

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:

Seljak, S., 2016. Betonska vozišča - primerjava različnih regulativ in projektiranje sestave betona. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V.): 116 str.

Datum arhiviranja: 20-07-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Seljak, S., 2016. Betonska vozišča - primerjava različnih regulativ in projektiranje sestave betona. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V.): 116 pp.

Archiving Date: 20-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO
SMER NIZKE GRADNJE**

Kandidat:

SAŠO SELJAK

**BETONSKA VOZIŠČA - PRIMERJAVA RAZLIČNIH
REGULATIV IN PROJEKTIRANJE SESTAVE BETONA**

Magistrsko delo št.: 24/II.GR

**CONCRETE ROADS - COMPARISON OF
REGULATIONS AND CONCRETE MIXTURE DESIGN**

Graduation – Master Thesis No.: 24/II.GR

Mentorica:

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

dr. Andrej Ipavec

Ljubljana, 07. 07. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Sašo Seljak, vpisna številka 26410134, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Betonska vozišča: Pregled in primerjava slovenske regulative s tujo na področju dimenzioniranja izbire sestavin in priprave ustrezne betonske mešanice

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: Ljubljana

Datum: 4.7.2016

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 625.033.38:666.97.033.1(043) |
| Avtor: | Sašo Seljak, dipl. inž. grad. (UN) |
| Mentor: | prof. dr. Violeta Bokan – Bosiljkov |
| Somentor: | dr. Andrej Ipavec |
| Naslov: | Betonska vozišča – primerjava različnih regulativ in projektiranje sestave betona |
| Tip dokumenta: | magistrsko delo |
| Obseg in oprema: | 116 str., 34 pregl., 60 sl. |
| Ključne besede: | betonska vozišča, regulativa, dimenzioniranje, mikrostruktura, cement, projektiranje sestave betona, |

Izvleček

Pred nami je obdobje, ko bo v Republiki Sloveniji potrebna temeljita rekonstrukcija cestnega omrežja. Zadnje ocene stanja vozišč so namreč pokazale alarmantno stanje trenutnega omrežja državnih cest. To je hkrati tudi priložnost, da se poveča obseg gradnje betonskih vozišč. Tuje izkušnje namreč kažejo na številne prednosti betonskih vozišč pred asfaltnimi.

Namen dela je pregled trenutno veljavnih zahtev s področja načrtovanja betonskih vozišč v RS in njihova primerjava z zahtevami v tujini. Pri tem upoštevamo, da se betonska vozišča v tujini projektirajo na življenjsko dobo 30 let, kar želimo doseči tudi pri nas. V prvem delu naloge predstavimo gradbene in konstrukcijske osnove za izvedbo betonskih vozišč. V nalogi podamo zahteve glede kvalitete vgradnje in vgrajenih materialov v temeljno in nosilno voziščno konstrukcijo. Opozorimo na pomanjkljivosti postopka dimenzioniranja voziščnih konstrukcij, ki ga uporabljamo v Sloveniji, in predlagamo drugega.

V nadaljevanju dela se osredotočimo na pripravo betonske mešanice za izvedbo krovne plasti voziščne konstrukcije. V delu so združene trenutno veljavne zahteve v RS, tako za posamezne sestavine betonske mešanice kot tudi zahteve za pripravo betonske mešanice. Podane zahteve primerjamo z zahtevami v tujini in podamo predloge za dopolnitev trenutne regulative v RS. Pregled cementov je pokazal, da pri nas ne proizvajamo cementa, katerega osnovni namen bi bila uporaba za izvedbo krovnih plasti voziščnih konstrukcij. Zato smo se odločili za laboratorijski razvoj cementa CEM II/B-S 42,5N. Pripravljeni cement smo uporabili za pripravo betonske mešanice, ki izpolnjuje zahteve za obrabne plasti voziščnih konstrukcij. S pomočjo preiskav na svežem in strjenem betonu smo ocenili ustreznost uporabljenih sestavin, predvsem cementa in betonske mešanice.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

| | |
|-----------------------|--|
| UDC: | 625.033.38:666.97.033.1(043) |
| Author: | Sašo Seljak B. Sc. Civil Engineering |
| Supervisor: | prof. Violeta Bokan – Bosiljkov, Ph.D. |
| Cosupervisor | Andrej Ipavec, Ph.D. |
| Title: | Concrete roads – comparison of regulations and concrete mixture design |
| Document type: | Master Thesis |
| Notes: | 116 p., 34 t., 60 fig. |
| Key words: | concrete roads, regulation, dimensioning, microstructure, cement, concrete mixture design |

Abstract

In the near future, Slovenia will require a thorough reconstruction of the road network. Recent assessments of the condition of our roads have shown an alarming deterioration of our current public roads network. This is also an opportunity to increase the volume of construction of concrete pavement. Foreign experiences point to a number of advantages of concrete pavement in comparison to asphalt.

The objective of this work is to show an overview of the current requirements in the field of design for concrete pavement in Slovenia and their comparison with the requirements of foreign regulations. Therefore we have to acknowledge that concrete pavements abroad are designed for a life span of 30 years, which is something we want to achieve. In the first part of the thesis we present the construction and design bases for the implementation of concrete pavements. Currently known systems of pavement structures and types of joints are studied in detail. Requirements for the installing and materials used in subbase and base courses are also given. We pointed out the shortcomings of the procedure for dimensioning of pavement structures used in Slovenia and suggested another one.

In the second part we focus on the preparation of concrete mixture. The requirements of Slovenian regulations for components and concrete mixture were gathered and compared against foreign regulations. Due to the result, we suggest an update of Slovenian requirements. An overview of cements showed that we do not produce a cement whose primary purpose is to prepare the wearing course of pavement structures. A decision was made to develop a laboratory cement CEM II/B-S 42,5N. Developed cement was used for the preparation of a concrete mixture that meets the requirements for the wearing course of pavement structures. Through investigations of fresh and hardened concrete, we evaluated the adequacy of the components used, mainly cement and concrete mixtures.

ZAHVALA

Iskrena hvala prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov, ker me je sprejela pod svoje mentorstvo ter za vso strokovno pomoč in nasvete pri pisanju naloge.

Somentorju dr. Andreju Ipavcu se iskreno zahvaljujem za pomoč, ki mi jo je nudil tekom pisanja magistrske naloge. Skozi številne pogovore mi je z vedno zanimivimi, razumljivimi in strokovnimi razlagami pomagal bolje razumeti kompleksno področje betona. S svojim vzorom glede pristopa do dela je poskrbel, da so številni problemi tekom pisanja naloge postali zgolj izzivi.

Zaposlenim v laboratorijih podjetja Salonit Anhovo d.d. ter Fakultete za gradbeništvo in geodezijo se zahvaljujem za pomoč pri opravljanju praktičnega dela naloge. Posebna zahvala gre g. Metodu Mrzlikarju za vse nasvete in pomoč pri pripravi betonske mešanice.

Hvala podjetju Salonit Anhovo d.d. za finančno pomoč tekom študija ter omogočanje opravljanja prakse ter praktičnega dela naloge v njihovem betonskem laboratoriju.

Najlepša hvala ge. Lojzki Reščič za nasvete in priskrbljeno gradivo s področja betona in betonskih vozišč.

Mateji Čubej se iskreno zahvaljujem, ker si je med svojim delom vedno vzela čas in mi svetovala ter pomagala pri opravljanju praktičnega dela naloge. Hvala tudi za prijetno in prijateljsko vzdušje na delu.

Blanki Zver se zahvaljujem za vse vzpodbudne besede med pisanjem magistrske naloge.

In nenazadnje iskrena hvala mojima staršema za vso podporo in pomoč – ne samo pri študiju, temveč v življenju nasploh.

KAZALO VSEBINE

| | |
|--|-----------|
| IZJAVA O AVTORSTVU | II |
| BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK | III |
| ZAHVALA | V |
| | |
| 1 UVOD | 1 |
| | |
| 2 BETONSKA VOZIŠČA – PAMETNA IN TRAJNOSTNA REŠITEV | 3 |
| 2.1 Okoljski vidik betonskih vozišč (povzeto po Rens, 2009) | 4 |
| 2.2 Ekonomski vidik betonskih vozišč (povzeto po Rens, 2009) | 6 |
| 2.3 Družbeni vidik betonskih vozišč (povzeto po Rens, 2009) | 7 |
| | |
| 3 GRADBENE TER KONSTRUKCIJSKE OSNOVE BETONSKIH VOZIŠČ | 9 |
| 3.1 Sistemi betonskih voziščnih konstrukcij | 10 |
| 3.1.1 Stikovana nearmirana betonska vozišča z mozničenimi ali nemozničenimi regami | 10 |
| 3.1.2 Stikovana armirana betonska vozišča z mozničenimi ali nemozničenimi regami | 13 |
| 3.1.3 Neprekinjeno armirana betonska vozišča | 14 |
| 3.1.4 Prednapeta betonska vozišča | 15 |
| 3.2 Tipi betonskih voziščnih konstrukcij | 16 |
| 3.3 Rege | 17 |
| 3.3.1 Navidezne rege | 18 |
| 3.3.2 Pritisnjene rege | 23 |
| 3.3.3 Zaključne in priključne rege | 23 |
| 3.3.4 Prostorske rege | 24 |
| 3.3.5 Ločilne rege | 25 |
| 3.3.6 Vložki in fugirna polnila | 26 |
| 3.3.7 Mozniki in sidra | 27 |
| | |
| 4 DIMENZIONIRANJE NOVIH BETONSKIH VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ | 32 |
| 4.1 Temeljna tla in spodnji ustroj | 32 |
| 4.2 Nevezana nosilna plast | 35 |
| 4.3 Vezana (stabilizirana) zgornja nosilna plast | 37 |
| 4.4 Bitumenski nosilni sloji | 40 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.5 | Prometne obremenitve | 41 |
| 4.6 | Načrtovanje (dimenzioniranje) betonskih voziščnih konstrukcij | 44 |
| 4.6.1 | Načrtovanje betonskih voziščnih konstrukcij v Sloveniji | 45 |
| 4.6.2 | Načrtovanje betonskih voziščnih konstrukcij v Avstriji | 48 |
| 4.6.3 | Praktični primer načrtovanja betonskih voziščnih konstrukcij | 49 |
| 5 | ZAHTEVE ZA SESTAVINE BETONSKE MEŠANICE | 52 |
| 5.1 | Splošno | 52 |
| 5.2 | Standardizacija | 52 |
| 5.3 | Cement | 53 |
| 5.4 | Agregat | 55 |
| 5.4.1 | Zahteve za agregat v Sloveniji | 57 |
| 5.4.2 | Zahteve za agregat v tujini – Avstrija | 59 |
| 5.4.3 | Primerjava zahtev za agregate v Sloveniji in Avstriji | 64 |
| 6 | ZAHTEVE ZA SESTAVO BETONSKE MEŠANICE, VGRAJENE V KROVNO PLAST VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE | 66 |
| 6.1 | Zahteve za sestavo betonske mešanice v Sloveniji | 66 |
| 6.2 | Zahteve za sestavo betonske mešanice v Nemčiji | 67 |
| 6.3 | Zahteve za sestavo betonske mešanice v Avstriji | 69 |
| 6.4 | Primerjava zahtev za sestavo betonske mešanice | 70 |
| 7 | CEMENT – HIDRATACIJA IN RAZVOJ MIKROSTRUKTURE CEMENTNEGA KAMNA | 72 |
| 7.1 | Hidratacija portlandskega cementa (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006) | 72 |
| 7.1.1 | Kemijske reakcije portlandskega cementa | 73 |
| 7.1.2 | Faze hidratacije in parametri, ki vplivajo nanjo | 74 |
| 7.2 | Mikrostruktura cementnega kamna in pore v betonu (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006) | 76 |
| 7.2.1 | Mikrostruktura stičnega območja | 79 |
| 7.3 | Vpliv klinkerskih mineralnih faz na lastnosti svežega in strjenega betona (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006) | 80 |
| 7.4 | Hidratacija Portlandskega mešanega cementa (CEM II) (Mehta in Monteiro, 2006) | 80 |
| 7.5 | Hidratacija sulfatno odpornega cementa | 82 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 7.6 | Vpliv mikrostrukture cementnega kamna na odpornost betona proti zmrzovanju (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006) | 83 |
| 8 | PRAKTIČNI DEL | 87 |
| 8.1 | Uvod | 87 |
| 8.2 | Laboratorijski razvoj cementa CEM II/B-S 42,5N | 87 |
| 8.3 | Primerjava laboratorijskih preiskav cementov CEM II/B-S 42,5N ter CEM I/42,5N SR0 | 88 |
| 8.4 | Sestavine betonske mešanice | 91 |
| 8.4.1 | Agregat | 91 |
| 8.4.2 | Cement | 92 |
| 8.4.3 | Voda | 93 |
| 8.4.4 | Plastifikator in superplastifikator | 93 |
| 8.4.5 | Aerant | 93 |
| 8.5 | Receptura betonske mešanice | 93 |
| 8.6 | Preskušanje svežega betona | 95 |
| 8.6.1 | Rezultati preiskav svežega betona – beton CEM I | 96 |
| 8.6.2 | Rezultati preiskav svežega betona – beton CEM II | 97 |
| 8.7 | Preiskave na strjenem betonu | 100 |
| 8.7.1 | Rezultati preiskav strjenega betona – beton CEM I | 101 |
| 8.7.2 | Rezultati preiskav strjenega betona – beton CEM II | 103 |
| 8.8 | Linijska mikroskopska analiza | 105 |
| 8.9 | Ocena primernosti uporabe cementa CEM II B-S/42,5 N in sprojektirane betonske mešanice za vgradnjo v betonsko vozišče | 110 |
| 9 | ZAKLJUČEK | 112 |
| VIRI | | 113 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--|----|
| Preglednica 3.1: Izbira debeline obrabnega sloja betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 40)..... | 17 |
| Preglednica 3.2: Globine zarez v odvisnosti od debeline betonske krovne plasti (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 41)..... | 19 |
| Preglednica 3.3: Zahteve za vložke in fugirna polnila v Avstriji (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 33) | 26 |
| Preglednica 4.1: Zahtevani moduli in stopnja zgoščenosti po Proctorju pri gradnji spodnjega ustroja cest v Avstriji (Blab et al, 2012, str. 52)..... | 35 |
| Preglednica 4.2: Minimalne zahteve za nevezane nosilne plasti v Avstriji po RVS 08.15.01 (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 55) | 36 |
| Preglednica 4.3: Minimalne zahteve za nevezano nosilno plast v RS (Rijavec, 2013)..... | 36 |
| Preglednica 4.4: Zahteve za stabilizirano nosilno plast v Avstriji pri kontroli na gradbišču (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 60) | 39 |
| Preglednica 4.5: Razredi prometne obremenitve po RStO 12 (prirejeno po Vir: https://de.wikipedia.org/wiki/Belastungsklasse)..... | 42 |
| Preglednica 4.6: Faktorji ekvivalentnosti za posamezne kategorije motornih vozil (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 68)..... | 43 |
| Preglednica 4.7: Faktorji širine prometnih pasov v odvisnosti od širine pasov (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 68)..... | 43 |
| Preglednica 4.8: Razredi prometne obremenitve po RVS 03.08.63 (prirejeno po Blab et al., 2012) ... | 44 |
| Preglednica 4.9: Prikaz izračuna ekvivalentne dnevne prometne obremenitve po RVS in TSC..... | 50 |
| Preglednica 5.1: Zahteve v RS za agregat v obrabni plasti betonske voziščne konstrukcije..... | 57 |
| Preglednica 5.2: Zahteve za agregat za spodnjo plast betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 23) . | 59 |
| Preglednica 5.3: Zahteve za agregat za zgornjo, obrabno plast betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 23) | 60 |
| Preglednica 6.1: Zahteve betona za krovne plasti v RS | 66 |
| Preglednica 6.2: Zahtevani razredi tlačne in natezne trdnosti betona za krovne plasti (TSC 06.420:2003)..... | 66 |
| Preglednica 6.3: Zahteve betona za obrabno krovno plast v RS..... | 67 |
| Preglednica 6.4: Zahteve glede betona za krovno plast v Nemčiji (povzeto po Grünewald in Peck, 2015) | 68 |
| Preglednica 6.5: Zahteve glede minimalne povprečne vsebnosti zraka v betonu za krovno plast v Nemčiji (povzeto po Grünewald in Peck, 2015)..... | 68 |
| Preglednica 6.6: Zahteve glede betona za krovno plast v Avstriji (povzeto po Blab et al., 2012) | 69 |

