnavo (redni postopek). 2013.

[http://www.tzslo.si/pic/pdf/nezivila/ZGPro\\_Vlad\\_grad\\_1.pdf](http://www.tzslo.si/pic/pdf/nezivila/ZGPro_Vlad_grad_1.pdf) (Pridobljeno 5. 7. 2013.)

[8] Pravilnik o bistvenih zahtevah za gradbene objekte, ki jih je treba upoštevati pri določitvi lastnosti gradbenih proizvodov. Uradni list RS št. 9-567/2001: 850.

[9] Jurjavčič, P., Cotič, Z. 2012. Črna jeklarska žindra v asfaltu. Mineral. 5, 25: 40-44.

[10] Samec, N. 2005. Ravnanje z odpadki. Študijsko gradivo za dodiplomski univerzitetni študijski program. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Katedra za energetske procesne in okoljske inženirstvo: str. 2-3, 11.

[http://iepoi.uni-mb.si/samec/Stud\\_gradivo/Ravnanje\\_z\\_odpadki.pdf](http://iepoi.uni-mb.si/samec/Stud_gradivo/Ravnanje_z_odpadki.pdf) (Pridobljeno 16. 4. 2013.)



[11] Statistični urad Republike Slovenije. Odpadki iz proizvodnih in storitvenih dejavnosti, Slovenija, 2011 - končni podatki. 2013.

[http://www.stat.si/novica\\_prikazi.aspx?id=5038](http://www.stat.si/novica_prikazi.aspx?id=5038) (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

[12] Position Paper on the Status of Ferrous Slag complying with the Waste Framework Directive (Articles 5 / 6) and the REACH Regulation. 2012. Euroslag, Eurofer: str. 1-5, 8-11.

[http://www.euroslag.com/fileadmin/\\_media/images/Status\\_of\\_slag/Position\\_Paper\\_April\\_2012.pdf](http://www.euroslag.com/fileadmin/_media/images/Status_of_slag/Position_Paper_April_2012.pdf) (Pridobljeno 3. 5. 2013.)

[13] Sporočilo komisije svetu in evropskemu parlamentu. Razlaga o odpadkih in stranskih proizvodih. COM (2007) 59 konč.: str. 11, 13.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0059:FIN:SL:PDF>  
(Pridobljeno 3. 5. 2013.)

[14] Jurjavčič, P. 2012. Vrste žlinder kot proizvodi v gradbeništvu. Mineral. 5, 21: 28-31.

[15] Dobovišek, B. 1989. Metalurške žindre. Ljubljana, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo: 245 str.

[16] Tolar, M. 2006. Elektrojeklarstvo. Jesenice, Sij – Acroni: 328 str.

[17] Gontarev, V. 2005. Teorija metalurških procesov. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo: 129 str.

[18] Jeseničnik, M. 2009. Tehnologija predelovanja črne žindre za potrebe gradbeništvu. Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študijskega programa. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba M. Jeseničnik): 69 str.

[19] National Slag. Slag in history. 2013.

<http://www.nationalslag.org/slaghistory.htm> (Pridobljeno 3. 5. 2013.)

[20] Mladenovič, A., Kokot, D., Cotič, Z. 2009. Uporaba agregata iz jeklarske žindre v obrabnih asfaltnih plasteh: 47 str.

[http://www.fehrl.org/?m=32&mode=download&id\\_file=7744](http://www.fehrl.org/?m=32&mode=download&id_file=7744) (Pridobljeno 12. 4. 2013.)

- [21] Mladenovič, A. 2012. Odpadki kot surovina za gradbeništvo. Rebirth: 64 str.  
[www.rebirth.eu/scripts/download.php?file=/data/novice/prosojnice012013/Mladenovic\\_A.\\_Odpadki\\_kot\\_surovina\\_za\\_gradbenistvo.pdf](http://www.rebirth.eu/scripts/download.php?file=/data/novice/prosojnice012013/Mladenovic_A._Odpadki_kot_surovina_za_gradbenistvo.pdf) (Pridobljeno 12. 4. 2013.)
- [22] Euroslag. Applications. 2013.  
<http://www.euroslag.com/applications/> (Pridobljeno 3. 5. 2013.)
- [23] Acroni. 2013.  
<http://www.acroni.si/?subpageid=2> (Pridobljeno 20. 5. 2013.)
- [24] Jasnič, B. 2011. Acroni predeluje tudi belo žindro. Interni časopis skupine SIJ – Slovenska industrija jekla, 3: 9.  
<http://www.acroni.si/data/files/1302086575.pdf> (Pridobljeno 15. 5. 2013.)
- [25] Petovar, S. 2009. Srebrni inovatorji iz Jeklarne Metala Ravne. Interni časopis skupine SIJ – Slovenska industrija jekla, 9: 4.  
<http://www.acroni.si/data/files/1254469708.pdf> (Pridobljeno 15. 5. 2013.)
- [26] Šuštaršič, M. 2012. Predelovanje žindre ni več tabu. Interni časopis skupine SIJ – Slovenska industrija jekla, 9: 10.  
<http://www.acroni.si/data/files/1349349138.pdf> (Pridobljeno 15. 5. 2013.)
- [27] Žmavc, J. 2007. Gradnja cest. Voziščne konstrukcije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 357 str.
- [28] TSC 06.200:2003. Nevezane nosilne in obrabne plasti.
- [29] TSC 06.320. Vezane spodnje nosilne plasti s hidravličnimi vezivi.
- [30] TSC 06.420:2003. Vezane obrabnonosilne plasti cementni beton.
- [31] Vgrajevanje betonskega vozišča na pasu za počasna vozila. 2013.  
<http://www.alter.si/tabla/printthread.php/Cat/0/Board/splosno/main/63340/type/thread>  
(Pridobljeno 28. 5. 2013.)
- [32] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