| | |
|--|-----|
| Preglednica 7.1: Glavni oksidi v portlandskem cementu | 73 |
| Preglednica 7.2: Glavne mineralne faze v PC klinkerju in njihove lastnosti | 73 |
| Preglednica 8.1: Rezultati laboratorijskih preiskav cementov CEM I in CEM II | 90 |
| Preglednica 8.2: Primerjava karakteristik peska Černotiče 0/2 z zahtevami v RS in Avstriji | 91 |
| Preglednica 8.3: Projektne zahteve za betonsko mešanico | 94 |
| Preglednica 8.4: Receptura betonske mešanice | 94 |
| Preglednica 8.5: Rezultati preiskav svežega betona - CEM I..... | 96 |
| Preglednica 8.6: Rezultati preiskav svežega betona - CEM II | 98 |
| Preglednica 8.7: Rezultati preiskave tlačne trdnosti – CEM I..... | 101 |
| Preglednica 8.8: Rezultati preiskave cepilne natezne trdnosti in prodora vode pod pritiskom – CEM I | 102 |
| Preglednica 8.9: Rezultati preiskave tlačne trdnosti – CEM II..... | 103 |
| Preglednica 8.10: Rezultati preiskave cepilne natezne trdnosti in prodora vode pod pritiskom – CEM II | 103 |
| Preglednica 8.11: Rezultati preiskave z linijsko mikroskopsko analizo | 107 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 2.1: Shema trajnostnega razvoja (prirejeno po Rens, 2009, str. 15)..... | 4 |
| Slika 2.2: Prikaz emisij CO ₂ , ki nastanejo pri proizvodnji različnih vrst cementov (Rens, 2009, str. 21) | 5 |
| Slika 2.3: Prikaz izvedbenih in vzdrževalnih stroškov različnih tipov AC v obdobju 50 let (Rens, 2009)..... | 7 |
| Slika 3.1: Tipični prerez ceste s krovno plastjo iz cementnega betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 36)..... | 9 |
| Slika 3.2: Tloris in prerez stikovanega nearmiranega betonskega vozišča z mozničenimi regami (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 37)..... | 11 |
| Slika 3.3: Prikaz preloma betonske plošče na mestu navidezne rege (Vir: http://www.pavementinteractive.org/article/joint-design/)..... | 12 |
| Slika 3.4: Tloris in prerez stikovanega armiranega betonskega vozišča z mozničenimi regami (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 38)..... | 14 |
| Slika 3.5: Tloris in prerez neprekinjeno armiranega betonskega vozišča (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 38)..... | 14 |
| Slika 3.6: Prikaz položaja armature za izvedbo neprekinjeno armiranega betonskega vozišča (Vir: http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/05081/chapt2.cfm)... 15 | 15 |
| Slika 3.7: Shematski prikaz prednapetega betonskega vozišča (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 39)16 | 16 |
| Slika 3.8: Prikaz standardnih tipov voziščnih konstrukcij v Avstriji (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 39)..... | 16 |
| Slika 3.9: Prikaz napetosti v betonski plošči (Vir: http://theconstructor.org/concrete/joints-in-concrete-structures/970/)..... | 18 |
| Slika 3.10: Prikaz mozničene netesnjene navidezne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 42)..... | 19 |
| Slika 3.11: Prikaz izvedbe zatesnjene mozničene navidezne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 42)..... | 20 |
| Slika 3.12: Prikaz tesnjenja in oblike razreza (prirejeno po Vir: http://wikipave.org/index.php?title=Joint_Sealing)..... | 21 |
| Slika 3.13: Določitev izmer razreza v odvisnosti od širine razpoke pod zarezo (TSC 06.420, 2003).. | 21 |
| Slika 3.14: Prikaz tesnjenja rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 43)..... | 22 |
| Slika 3.15: Prikaz zatesnitve rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 44)..... | 23 |
| Slika 3.16: Prikaz izvedbe pritisknjene rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 44)..... | 23 |
| Slika 3.17: Prikaz izvedbe priključne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 46)..... | 24 |
| Slika 3.18: Prikaz izvedbe prostorske rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 46)..... | 25 |

| | |
|--|----|
| Slika 3.19: Prikaz izvedbe ločilne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 47) | 26 |
| Slika 3.20: Prikaz razvrstitve moznikov glede na različne prometne obremenitve (Vir: http://www.otto-brentzel.com/produkte.html)..... | 27 |
| Slika 3.21: Prikaz razvrstitve sider glede na stopnjo prometne obremenitve (prirejeno po Vir: http://wiki.beton-informationen.de/index.php?title=Datei:FugenStrassen.jpg) | 28 |
| Slika 3.22: Detajl razporeditve moznikov, sider in reg v primeru vgraditev jaška s kvadratnim pokrovom (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 105)..... | 30 |
| Slika 3.23: Detajl razporeditve reg, sider in moznikov v primeru vgraditev jaška z okroglim pokrovom (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 105) | 31 |
| Slika 3.24: Detajl razporeditve reg, sider in moznikov v primeru vgraditev jaška s kvadratnim pokrovom, preko katerega poteka rega (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 106)..... | 31 |
| Slika 4.1: Zahtevani moduli pri gradnji cestnih nasipov v RS (Logar, b. d.) | 34 |
| Slika 4.2: Zahteve za kakovost v nasipe vgrajenega materiala (Logar, b. d.) | 34 |
| Slika 4.3: Zahteve za zmesi kamnitih zrn za proizvodnjo bitumenskega betona (Vir: http://www.hwk.at/index_h.htm_files/Anforderungen%20an%20Gesteinskoernungen%20im%20Strassenbau%20in%20Oesterreich.pdf)..... | 40 |
| Slika 4.4: Tipski prečni profil betonskega vozišča tipa 6 v primeru prometne obremenitve razreda S (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 65) | 40 |
| Slika 4.5: Diagram za določitev debeline plasti zmesi kamnitih zrn v nevezani nosilni plasti (TSC 06.530, 2009, str. 9)..... | 46 |
| Slika 4.6: Nomogram za določitev debeline betonske krovne plasti (TSC 06.530, 2009, str. 8) | 47 |
| Slika 4.7: Prikaz določitev dimenzij voziščne konstrukcije v odvisnosti od merodajne prometne obremenitve v Avstriji (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 68)..... | 48 |
| Slika 4.8: Graf razvoja debeline krovne plasti betonskega vozišča v RS po posameznih projektih (Kavčič in Mrzelj, 2015)..... | 49 |
| Slika 4.9: Prikaz debeline voziščne konstrukcije po posameznih slojih; levo – dimenzije po RVS, desno – dimenzije po TSC | 51 |
| Slika 5.1: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8 (SIST 1026:2016)..... | 58 |
| Slika 5.2: Priporočene mejne krivulje zrnivosti mešanice agregata za beton krovne plasti voziščne konstrukcije (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 29) | 61 |
| Slika 5.3: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8 (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 29)..... | 62 |
| Slika 5.4: Optimalna krivulja zrnivosti za pesek 0/4 (Balfroid, Pilate in Ployaert, 2014)..... | 63 |

| | |
|---|-----|
| Slika 5.5: Prikaz izbranih krivulj zrnivosti (Corporaal in Jurriaans, 2014) | 64 |
| Slika 7.1: Obdobja hidratacijskega procesa (Trtnik, 2009) | 74 |
| Slika 7.2: Morfologija kristalov etringita in CH kristalov (Vir: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/CaOH2SEM.jpg) | 76 |
| Slika 7.3: Shematski prikaz oblike in velikosti por in zračnih mehurčkov v cementnem kamnu (Mehta in Monteiro, 2006) | 78 |
| Slika 7.4: Prikaz nastajanja ledu v porah (Mehta in Monteiro, 2006 str. 139) | 84 |
| Slika 7.5: Prikaz nastajanja ledu v kapilarni (a) in v zračni (b) pori (Mehta in Monteiro, 2006 str. 140) | 85 |
| Slika 8.1: Primerjava porazdelitve velikosti zrn cementov CEM I in CEM II | 89 |
| Slika 8.2: Graf primerjave zrnovostne krivulje peska Černotiče 0/2 | 92 |
| Slika 8.3: Zrnovostna krivulja mešanice agregata | 95 |
| Slika 8.4: Prikaz preskusa s posedom | 97 |
| Slika 8.5: Prikaz meritve razleza | 98 |
| Slika 8.6: Shematski prikaz določanja cepilne natezne trdnosti po SIST EN 12390-6..... | 101 |
| Slika 8.7: Prikaz preiskave cepilne natezne trdnosti | 102 |
| Slika 8.8: Prikaz porušenega prereza betonskega vzorca kot rezultat preizkusa cepilne natezne trdnosti | 103 |
| Slika 8.9: Prikaz preiskave tlačne trdnosti | 104 |
| Slika 8.10: Prikaz preiskave prodora vode pod pritiskom..... | 104 |
| Slika 8.11: Digitalni video-mikroskopski sistem HIROX KH-3000 | 106 |
| Slika 8.12: Prikaz preizkušancev za preiskavo z metodo linijske mikroskopske analize; levo (CEM I), desno (CEM II) | 107 |
| Slika 8.13: Mikrorazpoke v cementnem kamnu | 109 |
| Slika 8.14: Graf primerjave porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por glede na kumulativni delež zraka ter število tetiv v posameznem razredu za betona CEM I in CEM II..... | 109 |

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

| | |
|--------|---|
| AC | Avtocesta |
| EU | Evropska unija |
| EUPAVE | European Concrete Paving Association |
| FGG | Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo |
| LCA | Life Cycle Assessment |
| LCCA | Life Cycle Cost Analysis |
| NOO | Nazivna osna obremenitev |
| MKE | Metoda končnih elementov |
| TSC | Tehnična specifikacija za ceste |
| OPZT-S | Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti sredstev za tajanje |
| PLDP | Povprečni letni dnevni promet |
| RS | Republika Slovenija |
| ZDA | Združene Države Amerike |

1 UVOD

Živimo v družbi, v kateri je vse bolj prisotno zavedanje o pomembnosti trajnostnega razvoja. V to nas sili globalna rast prebivalstva, ki se odraža v vse večjih potrebah po naravnih virih, obremenitvah naravnega okolja in povečanih emisijah toplogrednih plinov. Promet in prometna infrastruktura sta področji, ki lahko v prizadevanjih za trajnostni razvoj odigrata pomembno vlogo. Promet namreč povzroča velik del emisij toplogrednih plinov, gradnja prometne infrastrukture pa predstavlja zelo pomemben del investicij v javno infrastrukturo.

Z oceno stanja vozišč na državnih cestah v RS je bilo v letu 2015 ugotovljeno, da je trenutno okrog 60 % državnih cest v slabem ali zelo slabem stanju (Zupan, 2016). Vzoredno skrb vzbuja konstantno naraščanje težkega tovornega, predvsem tranzitnega, prometa. Analize kažejo, da se je obseg tonskih kilometrov slovenskih prevoznikov v obdobju 2004–2011 povečal kar za 83 %, rast pa se je nadaljevala kljub gospodarskim težavam v EU.

Ena izmed rešitev opisanih težav je zagotovo izgradnja betonskih vozišč. Beton se vse bolj uveljavlja kot trajnosten material, betonska vozišča pa so poznana kot izredno odporna na vse zunanje vplive z dolgo življenjsko dobo ob hkratnih nizkih stroških vzdrževanja. V časih, ko se daje prednost lokalnemu zaposlovanju in razvoju lokalnih virov, se vse bolj zdi, da je nastopil čas, ko bi bilo tudi v Sloveniji smiselno povečati obseg gradnje betonskih vozišč.

Dosedanje število izvedenih betonskih vozišč v RS je relativno nizko, izkušnje in znanje za izvedbo takih vozišč pa omejeno na majhno število inženirjev. Pripravljalci regulative na področju betonskih vozišč so se pri pripravi tehničnih specifikacij za ceste opirali predvsem na tuje znanje in izkušnje, ko so leta 2003 izdali TSC z naslovom Vezane obrabnonosilne plasti – cementni beton ter leta 2009 TSC z naslovom Projektiranje, dimenzioniranje novih cementnobetonskih voziščnih konstrukcij. Postopkov dimenzioniranja voziščne konstrukcije je več in težko bi rekli, da obstaja idealni. Prav tako se postopki dimenzioniranja betonskih vozišč v tujini spreminjajo, saj inženirji neprestano iščejo nove načine, kako odgovoriti na vse večje prometne obremenitve ob hkratnem upoštevanju trajnostnega razvoja. Zato smo se odločili, da v tem delu opravimo primerjavo trenutno veljavne slovenske regulative na področju betonskih vozišč z regulativo držav, ki imajo na tem področju bogatejšo izkušnje.

V magistrskem delu najprej predstavimo gradbene in konstrukcijske osnove za izvedbo betonskih vozišč. Podrobno so razloženi trenutno poznani sistemi voziščnih konstrukcij, ki se uporabljajo po svetu ter vrste in načini izvedbe reg. Pregled tuje regulative pokaže, da se betonska vozišča v tujini projektirajo na plansko dobo 30 let, kar je 10 let več kot v Sloveniji. V nalogi podamo razloge o smiselnosti podaljšanja planske dobe betonskih vozišč tudi pri nas. Vendar daljša življenjska doba vozišča pomeni, da bodo vgrajeni materiali izpostavljeni večjim obremenitvam, zato preverimo, če so trenutno veljavne

zahteve glede kvalitete vgradnje in vgrajenih materialov v RS postavljene dovolj visoko. Pregled trenutno veljavnega postopka dimenzioniranja betonskih voziščnih konstrukcij, ki ga uporabljamo pri nas, pokaže na določene pomanjkljivosti le-tega, zato predlagamo drugega.

V nadaljevanju dela se osredotočimo na pripravo betonske mešanice za izvedbo krovne plasti voziščne konstrukcije. V delu združimo trenutno veljavne zahteve v RS tako za posamezne sestavine betonske mešanice, kot tudi zahteve za pripravo betonske mešanice. Podane zahteve primerjamo z zahtevami v tujini in podamo predloge za dopolnitev trenutne regulative v RS. Pregled cementov je pokazal, da pri nas ne proizvajamo cementa, katerega osnovni namen bi bila uporaba za izvedbo krovnih plasti voziščnih konstrukcij. Zato smo se odločili za laboratorijski razvoj cementa CEM II/B-S 42,5N. Razviti cement uporabimo za pripravo betonske mešanice, ki izpolnjuje zahteve za obrabne plasti voziščnih konstrukcij. Po isti recepturi betonske mešanice pripravimo še beton z uporabo sulfatno odpornega cementa, kar nam omogoča primerjavo vpliva cementa na mehanske in reološke lastnosti betona. S pomočjo preiskav na svežem in strjenem betonu podamo končno oceno ustreznosti uporabljenih sestavin, predvsem razvitega cementa in sprojektirane betonske mešanice.

2 BETONSKA VOZIŠČA – PAMETNA IN TRAJNOSTNA REŠITEV

Prvo betonsko vozišče naj bi bilo zgrajeno v Združenih državah Amerike (ZDA), v zvezni državi Ohio leta 1891, čeprav je v literaturi možno zaslediti tudi navedbe, da naj bi se to zgodilo že leta 1879 na Škotskem. Kakorkoli že, dejstvo je, da so inženirji na prelomu iz 19. v 20. stoletje prepoznali beton kot material, ki je primeren za izvedbo vozišč. Po počasnih začetkih, ko so se inženirji ukvarjali predvsem z izvedbenimi problemi, je nato hitra rast predvsem avtomobilske industrije pospešila razvoj na področju betonskih vozišč.

Že leta 1909 so v ZDA v Detroitu pred gradnjo betonskega vozišča izvedli prvo testno polje. Leta 1916 so prav tako v ZDA izdali prvi priročnik na temo betonskih vozišč, nakar je sledil hiter razvoj predvsem na področju konstruiranja betonskih vozišč. Leta 1922 so prvič izvedli betonsko vozišče z dilatacijami, s katerimi so omejili problem razpokanja betona, leta 1941 je bilo zgrajeno prvo armirano betonsko vozišče, leta 1949 pa je bil prvič uporabljen finišer za izvedbo betonskih vozišč. Inovacije in razvoj na področju betonskih vozišč so se v razvitih državah neprekinjeno nadaljevali vse do dandanes (Delatte, 2008).

Betonska vozišča so se na slovenskem gradila že pred drugo svetovno vojno ter kasneje na posameznih odsekih cest, predorov ter letališč vse do današnjih dni. Najpomembnejša odseka v tem času sta bila cesta Ljubljana - Kranj - Radovljica in cesta Ljubljana - Zagreb (Kavčič in Mrzelj, 2015). Gradnja betonskih cest v kasnejših letih sicer ni povsem zamrla, pa vendar so primat na področju gradnje cest prevzela asfaltna vozišča, kar je posledica kombinacije različnih dejavnikov. Dejstvo je, da imajo asfaltna vozišča določene prednosti pred betonskimi, kot so nižji začetni stroški, hitrejša gradnja in hitrejše popravilo. Naštete prednosti so ob neupoštevanju okoljskih vplivov in krajše življenjske dobe privedle do tega, da je dandanes kar 97 % vozniških površin na slovenskih avtocestah (AC) izvedenih z asfaltno krovno plastjo. K temu je pripomogel tudi relativno slab sloves betonskih vozišč, ki so ga betonska vozišča pridobila predvsem zaradi neudobne vožnje. Razloge za to gre pripisati dejstvu, da so bile ceste načrtovane v skladu z drugačnimi merili kot danes. Poleg tega so bile zgrajene z uporabo starih tehnologij in opreme, zaradi česar je prišlo do slabega obnašanja predvsem stikov, kar so uporabniki občutili kot neudobje med vožnjo. Razvoj na področju betonskih vozišč je poskrbel, da so betonske ceste dandanes sposobne zadovoljiti potrebe in pričakovanja tako upravljavcev kot uporabnikov cest.

Zaradi učinkov globalnega segrevanja, ki je posledica prekomernega izpusta toplogrednih plinov, je v družbi vse bolj prisotno zavedanje o pomembnosti trajnostnega razvoja, ki ga je norveška političarka Gro Harlem Brundtland leta 1987 definirala takole: »Trajnostni razvoj zadovoljuje potrebe sedanjega človeškega rodu, ne da bi ogrozil možnosti prihodnjih rodov, da zadovoljijo svoje potrebe«. Na področju gradbeništva lahko področje gradnje cest, kot eno največjih vej gradbeništva, odigra pomembno vlogo

pri teh prizadevanjih. V nadaljevanju so prikazane prednosti betonskih vozišč pred asfaltnimi z vidika trajnostnega razvoja, ločeno glede na tri glavne stebre trajnostnega razvoja: družbeni, ekonomski in okoljski.



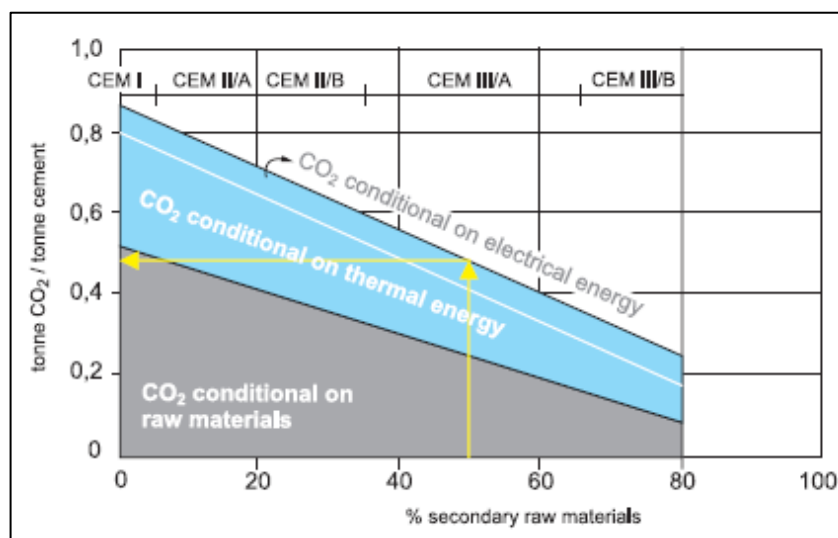
Slika 2.1: Shema trajnostnega razvoja (prirejeno po Rens, 2009, str. 15)

2.1 Okoljski vidik betonskih vozišč (povzeto po Rens, 2009)

Vpliv izbire tipa vozišča na okolje čez celotno življenjsko dobo vozišča najboljše ocenim z LCA (Life Cycle Assessment) analizo. Analiza pri tem ne upošteva samo količine CO₂, ki se sprosti v ozračje med proizvodnjo surovin in samo gradnjo vozišča, temveč tudi ostale vidike, ki vplivajo na okolje, kot sta količina prometnih zastojev zaradi potrebnih popravil vozišča in življenjska doba vozišča.