[33] Vgrajevanje valjanega betona z valjarji. 2013.

<http://www.igelco.com/services/roller/> (Pridobljeno 28. 5. 2013.)

[34] SIST EN 932-1:1999. Preskusi splošnih lastnosti agregatov - 1. del: Metode vzorčenja.

[35] SIST EN 932-2:1999. Preskusi splošnih lastnosti agregatov - 2. del: Metode zmanjševanja laboratorijskih vzorcev.

[36] SIST EN 1097-5:2008. Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov - 5. del: Določevanje vode s sušenjem v prezračevanem sušilniku.

[37] SIST EN 1097-7:2008. Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov - 7. del: Določevanje prostorninske mase zrn kamene moke - Postopek s piknometrom.

[38] SIST EN 933-1:2012. Preskusi geometričnih lastnosti agregatov - 1. del: Ugotavljanje zrnivosti - Metoda sejanja.

[39] Mladenovič, A. 2010. N.K. 10-003. Navodilo za merjenje velikosti delcev od 0.7 do 400 µm z laserskimi žarki. Interno gradivo. Ljubljana, ZAG: 3 str.

[40] Cilas 920. 2013.

[http://www.particle-size-analyzer.com/image/cilas\\_920.jpg](http://www.particle-size-analyzer.com/image/cilas_920.jpg) (Pridobljeno 25. 7. 2013.)

[41] ISO 15901-2:2006. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 2: Analysis of mesopores and macropores by gas adsorption.

[42] Mauko, A. 2013. Ugotavljanje površine in sub-mikro poroznosti s plinsko sorpcijo (Gads). Interno gradivo. Ljubljana, ZAG: 3 str.

[43] Micromeritics ASAP 2020. 2013.

<http://www.ferret.com.au/c/Particle-Surface-Sciences/images/Micromeritics-ASAP-2020-Accelerated-Surface-Area-and-Pososimetry-System-from-Particle-Surface-Sciences-286411-370x278.jpg> (Pridobljeno 25. 7. 2013.)

- 
- [44] Mladenovič, A. 2010. N.K. 10-002. Navodilo za mineraloško petrografske analize. Interno gradivo. Ljubljana, ZAG: 6 str.
- [45] SIST EN 1744-1:2010+A1:2013. Preskusi kemičnih lastnosti agregatov - 1. del: Kemijska analiza.
- [46] SIST EN 196-2:2005. Metode preskušanja cementa - 2. del: Kemijska analiza cementa.
- [47] SIST EN 1744-3:2002. Preskusi kemičnih lastnosti agregatov - 3. del: Priprava izlužkov agregatov.
- [48] SIST EN 197-1:2011. Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.
- [49] SIST 1026:2008. Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1.
- [50] SIST EN 12350-1:2009. Preskušanje svežega betona - 1. del: Vzorčenje.
- [51] SIST EN 13286-2:2010. Nevezane in hidravlično vezane zmesi - 2. del: Preskusne metode za določanje laboratorijske referenčne gostote in deleža vlage - Preskus po Proctorju.
- [52] SIST EN 12390-2:2009. Preskušanje strjenega betona - 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti.
- [53] SIST EN 13286-41:2004. Nevezane in hidravlično vezane zmesi – 41. del: Preskusna metoda za ugotavljanje tlačne trdnosti hidravlično vezanih zmesi.
- [54] SIST EN 12350-2:2009. Preskušanje svežega betona - 2. del: Preskus s posedom stožca.
- [55] SIST EN 12350-6:2009. Preskušanje svežega betona - 6. del: Gostota.
- [56] SIST EN 12350-7:2009. Preskušanje svežega betona - 7. del: Vsebnost zraka - Metode s pritiskom.

[57] SIST EN 12390-1:2013. Preskušanje strjenega betona - 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe.

[58] SIST EN 12390-7:2009. Preskušanje strjenega betona - 7. del: Gostota strjenega betona.

[59] SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona - 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.

[60] SIST EN 12390-4:2001. Preskušanje strjenega betona - 4. del: Tlačna trdnost - Specifikacija za stiskalnice.

[61] SIST EN 12390-8:2009. Preskušanje strjenega betona - 8. del: Globina vpijanja vode pod pritiskom.

[62] Mauko, A. 2013. BET površina. Osebna komunikacija. (15. 7. 2013.)

[63] SIST EN 206-1:2003/A2:2005. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.