Če bi v analizi vplivov na okolje upoštevali samo proizvodnjo surovin in gradnjo vozišča, bi se asfaltno vozišče obneslo bolje z vidika nižjih izpustov toplogrednih plinov. Vendar so nadaljnje analize pokazale, da so vplivi na okolje, ki nastanejo v času proizvodnje gradbenih materialov in gradnje, zanemarljivi v primerjavi z vplivi, ki jih ima na okolje promet, ki se zvrsti v času življenjske dobe vozišča (vpliv je vsaj 10-krat večji).

Analize vplivov tipa vozišča na porabo goriva motornih vozil so pokazale, da je le-ta v primeru betonskih vozišč nižja za 2,35 %. Razlog se skriva v večji togosti betonskih vozišč in s tem večji ravnosti. 2,35 % prihranka pri porabi goriva se samo po sebi ne zdi veliko, vendar je dovolj, da se v povprečju v 27 letih izniči višji izpust toplogrednih plinov (CO₂) v času proizvodnje surovin (cementa). Glede na pričakovano življenjsko dobo betonskega vozišča, ki znaša 30 oziroma 40 let, smo na ta način že dosegli nižji ogljični odtis v primerjavi z asfaltnimi vozišči. Na nižji izpust toplogrednih plinov lahko z vidika proizvodnje gradbenih materialov vplivamo tudi z izbiro vrste cementa.



Slika 2.2: Prikaz emisij CO₂, ki nastanejo pri proizvodnji različnih vrst cementov (Rens, 2009, str. 21)

Z nadomeščanjem klinkerja z žlindro lahko namreč bistveno znižamo izpust CO₂ ter istočasno znižamo proizvodno energijo. Proizvodnja cementa ima v primerjavi s proizvodnjo bitumna še en pozitiven vpliv na okolje, in sicer lahko v procesu proizvodnje kot gorivo uporabimo alternativna goriva, kot so na primer gume, odpadna olja, frakcije industrijskih in komercialnih odpadkov itd. Na ta način po eni strani znižamo porabo fosilnih goriv, po drugi strani pa se na varen način znebimo odpadkov, ki bi jih sicer morali posebej uničiti. Za izpust toplogrednih plinov med proizvodnjo cementa je v veliki meri odgovorna dekarbonizacija surovinske moke. V času uporabe betonskega vozišča pride do obratne reakcije imenovane karbonatizacija, ko beton reagira s CO₂ v atmosferi, pri čemer pride do porabe CO₂. Čeprav je karbonatizacija velikokrat vzrok za poškodbe armiranih betonov, pa ne predstavlja problemov v primeru betonskih vozišč, saj so le-ta praviloma nearmirana oziroma v primeru, ko so armirana, je armatura na zadostni globini, da nanjo karbonatizacija nima vpliva. Raziskave so pokazale, da se na račun karbonatizacije betona porabi do 5% CO₂, ki je bil spuščen v ozračje med proizvodnjo cementa vrste CEM III. Če pa beton po koncu uporabe zdrobimo in recikliramo, lahko ta odstotek naraste za 10–25 %. Recikliranje bistveno pripomore tudi k ohranjanju naravnih virov in se vse bolj uporablja v primeru proizvodnje betonskih vozišč, predvsem za izvedbo spodnje plasti betona.

Raziskave so pokazale, da se betonska vozišča v primerjavi z asfaltnimi manj segrevajo zaradi nižjega albedo faktorja. Albedo faktor predstavlja razmerje med prejeto sončno energijo in količino, ki se od površine odbije, pri čemer velja, da višji, kot je ta faktor, več energije se odbije. Albedo faktor betonskih površin je višji za 10-15 % od asfaltnih (pri asfaltnih znaša 5-10 %), kar se lahko v praksi pozna tudi v temperaturni razliki med površinama do 11 °C. Opravljene so bile tudi preiskave meritve vpliva albedo faktorja na koncentracijo CO₂ v atmosferi. Rezultati so bili navdušujoči, saj so pokazali, da lahko z izbiro betona zmanjšamo količino CO₂, ki je enaka 60 % količine CO₂, ki jo med proizvodnjo cementa spustimo v okolje.

2.2 Ekonomski vidik betonskih vozišč (povzeto po Rens, 2009)

V interesu vsakega investitorja oziroma upravljavca ceste je, da ima cesta kar čim daljšo življenjsko dobo z minimalnimi potrebnimi stroški vzdrževanja, ob hkratnem zagotavljanju varnega prometa. Čeprav morajo biti pri izbiri tipa voziščne konstrukcije tehnični parametri vozne površine bistvenega pomena, pa na izbiro nemalokrat odločilno vpliva tudi ekonomski vidik. Poleg tega je treba upoštevati tudi stroške, ki jih povzročijo zastoji na cesti zaradi potrebnih popravil ceste in ki grejo na račun uporabnikov.

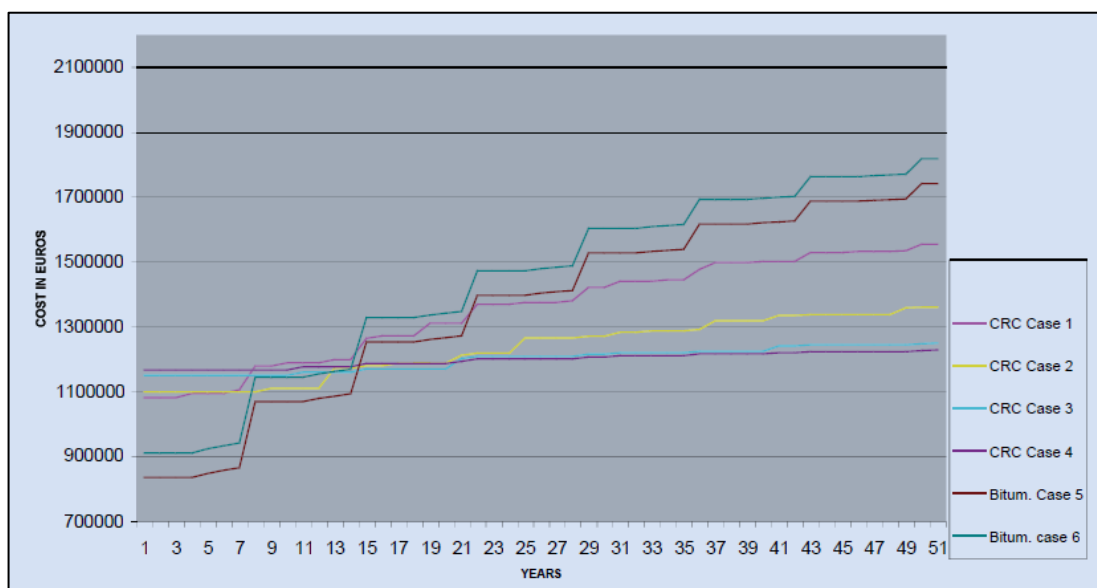
Vse prevečkrat se dogaja, da imajo investicijski stroški previsoko težo pri odločitvi izbire tipa voziščne konstrukcije. V pomoč pri odločitvi so nam analize LCCA (Life-Cycle Cost Analysis), ki upoštevajo tako stroške oziroma končni dobiček investitorja kot tudi stroške uporabnikov. Uporaba te analize sloni na predvidevanju oziroma napovedovanju naslednjih parametrov:

- življenjske dobe vozišča,
- stroškov upravljavca,
- vrednosti vozišča po koncu uporabe,
- stroškov uporabnikov ceste (poraba goriva, stroški zaradi zastojev ter stroški zaradi nesreč) in
- diskontne stopnje.

Ker uspešnost analize sloni na uspešnosti napovedovanja zgornjih parametrov, je analizo smiselno dopolniti še z analizo tveganja (na primer po metodi Monte Carlo).

Graf na sliki 2.3 prikazuje rezultate LCCA analize, ki je bila narejena v Belgiji, državi, ki ima na področju gradnje neprekinjenih armiranih betonskih vozišč več kot 30 let izkušenj. Raziskava je obsegala 6 različnih tipov vozišč na AC, od tega štiri betonska in dve asfaltni. Rezultati raziskave so pokazali, da so stroški vzdrževanja fleksibilnih asfaltnih vozišč bistveno višji od betonskih, s čimer se že v 7-14 letih izniči nižja začetna investicijska cena asfaltnih vozišč.

Prednosti betonskih vozišč v primerjavi z asfaltnimi so z ekonomskega vidika še nižji stroški razsvetljave zaradi svetlejšje površine betona ter bistveno višja stabilnost cene cementa v primerjavi s ceno bitumna (glej Rens, 2009, str. 29).



Slika 2.3: Prikaz izvedbenih in vzdrževalnih stroškov različnih tipov AC v obdobju 50 let (Rens, 2009)

2.3 Družbeni vidik betonskih vozišč (povzeto po Rens, 2009)

Družbeni vidik predstavlja tretji steber trajnostnega razvoja, ki po pomembnosti ne zaostaja za gospodarskim in okoljskim, saj so ceste v prvi vrsti namenjene uporabnikom. Zaradi pomanjkanja znanja in neprimerne opreme v preteklosti, so betonska vozišča pristala na slabem glasu, gledano predvsem z družbenega vidika. Že omenjen razvoj tehnologije omogoča, da dandanes betonska vozišča v primerjavi z asfaltnimi ponujajo:

- Udobnejšo vožnjo zaradi odsotnosti neravnosti; visoka togost betonskih vozišč ter odpornost proti preoblikovanju v kombinaciji z novimi tehnikami izvedbe dilatacij omogočajo visok nivo ravnosti vozišča in s tem udobno vožnjo.
- Večjo varnost; varnost vozišč je neposredno povezana z odpornostjo proti drsenju, s preprečevanjem pojava aquaplaninga ter z vidljivostjo. Razvoj novih metod obdelave betonske površine, kot sta metoda izpostavljenih zrn agregata ter diamantno brušenje (v ZDA taka vozišča poimenujejo »Next Generation Concrete Surface«), zagotavlja tako ustrezne torne karakteristike preko celotne življenjske dobe kot tudi uspešno preprečuje zadrževanje meteornih voda na betonskih voziščih in s tem nastanek aquaplaninga. Bistveno svetlejša površina v primerjavi z asfaltnimi vozišči pa nesporno zagotavlja boljše pogoje vidljivosti, kar pride do izraza predvsem v nočnem času.
- Nižji nivo hrupa; omenjeni metodi obdelave površine omogočata tudi občutno zmanjšanje nivoja hrupa, ki nastane zaradi kotaljenja pnevmatik vozil. Raziskave so pokazale, da lahko v

primeru obdelave površine po metodi izpostavljenih zrna agregata (103,2 dB) oziroma v primeru diamantnega brušenja (približno 100 dB) dosežemo celo nižji nivo hrupa kot v primeru uporabe drenažnega asfalta (106,1 dB), ki je splošno znan po svojih ugodnih karakteristikah glede zmanjševanja nivoja hrupa.

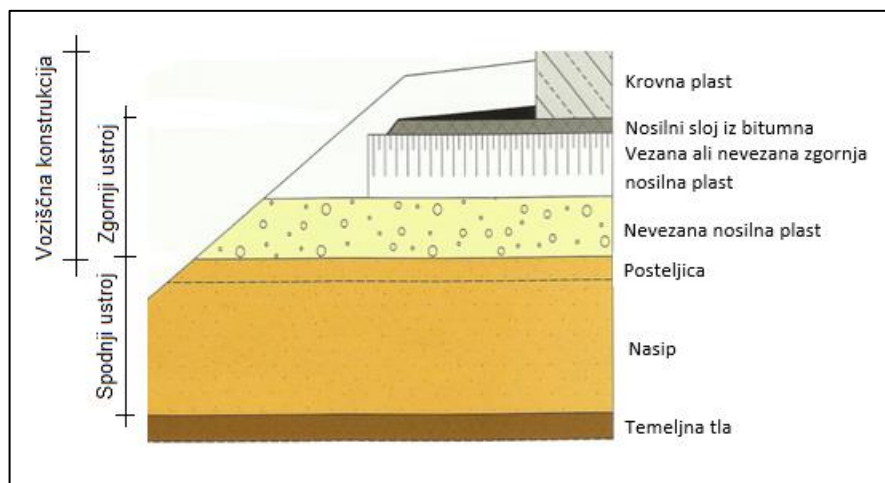
Nižja potreba po vzdrževanju betonskih vozišč v primerjavi z asfaltnimi se odraža v manjših zastojih in s tem manjših posrednih stroških, ki jih zastoji povzročajo družbi, kar je še ena izmed dodatnih prednosti betonskih vozišč, gledano z družbenega vidika.

Pregled lastnosti in prednosti betonskih vozišč po posameznih vidikih tajnostnega razvoja vsekakor potrjuje, da je odločitev za betonsko vozišče trajnostna izbira. Pri tem ne gre spregledati dejstva, da je večina prednosti vsaj posredno, če že ne neposredno, povezana z daljšo življenjsko dobo, ki jo betonska vozišča izkazujejo v primerjavi z asfaltnimi. V tujini (na primer Avstriji) imajo tako za betonska vozišča predpisano 30-letno plansko dobo, kar je v primerjavi z asfaltnimi vozišči 10 let več. To se upošteva tudi v analizah, kot sta LCA in LCCA, s čimer lahko pridobimo realne rezultate, na podlagi katerih se odločimo, kater tip vozišča je za izbrano situacijo primernejši.

V Republiki Sloveniji (RS) zakonodaja v desetem členu Pravilnika o projektiranju cest predpisuje sledeče, navajam: »Doba trajanja voziščne konstrukcije z asfaltno ali s cementno betonsko krovno plastjo je 20 let, za vozišča za začasno uporabo pa najmanj pet let« (Pravilnik o projektiranju cest, 2005). Glede na predstavljene karakteristike betonskih vozišč menimo, da bi bilo smiselno slediti vzoru držav, ki imajo na področju gradnje betonskih vozišč več izkušenj in plansko dobo betonskih vozišč povišati na 30 let. Pri tem je seveda potrebna določena mera previdnosti. Planska doba vozišča je namreč odvisna od več dejavnikov, med katerimi prevladujejo konstrukcijski pogoji ter materialne zahteve. V nadaljevanju naloge bomo tako primerjali zahteve na področju dimenzioniranja betonske voziščne konstrukcije ter zahteve na področju priprave ustrezne betonske mešanice, ki veljajo v RS, z zahtevami v tujini. Na ta način bomo lahko podali mnenje, ali je povišanje planske dobe betonskih vozišč na 30 let v RS možno glede na trenutno veljavne standarde, oziroma podali mnenje o potrebnem povišanju posameznih kriterijev, da bi le-to bilo mogoče.

3 GRADBENE TER KONSTRUKCIJSKE OSNOVE BETONSKIH VOZIŠČ

Cementnobetonske (v nadaljevanju betonske) krovne plasti so zgrajene kot vrhnji del voziščnih konstrukcij na primerni podlagi iz vezanih in/ali nevezanih nosilnih plasti ter posteljice. V celoti izpolnjujejo funkcijo obrabnih plasti in v celoti ali delno tudi funkcijo vezanih zgornjih nosilnih plasti (TSC 06.420:2003). Opis posameznih plasti betonske voziščne konstrukcije je viden na spodnji sliki.



Slika 3.1: Tipični prezek ceste s krovno plastjo iz cementnega betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 36)

Cesta v prerezu sestoji praviloma iz temeljne, nosilne in krovne konstrukcije. Temeljna konstrukcija se začne s temeljnimi tlemi, katera je treba pred gradnjo ustrezno pripraviti in utrditi. Neposredno nad temeljnimi tlemi sta nasip ter izboljšana zaključna plast nasipa, tako imenovana posteljica. Namen posteljice je zagotoviti primerno in trajno nosilnost podlage in zaščititi vgrajene materiale pred škodljivimi učinki mraza. V primeru, da cesta poteka v vkopu, nasip ni potreben, posteljico pa nadomestijo izboljšana temeljna tla.

Na tako pripravljene podlagi lahko začnemo z gradnjo voziščne konstrukcije, ki se začne z nevezano nosilno plastjo, katere glavna naloga je zagotavljanje ustrezne trajne nosilnosti ter zaščita vgrajenih materialov pred škodljivim učinkom zmrzovanja. Zaradi tega je zaželena vgradnja zmesi zrn, katerih sestava je čim bolj grobozrnata, in v celoti iz drobljenih zrn, v debelini do 40 cm. Groba zrna namreč preprečujejo kapilarni dvig vode in s tem nastanek ledenih leč, ki se odražajo kot zmrzlini dvižki na voziščih. Zgornja nosilna plast je v primeru betonskih vozišč lahko izvedena kot vezana ali nevezana nosilna plast, odvisno od tipa gradnje. Naloga te plasti je raznos prometnih obremenitev in zagotavljanje zmanjšanja učinka mraza na materiale v cestnem telesu in v temeljnih tleh. Kot neposredno podlago za betonsko krovno plast v primeru večjih prometnih obremenitev vgradimo plast bituminizirane zmesi (bituminiziran drobljenec ali prodec).

Krovno plast betonske voziščne konstrukcije predstavlja betonska plošča, ki je lahko iz ene ali dveh plasti betona. V primeru dveh plasti betona predstavlja zgornja plast tako imenovano obrabno plast. Naloga krovne plasti voziščne konstrukcije je prevzem horizontalne sile med vozilom in voziščem, zagotavljanje ustrezne tornosti in ravnosti vozne površine, ki igrata pomembno vlogo za varno in udobno vožnjo, ter zaščita cestnega telesa pred padavinami in drugimi vremenskimi vplivi. Z vidika čim bolj ugodne porazdelitve prometnih obremenitev na temeljna tla, bi bile najugodnejše plošče čim večjih dimenzij. Vendar se, zaradi krčenja ter temperaturnih sprememb, v betonski plošči z oviranimi deformacijami pojavijo napetosti, katerih posledica je oblikovanje razpok zaradi presežene natezne trdnosti betona. Zato je treba omejiti dimenzije plošč. Izbrane dimenzije plošč namreč bistveno vplivajo na velikost nastalih napetosti, ki se pojavijo med samo fazo strjevanja betona in kasneje v fazi uporabe, zato jih je treba skrbno načrtovati (Blab et al., 2012).

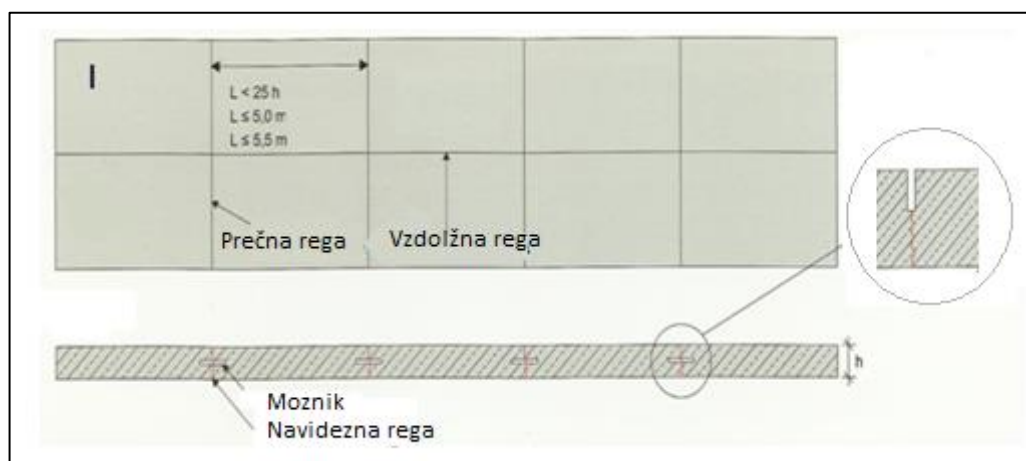
3.1 Sistemi betonskih voziščnih konstrukcij

Da bi se izognili nastanku škodljivih nateznih napetosti v betonski plošči oziroma jih kar čim bolj omejili, lahko s konstrukcijskega vidika voziščno konstrukcijo izvedemo na štiri različne načine, in sicer kot:

- stikovano nearmirano betonsko vozišče z mozničenimi ali nemozničenimi regami,
- stikovano armirano betonsko vozišče z mozničenimi ali nemozničenimi regami,
- neprekinjeno armirano betonsko vozišče ali
- prednapeto betonsko vozišče.

3.1.1 Stikovana nearmirana betonska vozišča z mozničenimi ali nemozničenimi regami

Stikovano nearmirano betonsko vozišče je tip betonskega vozišča, kjer je krovna nearmirana betonska plast z vzdolžnimi in s prečnimi regami razdeljena na posamezna polja oziroma plošče. Rege so pri tem razporejene na največji razdalji, pri kateri v betonski plošči še ne prihaja do vmesnih razpok. Dolžina betonske plošče predstavlja razdaljo med eno in drugo prečno rego, širina plošče pa razdaljo od roba vozišča pa do prve vzdolžne rege oziroma razdaljo med vzdolžnimi regami v primeru večpasovnega vozišča. Debelino betonske plošče je treba določiti ob upoštevanju konstrukcijskih ter gospodarskih kazalcev.



Slika 3.2: Tloris in prerez stikovanega nearmiranega betonskega vozišča z mozničenimi regami (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 37)

Da se prepreči nastanek razpok, ki so posledica krčenja betona po izdelavi (predvsem zaradi ohlajanja plošče ter izhlapevanja vode, ko sredstvo proti izhlapevanju neha delovati), prečne rege praviloma izvajamo na razdalji, ki ni večja od 25-kratnika debeline betonske plošče. Avstrijske smernice podajajo še dodatne omejitve, in sicer sme največja dolžina plošče znašati 5 m v primeru prometne obremenitve razredov S ter I (po RVS 08.17.02) oziroma 5,5 m za ostale razrede (avstrijski razredi merodajne prometne obremenitve so predstavljeni v poglavju 4.5). Zaradi potrebe po omejevanju nateznih napetosti, ki nastajajo v betonu zaradi neenakomernega segrevanja kot vpliv zunanjih temperatur, naj dolžina plošče ne bi presegala 1,5-kratnika širine betonske plošče. Vseeno pa so najbolj priporočljive kvadratne oblike plošč, ki imajo tudi najvišjo nosilnost. Vzdolžne rege se ne smejo nahajati v območju kolesnic, praviloma pa morajo biti usklajene z vzdolžnimi talnimi označbami (TSC 06.420, 2003).

Evropsko združenje za betonska vozišča (EUPAVE) predpisuje nekoliko drugačne dimenzije, in sicer (Rens, 2013):

- Maksimalna razdalja med (navideznimi) regami pri debelini plošče ≥ 25 cm ne sme presegati 6 m. Pri debelini plošče med 20 in 25 cm naj razdalja ne bo večja od 5 m, pri debelini plošče < 20 cm pa 4 m. Armirane plošče so lahko 25-50 % daljše, odvisno od količine uporabljene armature.
- Maksimalna širina plošč mora biti omejena na 5 m.
- Pri nearmiranem betonskem vozišču površina plošče ne sme presegati 30 m^2 .

Če zgornjih kriterijev ni mogoče zagotoviti ali pa so plošče nepravilnih oblik s koti, manjšimi od 75° (na primer v območjih križišč), je treba plošče armirati z armaturnimi mrežami (tip Q524) ali mikro armaturo. Pri tem znaša običajno doziranje jeklenih vlaken med 30 in 50 kg/m^3 betona. Poleg nosilnosti jeklena vlakna izboljšajo tudi stanje vozišča v primeru pojava razpok, saj kontrolirajo velikost razpok in preprečujejo njihovo nadaljnje širjenje zaradi višje upogibne trdnosti betona. Pri uporabi mikro

armature moramo posvetiti pozornost izbiri kvalitete in oblike vlaken, saj ti dve karakteristiki najbolj vplivata na dosego želenega učinka armiranja.

Da preprečimo razmikanja plošč in zagotovimo ustrezen prenos prometnih obremenitev med ploščami, je treba vse vzdolžne stike sidrati. Pri prečnih stikih obstajata dva načina za prenos obremenitev med ploščami, in sicer:

- preko mehanizma zaklinjanja zrn agregata v regi ter
- preko vgrajenih moznikov.



Slika 3.3: Prikaz preloma betonske plošče na mestu navidezne rege (Vir: <http://www.pavementinteractive.org/article/joint-design/>)

Mehanizem zaklinjanja zrn agregata v regi (slika 3.3) deluje na osnovi trenja med dvema robovoma počene betonske plošče. Razpoko v betonu izzovemo s pomočjo navidezne rege. Približno 6 do 24 ur po končani gradnji zarežemo zgornji del betonske plošče z diamantno žago v globini $1/4$ do $1/3$ debeline plošče. Ko se ponoči beton ohladi in skrči, počni po celotni debelini. Razpoka poteka praviloma po tako imenovanem stičnem območju betona, tik poleg zrn agregata, zato omogoča uspešno zaklinjanje agregata. Tak mehanizem prenosa obtežbe je primeren za lažje prometne obremenitve. Če pride namreč do razmikanja med ploščami ali pa izpadanja oziroma odpovedi agregata zaradi previsokih obremenitev, mehanizem izgubi svojo funkcijo in prenos obremenitev med ploščami ni več mogoč. Zato je v primeru večjih prometnih obremenitev za prenos le-teh in za ohranitev enake višine (ravnosti na območju stikov) betonske krovne plasti potrebno vgraditi moznike. Avstrijske smernice narekujejo vgradnjo moznikov za razrede prometne obremenitve S ter I do III, medtem ko slovenske TSC (TSC 06.420, 2003) priporočajo vgradnjo moznikov neglede na razred merodajne prometne obremenitve.

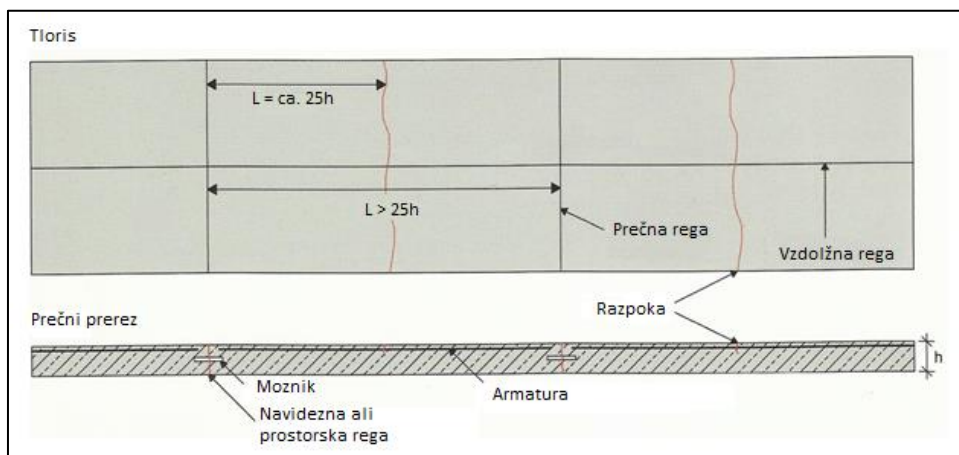
Stikovano nearmirano betonsko vozišče z mozničenimi ali nemozničenimi regami predstavlja standardni način gradnje tako v Sloveniji kot tudi v Avstriji, kar je upoštevano tudi v gradbenih ter konstrukcijskih osnovah, ki so predstavljene v nadaljevanju.

3.1.2 Stikovana armirana betonska vozišča z mozničenimi ali nemozničenimi regami

Če želimo doseči daljše razdalje med prečnimi dilatacijami, je treba betonsko ploščo armirati z armaturnimi mrežami ali armaturnimi palicami. Armatura se razvrsti in njena količina se izbere tako, da je pri izbrani razdalji med prečnimi dilatacijami širina razpok, ki se oblikujejo, omejena. Na račun kontroliranja razpok z armaturo se lahko razdalja med prečnimi dilatacijami poveča, medtem ko zmanjšanje debeline plošče v primerjavi s stikovanimi nearmiranimi ploščami ni mogoče. Armatura (armiranje je relativno šibko) leži praviloma v nevtralni osi betonskega prereza, s čimer ne prispeva k povišanju natezne nosilnosti betonske plošče. Dolžine plošč, ki naj bi jih omogočalo tako armiranje, naj bi znašale 10-25 m, čeprav je moč najti v različni literaturi različne navedbe glede dolžin plošč. Literatura v ZDA tako navaja, da naj bi dolžina plošč znašala 7,5-9 m in nikakor ne več kot 15 m, čeprav so v praksi uspešno izvajali tudi plošče dolžine do 30 m (Delatte, 2008).

Količina potrebne armature praviloma znaša 0,1-0,25 % betonskega prereza v vzdolžni smeri, pri čemer je v prečni smeri potrebne manj armature. Ker so dolžine plošč v primerjavi z nearmiranimi vozišči večje, se zaradi toplotnega delovanja plošče tvorijo večje razpoke na mestu dilatacij oziroma reg. Zato je potrebno prečne navidezne rege (glej poglavje 3.3) obvezno mozničiti. V primeru plošč, ki so daljše od 10 m, pa je glede na avstrijske smernice potrebno vsako tretjo navidezno rego izvesti kot prostorsko rego. Kljub temu velja, da je obnašanje stikov slabše, zaradi večjih pomikov v primerjavi z nearmiranimi stikovanimi ploščami (Blab et al., 2012).

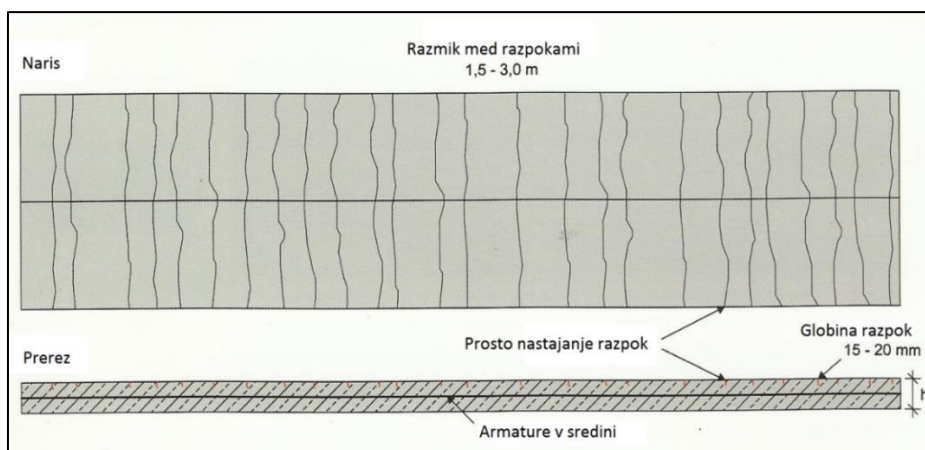
Ta način izvedbe betonskega vozišča se v praksi redko uporablja in se izvaja predvsem v primeru, kadar se pokaže potreba po daljših razdaljah med regami, to je kadar so temeljna tla slaba. V tem primeru je možno z daljšimi ploščami in večjo togostjo doseči ugodnejšo porazdelitev prometne obremenitve na temeljna tla. Gledano s stroškovnega in funkcionalnega vidika, manjše število navideznih reg ne odtehta cene potrebne armature in slabšega obnašanja reg.



Slika 3.4: Tloris in prerez stikovane armiranega betonskega vozišča z mozničenimi regami (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 38)

3.1.3 Nprekinjeno armirana betonska vozišča

Pri neprekinjeno armiranem betonskem vozišču se za kontrolo velikosti razpok uporabi armatura, ki poteka neprekinjeno po celotni dolžini konstrukcije in je višinsko položena malenkost nad polovico debeline krovne plasti voziščne konstrukcije. Količina armature mora biti določena tako, da pride do pojava razpok na razdalji 1,5-3,0 m, pri čemer razpoke niso širše od 0,5 mm ter globlje od 15-20 mm. Za izpolnitev teh pogojev običajno zadostuje delež armature med 0,5 ter 0,7 % betonskega prereza. Sama armatura, kljub temu, da je njena funkcija v splošnem ojačitev prerezov, tudi tukaj neposredno ni konstrukcijsko aktivna. Izvedba neprekinjeno armiranega betonskega vozišča je izmed vseh tehnik najdražja, vendar zagotavlja najbolj udobno vožnjo (zaradi odsotnosti dilatacij) in najdaljšo življenjsko dobo vozišča.



Slika 3.5: Tloris in prerez neprekinjeno armiranega betonskega vozišča (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 38)

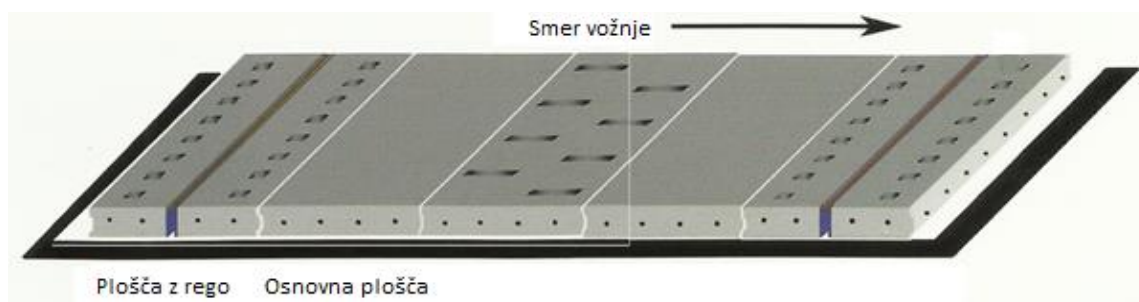
Neprekinjeno armirani betonsko-voziščni sistemi se tradicionalno uporabljajo v ZDA ter Belgiji. Za doseganje ustrezne razdalje med razpokami v Belgiji uporabljajo delež vzdolžne armature med 0,72 in 0,76 % prereza plošče. Mehanizem delovanja neprekinjeno armiranih plošč nekoliko drugače razumejo v ZDA, kjer se predvideva, da razpoke, ki se pojavijo na razdalji 0,6-2 m, potekajo po celotni debelini betonske plošče, za njihovo kontrolo pa skrbi armatura v deležu med 0,4-0,8 %. Armatura zagotavlja, da so razpoke dovolj ozke, da se obremenitev uspešno prenaša preko mehanizma zaklinjanja agregata (ACPA's Concrete Pavement Wiki, b.d.).



Slika 3.6: Prikaz položaja armature za izvedbo neprekinjeno armiranega betonskega vozišča (Vir: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/05081/chapt2.cfm>)

3.1.4 Prednapeta betonska vozišča

Betonske vozne površine s prednapeto armaturo predstavljajo poseben način gradnje in so bile kot take do sedaj izvedene le v obliki testnih polj. Slika 3.7 shematsko prikazuje primer vzdolžnega prednapetega vozišča, ki je bilo izvedeno v Indiani v ZDA. Posamezne plošče se dostavijo na gradbišče kot montažni elementi in se na gradbišču montirajo. Prednapete betonske plošče omogočajo izrazito zmanjšanje debeline betonske plošče ter časa gradnje, vendar s sorazmerno višjimi stroški izdelave.



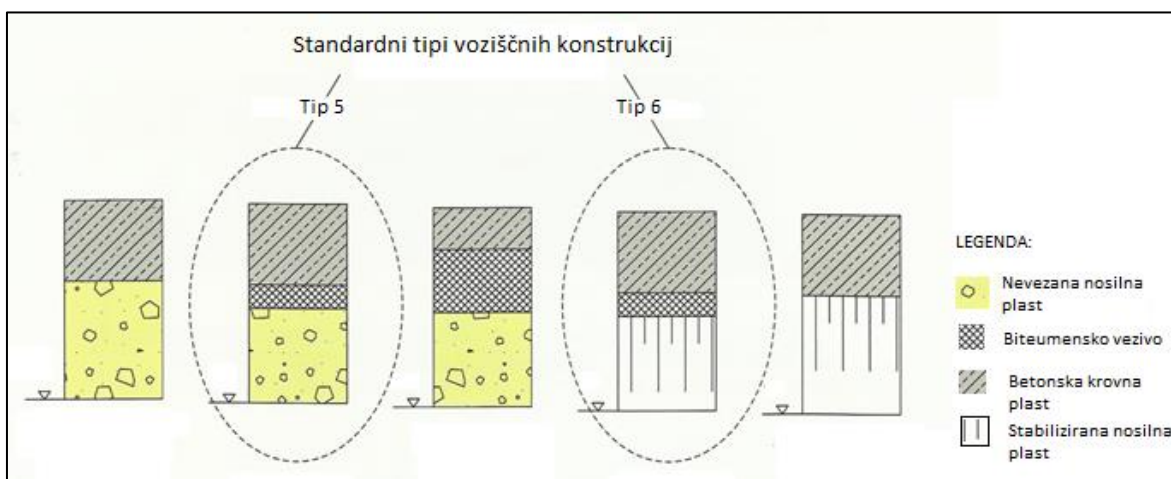
Slika 3.7: Shematski prikaz prednapetega betonskega vozišča (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 39)

3.2 Tipi betonskih voziščnih konstrukcij

Type voziščnih konstrukcij ločimo glede na to, na kakšni podlagi je izvedena betonska krovna plast, in sicer na:

- nevezani nosilni plasti,
- vmesni vezani nosilni plasti iz bitumenskega veziva in nevezani ali stabilizirani nosilni plasti ter
- stabilizirani nosilni plasti (brez ali z vmesnim geosintetikom).

Omenjenim plastem kot podlaga služi spodnja nevezana nosilna plast. V Avstriji sta po RVS 03.08.63 v uporabi dva tipa gradnje, in sicer na nevezani ali stabilizirani (s cementom) plasti s 5 cm debelo vmesno bitumensko nosilno plastjo (tipa 5 in 6 na sliki 3.8). Tip 5 je kot tipična sestava betonske voziščne konstrukcije predlagan tudi v RS (TSC 06.420, 2003).



Slika 3.8: Prikaz standardnih tipov voziščnih konstrukcij v Avstriji (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 39)

Betonsko krovno plast lahko izvedemo v enem ali dveh slojih. Pri enoslojnih krovnih plasteh se celotna krovna plast izvede iz istega betona v enotni debelini. Pri tem mora beton odgovarjati zahtevam,

predpisanim za obrabno plast, in posledično so zahteve postavljene višje (zahteve glede agregata, por, sestave, trdnosti itd.). Zaradi ekonomskega vidika, je uporaba enoslojnih vozišč omejena na krajše tunnelske odseke ter na prometne površine z manj ostrimi zahtevami za zgornji beton, kakršni so podeželske ceste, poti ali parkirni prostori.

Pri dvoslojnem načinu gradnje krovne betonske plasti so zahteve za zgornji in spodnji beton različne, izvede se ju ločeno in tudi ločeno vibrira. Zgornjo plast je treba položiti in vibrirati, še preden se spodnja plast izsuši ali začne strjevati. Posebno pozornost je treba posvetiti vibriranju zgornje plasti betona. Preprečiti moramo nedopustno akumulacijo finih delov na površini vozišča. Zato je potrebno stalno nadzorovati in preverjati tako sestavo ter konsistenco betona glede na izbrani tip gradnje, pa tudi frekvenco in amplitudo pervibratorjev. Minimalna debelina zgornje (obrabne) betonske plasti je v Avstriji določena v odvisnosti od premera največjega zrna agregata v betonski mešanici (preglednica 3.1).

Preglednica 3.1: Izbira debeline obrabnega sloja betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 40)

| Maksimalno zrno agregata (mm) | Minimalna debelina obrabnega sloja betona (cm) |
|----------------------------------|--|
| 16 | 5,0 |
| 22 | 6,0 |
| 8 (izpostavljena zrna agregata) | 4,0 |
| 11 (izpostavljena zrna agregata) | |

TSC 06.420 (2003) v Sloveniji predpisujejo, da mora biti vsak sloj betona debel najmanj 5 cm, pri čemer mora biti na cestah s srednjo in težko prometno obremenitvijo obrabna plast betona debela najmanj 7 cm.

3.3 Rege

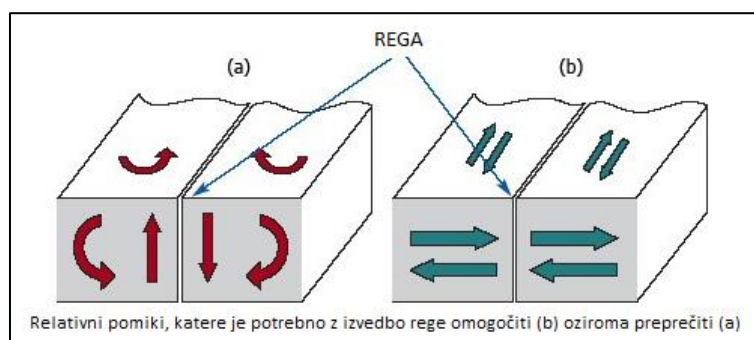
Tako pri nearmiranih kot pri armiranih betonskih voziščnih konstrukcijah se poslužujemo izvedbe različnih tipov dilatacijskih reg, s katerimi preprečujemo nastanek nekontroliranih razpok, dovoljujemo izravnavo sprememb dolžine zaradi vplivov temperature ter ščitimo občestne objekte pred vplivi voziščne konstrukcije. Obnašanje betonskega vozišča je namreč močno odvisno od kvalitetne izvedbe reg, saj je večino poškodb stikovanih betonskih vozišč moč pripisati prav odpovedi reg.

Poznamo naslednje vrste reg:

- navidezne rege (Scheinfuge, Contraction joint, Control joints),
- pritisnjene/delovne (Pressfuge, Construction joints),
- zaključne in priključne rege (An- und Abschlussfuge),

- prostorske rege (Raumfuge, Expansion joints) in
- ločilne/izolacijske rege (Trennfuge, Isolation joints).

Avstrijske smernice predpisujejo izvedbo betonskih vozišč s prečnimi in z vzdolžnimi navideznimi regami ter praktično brez prostorskih reg. Kljub temu je treba območja z različno nosilnimi podlagami vseeno medsebojno ločiti s prostorskimi regami. Razen v primeru nizkih prometnih obremenitev (razredi IV do VI), je potrebno prečne navidezne rege možničiti ter vzdolžne navidezne rege sidrati. Rege je treba izvesti tako, da se ohrani ravnost tako v prečni kot tudi vzdolžni smeri vozišča in da ostane beton na stikih med posameznimi ploščami nepoškodovan. Rege je treba izvesti točno nad sredino vgrajenega moznika ter paziti, da dovoljena dimenzija polja ni presežena in da so vzdolžni in prečni stiki med seboj pravokotni. Posebno ozkim in ostrorobim ploščam s kotom med regami, manjšim od 60° , se je potrebno izogibati oziroma jih je treba ojačati, če se jim ne da izogniti.



Slika 3.9: Prikaz napetosti v betonski plošči (Vir: <http://theconstructor.org/concrete/joints-in-concrete-structures/970/>)

Slika 3.9 prikazuje pomike in zasuke v betonskem vozišču, katere moramo z izvedbo reg dovoliti oziroma preprečiti. Betonski plošči moramo omogočiti, da se lahko prosto širi oziroma krči v horizontalni smeri, da ne prihaja do tlačnih ali nateznih napetosti. Z mozniki in sidri, ki jih vgradimo v ploščo, pa je treba preprečiti vertikalne pomike plošče oziroma kakršnekoli višinske razlike med sosednjima ploščama, do katerih bi lahko prišlo zaradi poseda ali vihanja robov plošč.

3.3.1 Navidezne rege

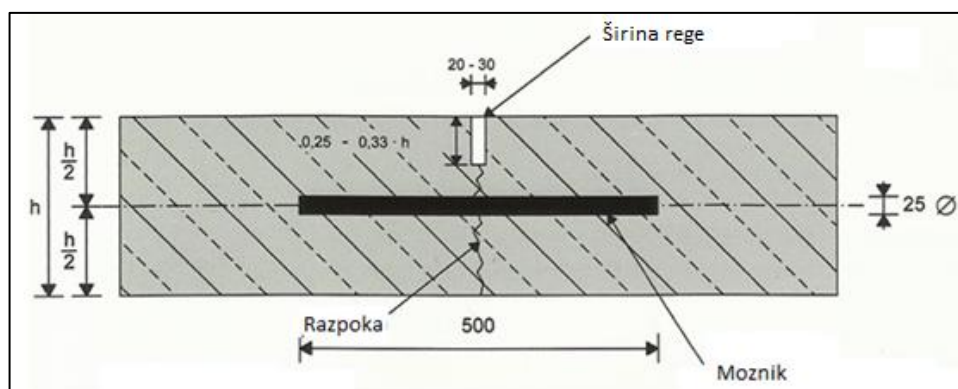
Namen izvedbe navideznih reg je kontrola razpok, ki nastajajo zaradi nateznih in upogibnih napetosti, ki so posledica krčenja betona med strjevanjem, prometnih obremenitev in vplivov okolja. Navidezna rega se izvede tako, da se še mlad beton zareže zgolj nekaj centimetrov v globino. Ko se nato beton ponoči ohladi, betonska plošča počni na mestu zareze po celotni debelini. Navidezne rege so torej mesta, na katerih nastane kontrolirana razpoka betona.

Zarez rege

Širina zarez, ki se izvede z diamantno žago, znaša 2,0-3,5 mm. Globina zarez je odvisna od debeline betonske plošče in znaša pri prečnih regah 1/4 do 1/3 debeline plošče ter pri vzdolžnih regah 1/3 debeline plošče. S tem se po eni strani zagotovi, da plošča na mestu rege počne po celotni debelini, po drugi strani pa, da ne pride do prevelikih notranjih tlačnih napetosti zaradi segrevanja betona poleti, in sicer zaradi povečanja dimenzij plošče v območju stika. Bolj globok zarez pri vzdolžnih regah je potreben, ker le-te praviloma ne ležijo na sredini vozišč. Zaradi nesimetrije obstaja pri večji širini vozišča nevarnost tvorjenja nekontroliranih razpok.

Preglednica 3.2: Globine zarez v odvisnosti od debeline betonske krovne plasti (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 41)

| Debelina betonske plošče (cm) | Globina zarez (mm) | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Prečne rege | Vzdolžne rege |
| 16 do 18 | 45 | 60 |
| 18 do 24 | 60 | 80 |
| 24 do 30 | 75 | 100 |
| Ostale debeline plošče | vsaj 25% debeline plošče | vsaj 33% debeline plošče |



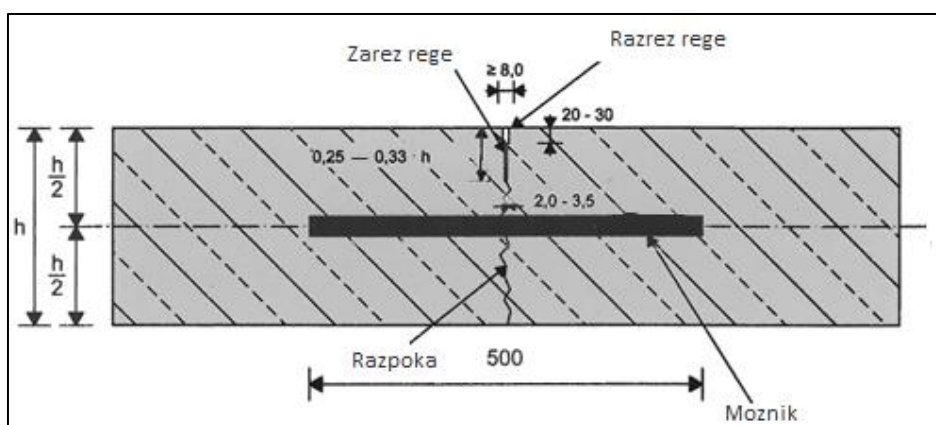
Slika 3.10: Prikaz mozničene netesnjene navidezne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 42)

Slika 3.10 prikazuje mozničeno, netesnjeno navidezno rego. Rego je treba izvesti nad sredino vgrajenega moznika (odstopanje sme znašati največ ± 3 cm), praviloma 6-24 ur po betoniranju, odvisno od številnih vplivov, kot so temperatura svežega betona, temperatura okolice, moč vetra itd. Čas moramo namreč izbrati tako, da je beton že dovolj trden, da med samim rezanjem ne prihaja do poškodb robov betonske plošče, istočasno pa dovolj zgodaj, da se v betonski plošči še ne pojavijo razpoke zaradi napetosti, ki so posledica krčenja betona med sušenjem. Pri tem je treba upoštevati tudi izkušnje ekipe gradbiščnih delavcev in izvesti predhodne poizkuse rezanja za natančno določitev časa. Med rezanjem je potrebno ostanke rezanja sproti posesati. Pri betonskih površinah, izvedenih po metodi izpostavljenih zrn

agregata, se izrez dilatacij izvede po končni obdelavi površine. V posebnih primerih, posebej pri izvedbi z manjšimi stroji ali pri bolj plastičnih betonskih mešanica, je dovoljeno izvesti rege tudi z vstavljanjem posebne dilatacijske letve. V svež beton položene dilatacijske letve je dovoljeno odstraniti šele, ko je beton zadosti strjen, nastale dilatacije pa je treba ustrezno zatesniti.

Razrez rege

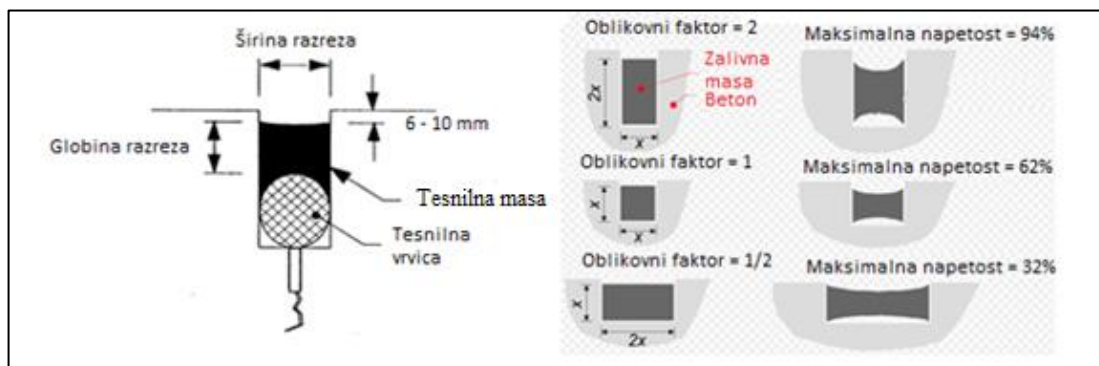
V primeru, ko je betonsko vozišče izpostavljeno visokim prometnim obremenitvam, je treba rege ustrezno zatesniti. V Avstriji na primer smernice predpisujejo zatesnitev reg, ki so izpostavljene prometnim obremenitvam razredov S, I in II (RVS 03.08.63). V primeru, ko je načrtovana zatesnitev navideznih reg, je treba zareze razširiti, izvede se tako imenovani razrez rege. Do nastanka razpoke in s tem preloma plošče po celotni debelini na mestu rege mora priti v vsakem primeru še preden se izvede razrez. Širina razreza mora znašati vsaj 8 mm, globina razreza pa 20-30 mm, odvisno od vrste polnila. Zatesnitev lahko izvedemo s posebnim tesnilnim profilom za rege ali pa z zalivom rege s tesnilnimi masami. Za zaščito proti mehanskim poškodbam je pri razrezu prečne rege potrebno rob na zgornji površini vozišča posneti z ustreznim strojem. Rob se posname pod kotom 45°, pri čemer naj širina posnetega roba v tlorisu znaša 3 ± 1 mm. Na visoko rangiranih cestah, kot so avtoceste in hitre ceste, se prečne rege praviloma zatesnijo s tesnilni profili, vzdolžne rege pa se praviloma zalijejo s tesnilnimi masami. Na ta način je morebitna potrebna kasnejša sanacija bolj obremenjenih prečnih reg enostavnejša in hitrejša.



Slika 3.11: Prikaz izvedbe zatesnjene mozničene navidezne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 42)

Posamezne države posvečajo širini, globini in obliki razreza zelo veliko pozornost, predvsem v primeru uporabe tesnilnih mas. Oblika, to sta širina in globina razreza, ima namreč velik vpliv na obstojnost tesnilne mase in velikost napetosti, ki delujejo na maso. V literaturi ZDA je mogoče zaslediti priporočila, da naj oblikovni faktor oblike razreza znaša 1 ali manj. Oblikovni faktor razreza predstavlja razmerje med globino in širino razreza in večji kot je, večje so napetosti, ki delujejo na tesnilno maso. Pri tem

proizvajalci tesnilnih mas priporočajo za določitev dimenzij razreza izračun pomikov v območju spoja, s čimer zagotovimo optimalno delovanje mase (ACPA's Concrete Pavement Wiki, b.d.).



Slika 3.12: Prikaz tesnjenja in oblike razreza (prirejeno po Vir: http://wikipave.org/index.php?title=Joint_Sealing)

Tehnične specifikacije za ceste (TSC 06.420, 2003) v Sloveniji navajajo, da se izmere razreza določijo tako, da se izmeri širina razpoke v krovni plasti pod zarezo na najmanj 7 dni starem betonu, zjutraj in neposredno pred izvajanjem razreza. V primeru uporabe elastičnih materialov za tesnitev navideznih reg morajo biti izmere reg in značilnosti materiala za tesnitev usklajene. Upoštevanje teh vrednosti je vsekakor smiselno, saj večja, kot je razpoka, večje so praviloma dimenzije plošče. Zaradi večjih dimenzije plošč prihaja do večjih pomikov plošče. Posledično so potrebne večje dimenzije razrezov, saj bi bile v nasprotnem primeru napetosti na tesnilno maso prevelike in bi prihajalo do poškodb le-te. Glede na to, da je potrebno pri tesnjenju reg uporabiti tesnilne vrvice, znašajo oblikovni faktorji specifičnih dimenzij približno ena, kar ustreza navedbam v literaturi ZDA.

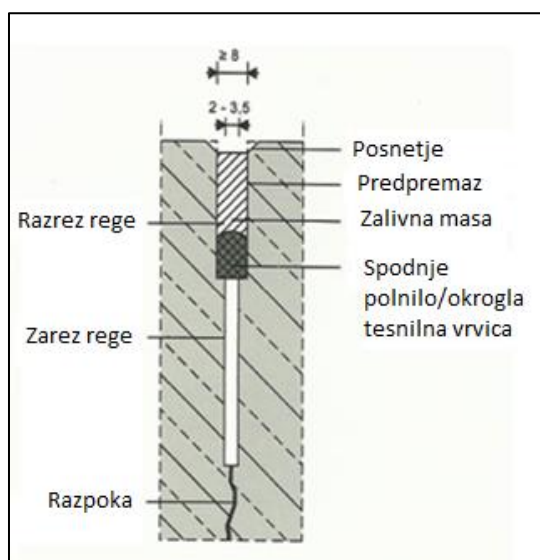
| Vrsta navidezne rege | Širina razpoke pod zarezo (mm) | Izmere razreza (rege) | |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------|
| | | globina (mm) | širina (mm) |
| - prečna | do 1 | 25 | 8 |
| | 1 do 2 | 30 | 12 |
| | nad 2 | 35 | 15 |
| - vzdolžna | - | 15 | 6 |

Slika 3.13: Določitev izmer razreza v odvisnosti od širine razpoke pod zarezo (TSC 06.420, 2003)

Tesnjenje reg

Glede na avstrijske smernice znaša globina razreza, pri uporabi tesnilnih polnil (običajno na bitumenski osnovi) pri vzdolžnih regah 20 mm in pri prečnih regah 30 mm. Da se zagotovi maksimalna sprijemna trdnost materiala za tesnjenje in betona, se suhe in očiščene stranice reg najprej premaže s posebnim premazom. Pred zapolnitvijo s trajno elastičnimi tesnilnimi masami se v razrez vstavi še okroglo tesnilno vrstico iz poliuretanske ali polietilenske ekstrudirane pene zaprte celične strukture. S tem preprečimo

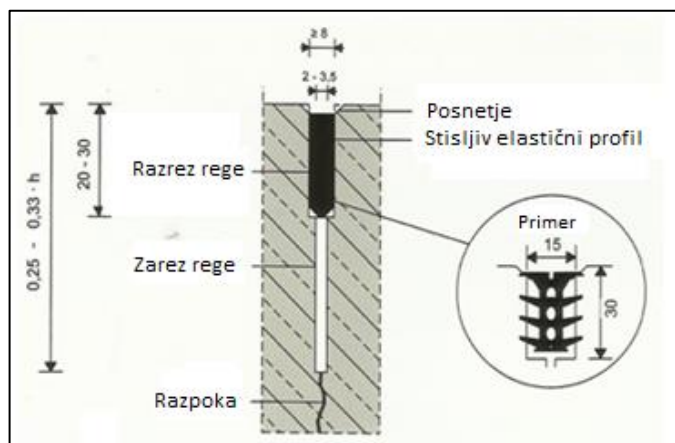
prodiranje tesnilnega materiala v zarezo in naprej v razpoko ter zagotovimo enakomerno zatesnitev. Premer okrogle tesnilne vrvice mora biti za ustrezno delovanje nekaj milimetrov večji od širine razreza. Pri tesnjenju je treba paziti, da tesnilna masa pri letnih temperaturah ne sega iznad nivoja vozišča, v hladnem vremenu mora biti površina tesnila rahlo vbočena. Če je rega posneta, zapolnitev le-te ne sme biti višja od spodnjega roba posnetja (slika 3.14).



Slika 3.14: Prikaz tesnjenja rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 43)

Profili (vložki) za tesnjenje reg

Profili za tesnjenje reg morajo biti narejeni iz elastičnih, deformabilnih in trajno obstojnih materialov, ki ne vpijajo vode. Izvedba razreza mora biti opravljena v skladu s tehničnimi podatki proizvajalca profilov in z dimenzijami, prikazanimi na sliki 3.15. Vgrajevanje profilov je za razliko od tesnjenja reg možno v praktično vseh vremenskih pogojih, razen pozimi, ko so robovi reg lahko pomrznjeni. V primeru uporabe profilov tudi ne potrebujemo nobenih tesnilnih vložkov ter premazov. Pomembno je, da profili potekajo kontinuirano preko celotne dolžine navidezne rege (stikanje profilov ni dovoljeno) ter se pri polaganju ne zasukajo.

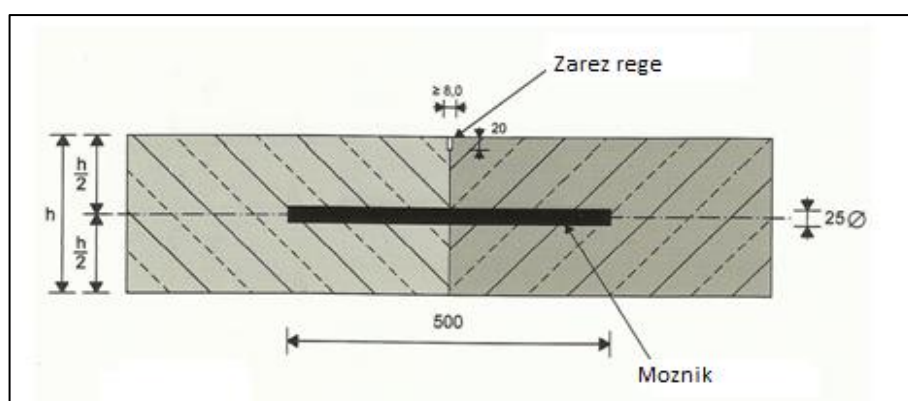


Slika 3.15: Prikaz zatesnitve rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 44)

Profili in tesnilne mase morajo preprečiti zapolnjevanje reg z umazanijo in s peskom za posipanje, saj v nasprotnem primeru lahko pride v zgornjem delu plošče do nekontroliranih napetosti.

3.3.2 Pritisnjene rege

Pritisnjene rege izvajamo pri dobetoniranju polj betonskega vozišča na obstoječa polja. Vzdolžne pritisnjene rege je treba sidrati, prečne tlačne rege pa za zagotovitev prenosa prečnih sil na obstoječe vozišče mozničiti. Sidra in mozniki se vstavljajo s posebnim horizontalnim vrtalnim strojem. Po izgradnji novega dela vozišča se v zgornjem delu pritisnjene rege izvede fugirni utor globine 20 mm ter širine minimalno 8 mm in primerno zatesni.



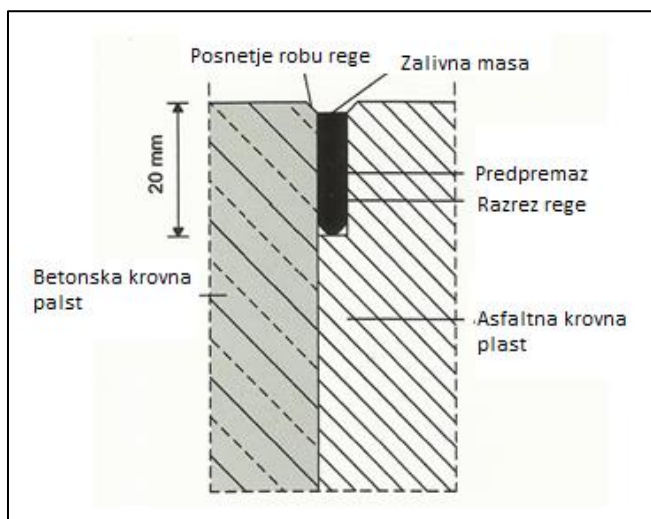
Slika 3.16: Prikaz izvedbe pritisnjene rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 44)

3.3.3 Zaključne in priključne rege

Zaključne rege so prečne rege, ki med izvajanjem betonskega vozišča nastanejo na koncu dneva oziroma ko puščamo prosta polja. Zaključne rege se konstruktivno izvedejo enako kot pritisnjene, kar pomeni, da je potrebno izvedena dneva polja pred nadaljnjim betoniranjem mozničiti. Moznike lahko vstavimo

tako, da jih strojno uvrstimo v strjen beton, ali pa predhodno vgradimo nestisljiv tulec, v katerega se nato vstavi moznik.

Priključna rega je posebni primer pritisnjene rege in predstavlja prehod med betonsko ploščo in asfaltno površino. Priključnih reg ni mogoče sidrati ali moznčiti. Obravnavamo jih kot prosti zaključek plošče. Nosilnost prostega zaključka plošče je v primerjavi z mozničeno ploščo manjša za približno 50 %, zato je potrebno računati s polovično življenjsko dobo. Za zagotovitev zadostne nosilnosti mora biti zaključni del plošče v področju priključitve debelejši za vsaj 3 cm. Če to ni možno, je potrebno zaključek polja armirati z minimalno 10 kg/m^2 armature na zgornji in spodnji strani plošče (pri čemer minimalni zaščitni sloj betona znaša 5 cm). Končna polja morajo biti kvadratne oblike, ker je to najugodnejše z vidika nosilnosti. Po izvedbi obeh voziščnih konstrukcij je potrebno v asfaltno konstrukcijo vrezati 8-12 mm široko in 20 mm globoko rego, jo očistiti in zapolniti z bitumensko tesnilno maso. Izvedba priključne rege je predstavljena na sliki 3.17.



Slika 3.17: Prikaz izvedbe priključne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 46)

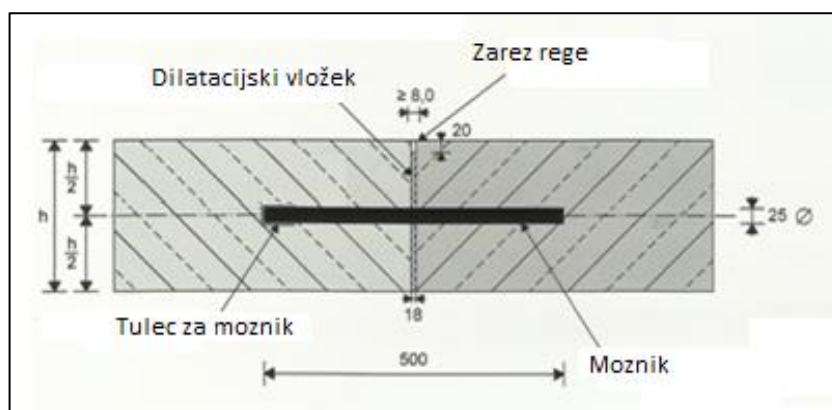
3.3.4 Prostorske rege

Prostorske rege ločujejo posamezne plošče betonskega vozišča med seboj in od objektov v krovni plasti ali ob njej v vsej debelini krovne plasti. S tem je omogočeno raztezanje betonske plošče brez nastanka poškodb. Negativni vidik gradnje s prostorskimi regami je, da pomiki, ki nastajajo ob močnem segrevanju plošče, povzročijo spremenjene pogoje opore plošče in upogibne napetosti na koncih plošče. Izvedbi prostorskih reg se tako pri nearmiranih betonskih ploščah v osnovi izogibamo, potrebne so le v naslednjih primerih:

- pri spremembi debeline plošče,
- pred in za premostitvenimi objekti,

- v področju priključkov in
- pri majhnih polmerih.

Prostorsko rege se izvede tako, da se pred nadaljnjim betoniranjem namesti stisljivi dilatacijski vložek (polietilenska pena ali z bitumnom obdelana vlaknasta plošča), ki poteka po celotni širini krovne plasti in zagotavlja trajno raztezanja betonske plošče. Površinski zarez rege, ki mora biti vsaj širine vložka, je potrebno izvesti natančno nad dilatacijskim vložkom, praviloma 20 mm globoko. Robove je potrebno posneti in ustrezno zatesniti.

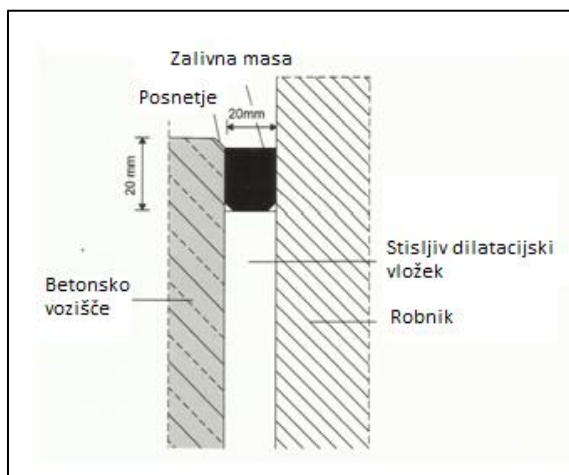


Slika 3.18: Prikaz izvedbe prostorske rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 46)

Na en konec moznikov je treba namestiti tulec, ki omogoča delovanje moznika. Prostor za raztezanje v tulcih mora biti najmanj 5 mm daljši od predvidenega največjega pomika moznika v prostorski regi. Tulec mora biti izdelan iz trdnega materiala ter se med betoniranjem ne sme stisniti.

3.3.5 Ločilne rege

Ločilne rege so nemozničene oziroma nesidrane prostorske rege, ki se izvajajo na stikih betonskega vozišča z robnimi (robniki) ali drugimi gradbenimi elementi, kot so na primer jaški. Izvedejo se tako, da se v rege vstavi stisljiv dilatacijski vložek. Po betoniranju se izvede površinska zareza za rege, ki se primerno zatesni.



Slika 3.19: Prikaz izvedbe ločilne rege (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 47)

3.3.6 Vložki in fugirna polnila

Zahteve za vložke in fugirna polnila, ki veljajo v Avstriji, so podane v preglednici 3.3.

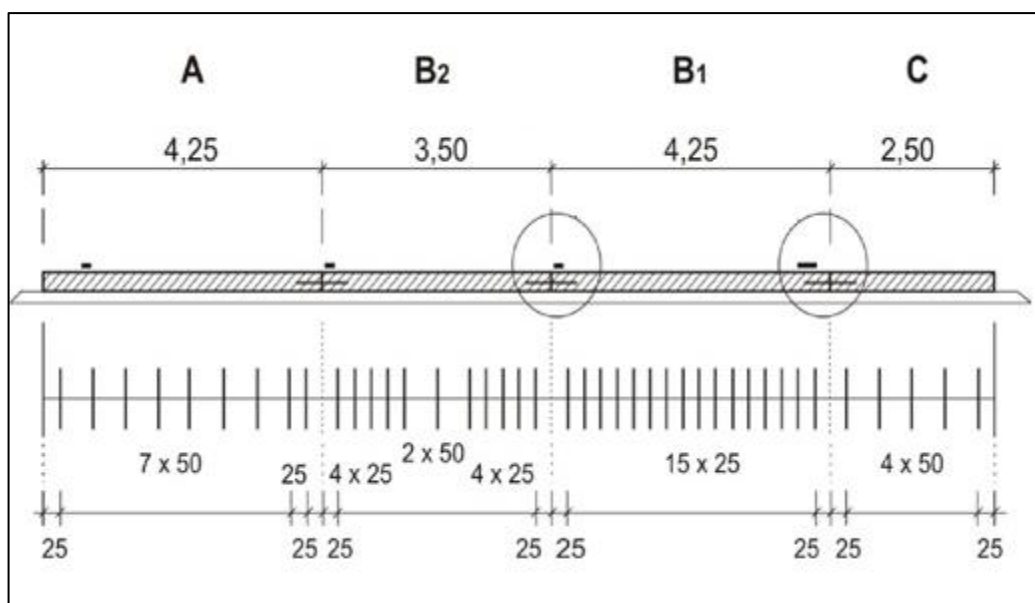
Preglednica 3.3: Zahteve za vložke in fugirna polnila v Avstriji (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 33)

| Način tesnjenja rege | Zahteve |
|--------------------------------------|---|
| Vložki za prostorske in ločilne rege | <ul style="list-style-type: none"> - Neškodljivi betonu, alkalno obstojni, v vodi se ne razpustijo, obstojni proti delovanju topil, ne vpijajo vode, enakomerno stisljivi. - Za prostorske rege z vodo nasičene letve iz mehkega lesa brez grč, vodotesno lepljene ali nalepljene. - Debelina: približno 20 mm. - Širina: debelina betonskega vozišča, -5 mm pri prostorskih regah z vrezanim zgornjim utorom oziroma -20 mm pri prostorskih regah in ločilnih regah, ki so rezane po celotni debelini. - Dolžina: ustrezno širini izdelave. |
| Fugirna polnila (širina rege > 8 mm) | Bituminozna fugirna polnila skladno z ÖNORM EN 14188-1 ali že izdelani fugirni profili skladno z ÖNORM EN 14188-3. |

3.3.7 Mozniki in sidra

Mozniki, ki se standardno uporabljajo, so iz okroglega jekla kakovosti najmanj S235, dolžine 50 cm in premera 25 mm in so odporni proti koroziji in delovanju alkalij. Pomembno je, da so jeklene palice za moznike gladke in brez kakršnih koli deformacij na koncih, ki bi ovirale pomike betonskih plošč. Mozniki morajo biti na celotni dolžini in po vsej površini premazani z umetnim materialom, ki se dobro sprime z jeklom (na primer polietilenska plastična prevleka) debeline najmanj 0,3 mm. V betonsko ploščo vgrajeni mozniki morajo dovoljevati spremembo dolžine betonskih plošč. Če je potrebno, lahko prilagodimo dolžino in debelino moznika, da zagotovimo dovolj nizko izvlečno silo moznika. V pomoč pri zagotavljanju dovolj nizke izvlečne sile je tudi dodatni premaz ter pri prostorskih regah na koncu nameščeni tulec.

Moznike vgrajujemo v sredino prereza krovne plasti betona, v smeri in z nagibom vozišča. Na manj obremenjenih betonskih vozniških površinah je lahko razmik med mozniki enakomeren in znaša 50 cm. Na močno obremenjenih voziščih, v območju kolesnic in na robovih plošč naj razdalja med mozniki znaša 25 cm. Moznike lahko postavimo vnaprej, v tem primeru jih je treba utrditi (npr. z žičnatimi košaricami) tako, da se med vgrajevanjem betona ne premaknejo, ali pa jih strojno vgradimo z vibriranjem v sveži beton. V primeru izvedbe pritiskljene rege se moznike uvrta v prosti rob voziščne konstrukcije.



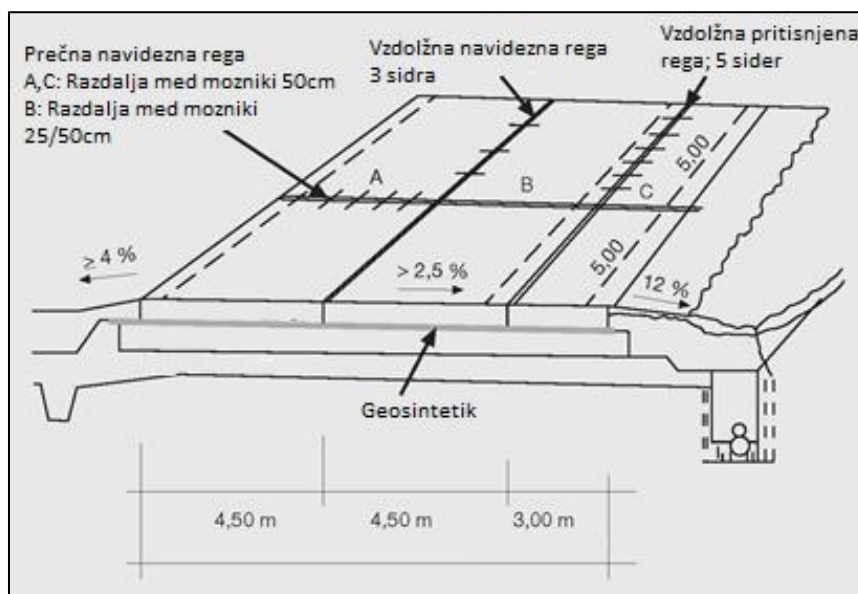
Slika 3.20: Prikaz razvrstitve moznikov glede na različne prometne obremenitve (Vir: <http://www.otto-brentzel.com/produkte.html>)

Slika 3.20 prikazuje razvrstitev moznikov v odvisnosti od različnih prometnih obremenitev, pri čemer predstavlja:

- A – nizko prometno obremenitev,
- B1 – visoko prometno obremenitev,
- B2 – razreda prometne obremenitve S in I in
- C – robni pas.

Za zagotavljanje ustreznega spoja med betonskimi ploščami v vzdolžni smeri je treba v vzdolžne rege vgraditi sidra. Naloga sider je po eni strani izničiti prečne pomike plošče, ki so posledica nateznih sil, po drugi strani pa prenašati sile, ki se pojavljajo zaradi vožnje vozil preko vzdolžnih reg. Ker so sile, ki jih prevzemajo sidra, bistveno manjše od tistih, ki jih prevzemajo mozniki, so lahko sidra tanjša od moznikov, vendar morajo biti zaradi prevzemanja nateznih sil daljša. Za sidra praviloma uporabljamo rebrasto armaturo. Sidro, ki se nahaja pod vzdolžno navidezno rego, je potrebno na sredini premazati s protikorozijskim premazom debeline 0,3 mm v dolžini vsaj 20 cm.

Sidra morajo biti vgrajena pravokotno na smer vožnje in skladno s prečnim nagibom vozišča. V vzdolžnih navidezni regah naj bodo vgrajena v višini prve tretjine debeline krovne plasti, gledano od spodnjega roba, v vzdolžnih pritisnjenih regah pa v sredini prereza krovne plasti. S tem zagotovimo, da pri zrezu reg ne pride do morebitnih poškodb sider. Na ravnih odsekih cest je potrebno v vzdolžno rego v vsako betonsko ploščo na enakih razdaljah vgraditi tri sidra (na enaki razdalji) v primeru navidezni reg ter pet sider v primeru pritisnjenih reg in visokih prometnih obremenitev (razredi S, I, II, III). Na odsekih cest s krivinami s polmerom do 600 m je potrebno v vzdolžno rego vgraditi tri sidra v srednjo tretjino betonske plošče.



Slika 3.21: Prikaz razvrstitve sider glede na stopnjo prometne obremenitve (prirejeno po Vir: <http://wiki.beton-informationen.de/index.php?title=Datei:FugenStrassen.jpg>)

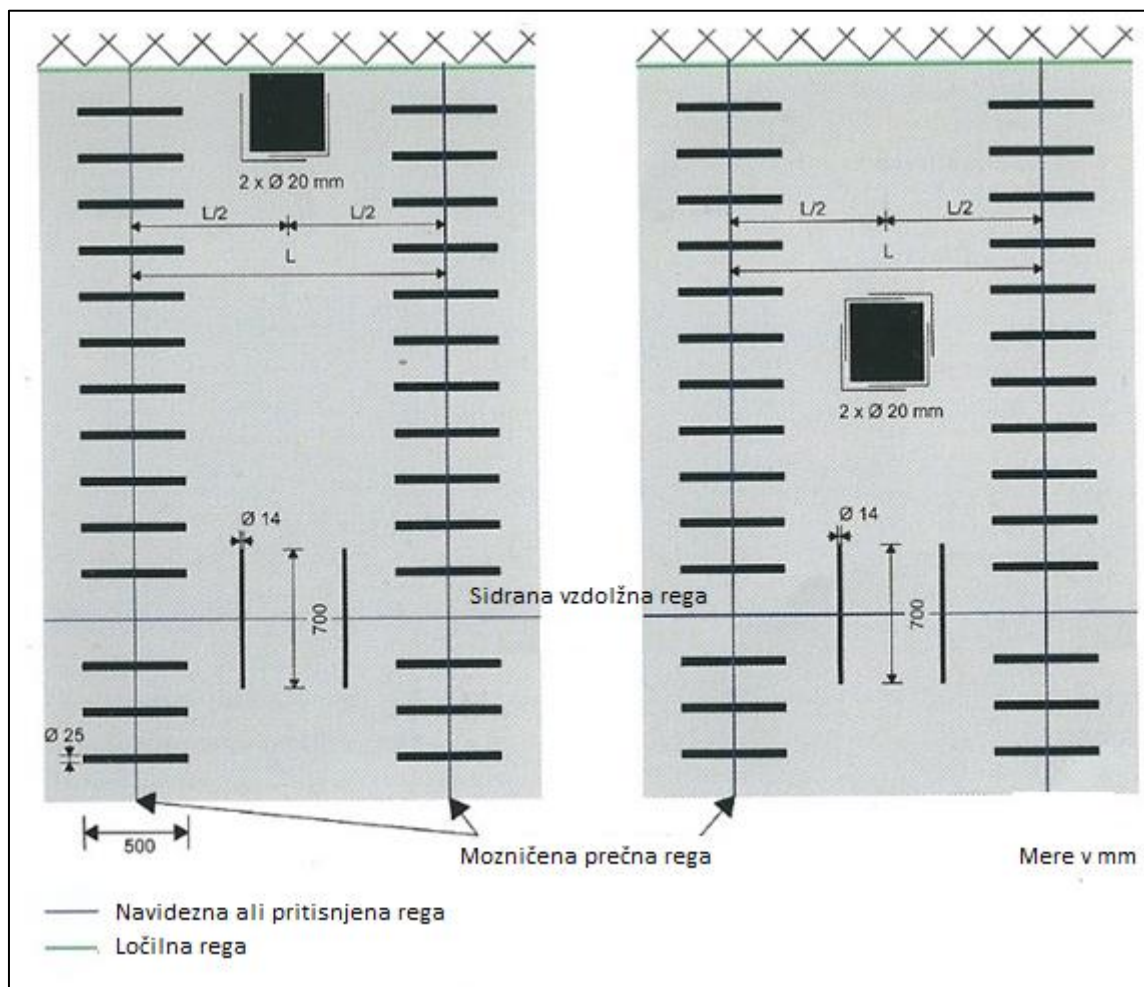
V Avstriji za sidra standardno uporabljajo rebraste jeklene palice dolžine 70 cm in premera 14 mm ter kvalitete jekla S500B. V Nemčiji se za težje prometne obremenitve zahteva uporaba 80 cm dolgih sider premera 20 mm, medtem ko se lahko v primeru nižjih prometnih obremenitev uporabijo sidra dolžine 60 cm in premera 16 mm. V RS pa TSC predlagajo uporabo sider dolžine 80 cm in premera med 16 – 20 mm (TSC 06.420, 2003).

Za izvedbo vzdolžnih pritisnjenih reg v Avstriji uporabljajo naslednje tri vrste sider:

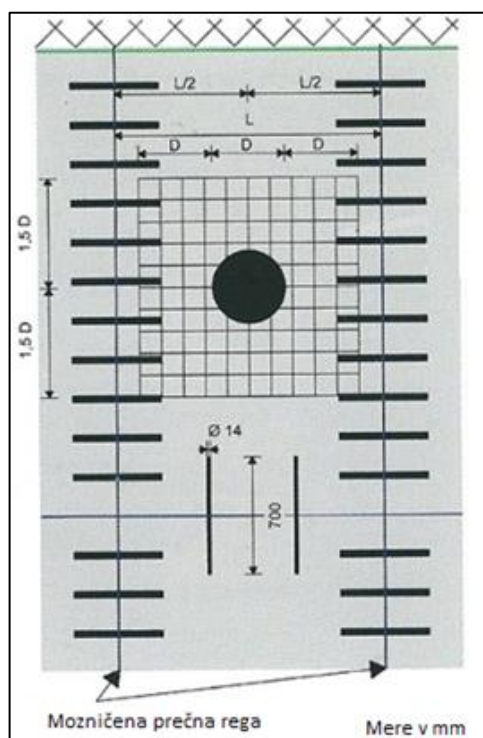
- Uvrtano lepljeno sidro; pred izvedbo sosednjega polja se v stranico predhodno izvedene in že strjene betonske plošče izvrtajo luknje. V očiščene izvrtane luknje se nato vstavijo »lepilni naboji« (kapsule z lepilom) z dvokomponentno mešanico malte in sidra.
- Zakrivljeno sidro; sidro, zakrivljeno na sredini za 90°, se vstavi v odprtino v opažu v sveže betonirano stranico betonske plošče. Ker bi konec sidra, ki gleda iz betona, oviral nadaljnjo gradnjo, je sidro zakrivljeno za 90°. Pred izvedbo sosednjega polja se del sidra, ki gleda iz betona, ponovno poravna.
- Vijačno sidro; vijačno sidro je z navojem razdeljeno na dva enako dolga dela. Del sidra z navojem se vtisne v še sveži beton. Pred dobetoniranjem sosednjega polja je potrebno protikorozijsko zaščito na navoju odstraniti ter priviti še drugo polovico sidra.

Zahteve glede potrebnega števila in razvrstitve moznikov ter sider so v RS in Avstriji praktično enake.

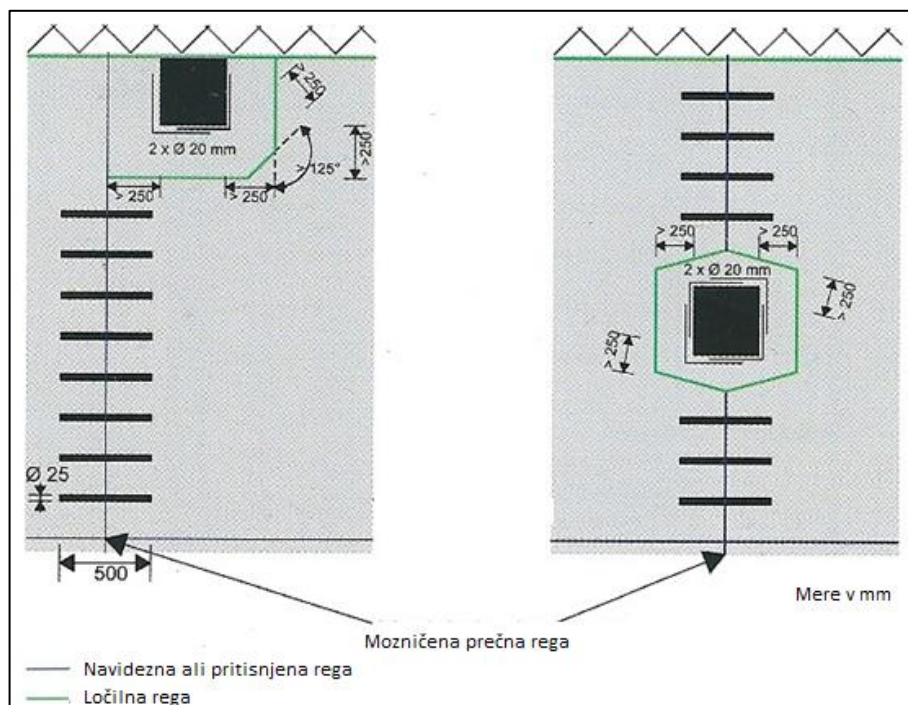
Posebno pozornost pri načrtovanju moramo posvetiti območjem ob vgrajenih gradbenih elementih. Na teh mestih namreč pogosto prihaja do razpok na vozišču zaradi povečanih natezних napetosti. TSC 06.420 (2003) navajajo, da morajo biti vsi gradbeni elementi, ki so vgrajeni v območju betonskega vozišča (npr. jaški, koritnice ipd.), s prostorskimi regami popolnoma ločeni od vozišča. V avstrijskih smernicah (RVS 08.17.02) je moč najti detajle, ki prikazujejo vgraditev moznikov in sider ter razporeditve reg in armature v različnih primerih. Nekaj primerov podajamo na slikah 3.22 do 3.24.



Slika 3.22: Detajl razporeditve moznikov, sider in reg v primeru vgraditev jaška s kvadratnim pokrovom (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 105)



Slika 3.23: Detajl razporeditve reg, sider in moznikov v primeru vgraditev jaška z okroglim pokrovom (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 105)



Slika 3.24: Detajl razporeditve reg, sider in moznikov v primeru vgraditev jaška s kvadratnim pokrovom, preko katerega poteka rega (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 106)

4 DIMENZIONIRANJE NOVIH BETONSKIH VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ

Cesta mora preko voziščne konstrukcije uporabnikom zagotavljati varno, udobno in gospodarno vožnjo ter mora imeti dovolj dolgo življenjsko dobo. Merila, s katerimi ocenjujemo kvaliteto vozišča, so torna sposobnost, ravnost in nosilnost (Rijavec, 2013).

Pri postopkih načrtovanja voziščnih konstrukcij uporabljamo podatke o nosilnosti podlage, prometnih obremenitvah, značilnostih izbranih materialov in lokalnih vremenskih pogojih. Vsak od naštetih vplivnih parametrov ima svojo težo pri načrtovanju voziščne konstrukcije, zato jih je treba obravnavati in upoštevati kot celoto.

Osnovni namen načrtovanja voziščnih konstrukcij je združenje plasti različnih materialov in njihova gospodarna izvedba, tako da bo zgrajena voziščna konstrukcija sposobna kljubovati vsem vplivom za določen čas (Žmavc, 2007). Vsaka plast v voziščni konstrukciji ima svojo vlogo. Z ustreznim zaporedjem teh plasti želimo zagotoviti izpolnjevanje dveh zahtev:

- togost plasti se mora od zgoraj navzdol postopoma zmanjševati in
- vodoprepustnost plasti naj od zgoraj navzdol narašča.

Za zagotovitev zadostne življenjske dobe vozišča je treba, poleg izbire zadostne debeline posameznih plasti, skrbno kontrolirati tudi kvaliteto vgrajenih materialov in potek njihove vgradnje. Pri betonskih voziščih, katerih planska doba naj bi znašala 30 let in je tako 10 let daljša kot pri asfaltnih voziščih, je to še posebej pomembno. Neizpolnjevanje kriterijev vodi v poškodbe vozišča, katerih sanacija je praviloma dolgotrajna in draga in si je zato ne smemo privoščiti tako z družbenega kot tudi ekonomskega vidika.

4.1 Temeljna tla in spodnji ustroj

Pred začetkom gradnje voziščne konstrukcije je treba najprej zagotoviti primerno in trajno nosilnost podlage. Priprava temeljnih tal se začne s širokim odkopom ali vsaj z odrtvom humusa ter morebitnih organskih ali zelo razmočenih plasti temeljnih tal. V planumu temeljnih tal si namreč ne želimo visoko plastičnih zemljin, katerih indeks plastičnosti (I_p) je višji od 35 in katerih meja židkosti (w_L) je višja od 65 (Logar, b. d.). V takem primeru razmislimo o poglobitvi izkopa ali o stabilizaciji tal. Za potrebe odvodnjavanja je treba izvesti planiranje temeljnih tal. Na nagnjenih terenih, kjer je naklon temeljnih tal večji od 20° , je treba stik med tlemi in nasipom stopničiti. Nasip, če je potreben, lahko izvedemo iz različnih materialov: kamnitih materialov, grušča glinavcev ali meljevcev, peščenih materialov, zemljine itd. Kjer obstaja nevarnost vdora talne vode iz temeljnih tal v nasip ali nevarnost poplav in je

nasip grajen iz materiala, občutljivega na vodo, izvedemo prvi sloj nasipa v debelini od 0,5 do 1,5 m iz kamnitega materiala. Vsak vgrajeni sloj nasipa in planum temeljnih tal je potrebno preveriti:

- glede dosežene gostote in vlažnosti tal,
- glede deformabilnosti (togosti) s krožno ploščo,
- glede geometrijske točnosti (kota planuma lahko odstopa od projektirane za največ 2 cm) ter
- glede ravnosti (na dolžini 4 m sme ravnost odstopati za največ 3 cm pri nasipih iz zemljin in 5 cm pri nasipih iz kamnin).

Materiale, vgrajene v posteljico, nasipe in temeljna tla je potrebno ustrezno zgostiti do predpisanih vrednosti. Namen zgoščevanja je doseči večjo strižno trdnost, manjšo deformabilnost in s tem manjše posedke ter zmanjšati poroznost in s tem prepustnost. Pri vrednotenju zgoščenosti si pomagamo s Proctorjevim preizkusom. Proctorjev preizkus predstavlja standardni postopek, pri katerem z uporabo standardne energije določimo največjo gostoto in optimalno vlažnost vgrajenega materiala. Zgoščenost materiala nato izračunamo tako, da izmerjeno gostoto materiala na terenu delimo z referenčno Proctorjevo gostoto in rezultat izrazimo v odstotkih.

Togost in nosilnost vgrajenih materialov določamo s pomočjo naslednjih preiskav: s preiskavo CBR (California Bearing Ratio), s poskusom s krožno ploščo po švicarskem (določimo modul stisljivosti M_E) in nemškem postopku (določimo statična deformacijska modula E_{v1} in E_{v2}) ter z meritvijo dinamičnega deformacijskega modula E_{vd} (povzeto po Logar, b. d.).

Posteljica je vrhnja (zaključna) plast nasipa ali temeljnih tal, debeline do 50 cm, s posebnimi lastnostmi (povečana nosilnost, zmanjšana občutljivost na učinke mraza), katere dosežemo z ustreznimi gradbenotehničnimi ukrepi, kot so izboljšava, utrditev in stabiliziranje. Namen posteljice je zagotoviti primerno in trajno nosilnost podlage in zaščititi vgrajene materiale pred škodljivimi učinki mraza. Za vgradnjo v posteljico je najbolj primeren kameni agregat, lahko pa uporabimo tudi vezljive zemljine, če je $w_L < 35\%$ ter $I_p < 12\%$ (Žmavc, 2007). Vgrajen material mora biti prostorsko stabilen in obstojen v vodi. Če je posteljica vgrajena v območju globine zamrzovanja h_{min} , moramo zagotoviti, da je uporabljeni material odporen na škodljive učinke heterogene zamrznitve. Zagotoviti moramo zadostno nosilnost in zbitost ter za zagotovitev zadovoljivega odvodnjavanja izvesti planum posteljice z naklonom vsaj 4 %.

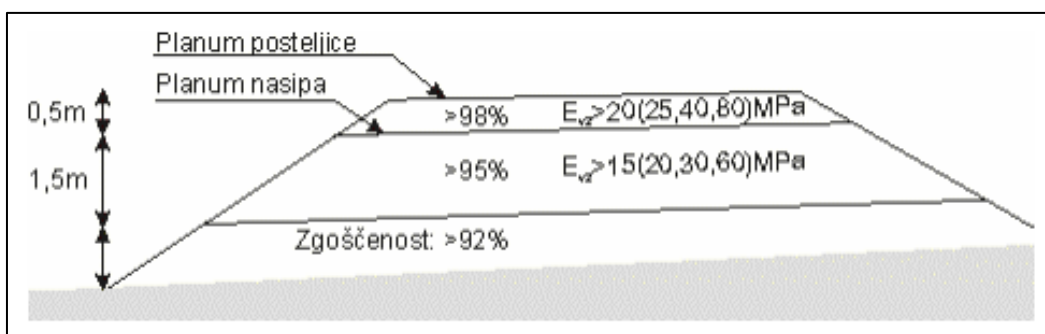
V cestogradnji v Sloveniji se kot kriterij za vrednotenje kakovosti vgradnje materialov uporabljata statični deformacijski modul E_{v2} in razmerje statičnih deformacijskih modulov E_{v2}/E_{v1} oziroma dinamični deformacijski modul E_{vd} (slika 4.1). Za potrebe dimenzioniranja predstavlja bistven podatek o primernosti podlage rezultat CBR testa. Vrednost CBR naj bi po TSC 06.530 (2009) znašala najmanj

10 %, meritev pa je potrebno opraviti po postopku, opisanem v TSC 06.720:2003 – Meritve in preiskave, deformacijski moduli vgrajenih materialov.

| Opis del | Statični deformacijski modul | | Dinamični deformacijski modul |
|---|------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| | E_{v2} (MPa) | E_{v2} / E_{v1} | E_{vd} (MPa) |
| Planum temeljnih tal od 2,0 do 0,5 m pod koto planuma posteljice iz: | | | |
| • zemljin | ≥ 15 | $\leq 2,2$ | $\geq 7,00$ |
| • izboljšanih zemljin | ≥ 20 | $\leq 2,2$ | $\geq 10,0$ |
| • kemično stabiliziranih zemljin | ≥ 30 | $\leq 2,2$ | $\geq 15,0$ |
| • kamnin | ≥ 60 | $\leq 3,0$ | $\geq 30,0$ |
| Planum temeljnih tal od 0,5 m pod koto planuma posteljice (=posteljica) iz: | | | |
| • zemljin | ≥ 20 | $\leq 2,2$ | $\geq 10,0$ |
| • izboljšanih zemljin | ≥ 25 | $\leq 2,2$ | $\geq 12,0$ |
| • kemično stabiliziranih zemljin | ≥ 40 | $\leq 2,2$ | $\geq 20,0$ |
| • kamnin | ≥ 80 | $\leq 3,0$ | $\geq 40,0$ |

Slika 4.1: Zahtevani moduli pri gradnji cestnih nasipov v RS (Logar, b. d.)

V RS veljajo naslednje zahteve glede dosežene gostote planuma temeljnih tal: v kolikor se planum temeljnih tal nahaja več kot 2,0 m pod koto planuma posteljice, mora zgoščenost po Proctorju (D_{pr}) znašati vsaj 92 %. Če je ta razdalja med 2,0 in 0,5 m, je zahteva nekoliko višja, in sicer 95 %, v kolikor pa je razdalja manjša od 0,5 m, je potrebno doseči 98 % zgoščenost (slika 4.2).



Slika 4.2: Zahteve za kakovost v nasipe vgrajenega materiala (Logar, b. d.)

Primerno enakomerno nosilnost na planumu posteljice je mogoče doseči z vgraditvijo naslednjih debelin plasti iz obstojnih kamnitih materialov (zrnavosti do 100 mm) v posteljico:

- na pretežno vezljivih zemljinah 50 cm,
- na zelo zaglinjenih kamnitih materialih 40 cm in
- na kamnitih materialih (izravnalna plast – zrnavost do 63 mm) 20 cm.

Na ta način je na planumu posteljice zagotovljena zahtevana vrednost nosilnosti $CBR = 15\%$ ($E_{v2} = 80 \text{ MN/m}^2$), ki zagotavlja vse potrebne pogoje za kvalitetno vgrajevanje materialov v nadgrajene plasti voziščnih konstrukcij.

Primerjava kriterijev za vrednotenje kakovosti planuma temeljnih tal oziroma posteljice RS z avstrijskimi, ki so podani v preglednici 4.1, pokaže, da so v Avstriji zahtevane višje stopnje zgoščenosti za temeljna tla, nasip in posteljico. Bistven podatek glede ustreznosti podlage voziščne konstrukcije, tj. nosilnosti na planumu posteljice, se v Avstriji ovrednoti s statičnim deformacijskim modulom E_{v1} ($E_{v1} \geq 35 \text{ MN/m}^2$), medtem ko v RS uporabljamo vrednost CBR. Zahtevani dinamični deformacijski modul E_{vd} je v Avstriji sicer nekoliko nižji, medtem ko neposredna primerjava zahtev glede doseženega statičnega deformacijskega modula ni mogoča, saj v Avstriji za vrednotenje uporabljajo modul E_{v1} , v RS pa E_{v2} .

Preglednica 4.1: Zahtevani moduli in stopnja zgoščenosti po Proctorju pri gradnji spodnjega ustroja cest v Avstriji (Blab et al, 2012, str. 52)

| Položaj | $E_{vd} \text{ (MN/m}^2\text{)}$ | $E_{v1} \text{ (MN/m}^2\text{)}$ | $D_{Pr} \text{ (\%)}$ |
|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Planum posteljice | 38 | 35 | 100 |
| Planum temeljnih tal od 1,0 m pod koto planuma posteljice | 24 (26) | 20 | 99 |
| Planum temeljnih tal | 18 (16) ¹⁾ | 15 (7,5) ¹⁾ | 97 (95) |
| Zasip | 38 | 35 | 100 |
| ¹⁾ Vrednosti v oklepajih veljajo za vezljiva tla. | | | |

4.2 Nevezana nosilna plast

Na ustrezno pripravljene podlagi lahko začnemo z gradnjo voziščne konstrukcije, ki se začne z nevezano nosilno plastjo, katere glavna naloga je zagotavljanje ustrezne trajne nosilnosti voziščne konstrukcije ter zaščita vgrajenih materialov pred škodljivim učinkom zmrzovanja.

Bistvene zahteve za vgrajene nevezane spodnje plasti so (Blab et al., 2012):

- Odpornost proti zmrzovanju. Odpornost proti zmrzovanju nevezanih nosilnih slojev je treba dokazati s sejalno analizo vgrajenih materialov. Če znaša presevek na situ 0,063 mm pod 4 % oziroma pod 5 %, je sloj odporen proti zmrzovanju. Sicer je treba na zrnih, manjših od 0,020 mm, opraviti dodatne preiskave, s katerimi potrdimo odpornost na zmrzal.

- Nosilnost in zbitost. Nevezano nosilno plast je treba tako zgostiti, da je na površini izvedenega sloja deformacijski modul $E_{v1} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ ter da je razmerje deformacijskih modulov $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.2$. Če je razmerje deformacijskih modulov večje ali enako 2.2, je potrebno preveriti zgoščenost po Proctorju, pri čemer mora znašati $D_{pr} \geq 101 \%$.
- Sposobnost hitrega odvodnjavanja in zadostna prepustnost. Učinkovito odvodnjavanje in trajna prepustnost nevezanih nosilnih plasti bistveno doprineseta k doseganju projektirane življenjske dobe (togih) voziščnih konstrukcij. Treba je uporabiti dovolj grobozrnate agregate, ki ne zadržujejo vode in ne omogočajo kapilarnega dviga.

Preglednica 4.2: Minimalne zahteve za nevezane nosilne plasti v Avstriji po RVS 08.15.01 (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 55)

| Karakteristika | Minimalne zahteve za nevezano nosilno plast |
|--|---|
| E_{v1} (MN/m ²) | $\geq 60 \text{ MN/m}^2$ |
| E_{v2}/E_{v1} | $\leq 2,2$ |
| D_{pr} (%) ¹⁾ | $\geq 101 \%$ |
| Odstopanje od ciljne višine | $\pm 3 \text{ cm}$ |
| ¹⁾ V primeru, če je $E_{v2}/E_{v1} > 2,2$. | |

Zahteve, podane v preglednici 4.2, so zahteve avstrijskih standardov. Debelina nevezane spodnje plasti je v primeru voziščne konstrukcije tipa 5 določena v standardiziranih katalogih. V primeru tipa 6, ko je nevezana nosilna plast pod stabilizirano zgornjo nosilno plastjo, pa mora debelina znašati minimalno 20 cm.

Zahtevane vrednosti za zagotovitev potrebne nosilnosti na planumu nevezane nosilne zmesi, ki veljajo v RS, so v odvisnosti od prometne obremenitve podane v preglednici 4.3.

Preglednica 4.3: Minimalne zahteve za nevezano nosilno plast v RS (Žmavc, 2007)

| Vrsta zmesi kamnitih zrn | Prometna obremenitev | | | | | |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| | Težka | | | Srednja ali lahka | | |
| | Zahtevane vrednosti | | | | | |
| | E_{v2} (MN/m ²) | E_{v2}/E_{v1} | E_{vd} (MN/m ²) | E_{v2} (MN/m ²) | E_{v2}/E_{v1} | E_{vd} (MN/m ²) |
| Naravna | ≥ 100 | $\leq 2,2$ | ≥ 45 | ≥ 90 | $\leq 2,4$ | ≥ 40 |
| Drobljena ali mešana | ≥ 120 | $\leq 2,0$ | ≥ 55 | ≥ 100 | $\leq 2,2$ | ≥ 45 |

Primerjava zahtev pokaže, da so zahteve v RS razdeljene glede na nivo prometne obremenitve ter glede na uporabljeno vrsto zmesi kamnitih zrn, medtem ko so v Avstriji podane enotno. V primeru težke prometne obremenitve in uporabe drobljenih zmesi zrn, so zahteve v Avstriji in RS povsem primerljive. Kljub temu, da se betonska vozišča praviloma gradijo v primeru težkih prometnih obremenitev in je uporaba drobljenih zmesi zrn za nevezane nosilne plasti standardna praksa, bi bilo zniževanje kriterija v primeru lažje prometne obremenitve in uporabe naravnih zmesi zrn, predvsem z vidika doseganja življenjske dobe vozišča 30 let, smiselno podrobneje raziskati.

4.3 Vezana (stabilizirana) zgornja nosilna plast

V splošnem je stabiliziranje postopek, pri katerem je z vmešavanjem veziva in vode v obstoječi material in s primerno zgostitvijo pripravljene zmesi ali mešanice trajno povečana odpornost vgrajene zmesi ali mešanice proti vplivom prometnih obremenitev ter proti škodljivim klimatskim in hidrološkim vplivom (TSC 06.320, 2001).

Namen stabiliziranja zmesi kamnitih zrn je, da z izbrano vrsto veziva (Jurjavčič, 2006):

- zmanjšamo vpliv:
 - pomanjkljive sestave zmesi,
 - škodljivih primesi v zmesi,
 - slabše kakovosti kamnine,
- zmanjšamo specifične obremenitve zrn v zmesi (ustvarimo večje stične površine) ter
- povečamo raznos obremenitev vezane plasti glede na nevezano (in s tem večjo sposobnost premostitve morebitnih lokalno slabših mest).

Poznanih je več različnih tehnik stabiliziranja, vendar v cestogradnji prevladujeta predvsem dva načina, in sicer stabiliziranje z anorganskimi vezivi (cement, apno, elektrofiltrski pepel, žlindra) ter organskimi vezivi (bitumenske emulzije). V skladu z uporabljenim vezivnim sredstvom v Avstriji razlikujejo naslednje vrste stabiliziranih nosilnih plasti:

- s cementom stabilizirana nosilna plast (ST-C),
- nosilna plast, stabilizirana z (hidravličnim) vezivom za stabilizacijo plasti voziščne konstrukcije, (ST-V),
- z bitumnom stabilizirane nosilne plasti (ST-B) in
- z bitumnom in s cementom stabilizirane nosilne plasti (ST-BC).

Specialna veziva za stabilizacijo plasti voziščne konstrukcije so cementu podobna hidravlična veziva, pri katerih tlačna trdnost pri sedmih dneh znaša 50 % vrednosti, ki se doseže pri starosti 28 dni. Z vezivi za nosilne plasti je možno doseči tudi ugodnejše nižje začetne trdnosti in višje končne trdnosti.

Pri izvedbi voziščnih konstrukcij tipa 6 se za stabilizacijo nosilne plasti uporablja cement ali posebno hidravlično vezivo, medtem ko se kombinacija bitumna in cementa uporablja zgolj v primeru, da je osnovni material kontaminiran s katranom. Proizvodnjo stabiliziranih zmesi lahko izvajamo v centralni mešalni napravi ali pa kar na mestu vgrajevanja. Stabilizacijsko mešanico za vezane nosilne plasti v voziščnih konstrukcijah avtocest in glavnih državnih cest je praviloma treba proizvesti v centralnem obratu za pripravo mešanic.

Debeline stabiliziranih nosilnih plasti so v Avstriji določene v standardiziranem katalogu (RVS 03.08.63) in veljajo v osnovi za stabilizirane nosilne sloje, ki so proizvedeni v centralnem obratu za pripravo mešanic. Zahtevane debeline slojev lahko izvedemo v eni plasti do maksimalne dovoljene debeline 30 cm. V primeru prometnih površin z visokimi prometnimi obremenitvami lahko vgradimo sloj debeline do 40 cm v dveh slojih po metodi sveže na svežo (Blab et al., 2012).

Kot osnovni material za stabilizirane nosilne plasti se lahko uporablja:

- zemljina, pridobljena na licu mesta, ali dostavljena naravna kamnita zrna,
- pripravljeni kamniti material,
- reciklirani material (stabilizirani sloji, betonska ali asfaltna reciklaža) in
- mešane zmesi zrn.

Vsi za stabilizacijo uporabljeni osnovni materiali in njihove mešanice ne smejo vsebovati materialov, ki preprečujejo strjevanje (kot na primer humus), ter velikih kamnitih zrn, večjih od 32 mm, v primeru vgradnje s finišejem oziroma zrn, večjih od 63 mm, pri vgradnji z grederjem. Presevek na situ premera 4 mm mora za zagotavljanje zadostne vezljivosti znašati vsaj 35 %.

Minimalna vsebnost veziva pri stabilizaciji s cementom ali specialnim vezivom za stabilizacijo mora pri proizvodnji v centralni mešalni napravi znašati minimalno 80 kg/m^3 in pri postopku mešanja na mestu vgrajevanja vsaj 90 kg/m^3 . Zahteve, ki jih mora izpolnjevati stabilizirana nosilna plast po avstrijskih kriterijih, so podane v preglednici 4.4.

Preglednica 4.4: Zahteve za stabilizirano nosilno plast v Avstriji pri kontroli na gradbišču (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 60)

| Vrednosti | Zahteve in tolerance | | |
|--|--|-------|-------|
| Optimalna vsebnost vode in zgoščenost po Proctorju | Referenčne vrednosti za vsebnosti vode in suhe gostote | | |
| Vsebnost vode (%) | $(w_{opt}-2,0) < w < (w_{opt}+1,0)$ | | |
| | ST-C, ST-V | ST-BC | ST-B |
| Tlačna trdnost | posamična vrednost ¹⁾ | | |
| | ≥ 2,5 | ≥ 1,5 | - |
| Cepilna natezna trdnost | - | ≥ 0,2 | - |
| ϵ_{sz} | - | ≥ 0,1 | ≥ 0,4 |
| Suha gostota (kg/m ³) Zgoščenost po Proctorju (%) | V vsaki točki ≥ 97 %, v povprečju za sloj ≥100, pri statistični porazdelitvi naj bo koeficient variacije < 2 % | | |
| Debelina sloja | Odstopanje od nazivne debeline naj bo ≤ 10 % | | |
| Ravnost površine | 15 mm / 4-metrška letev | | |
| ¹⁾ podane vrednosti veljajo v primeru uporabe HRB22,5 ali CEM 32,5 N; v primeru uporabe CEM 32,5 R mora biti $f_c > 3,0$ N/mm ² , pri CEM 42,5 N pa mora biti $f_c > 3,5$ N/mm ² . Zahteve so podane za preizkušance oblike valja, višine 12 cm in premera 10 cm. V kolikor izvajamo preizkus na preizkušancih višine 12,5 cm in premera 15 cm, je potrebno navedene vrednosti pomnožiti s faktorjem 0,8. | | | |

Zahteve in postopki za vezane nosilne plasti s hidravličnimi vezivi so v RS natančno podane v TSC 06.320 (2001) – Vezane spodnje nosilne plasti s hidravličnimi vezivi in obsegajo:

- zahteve za kakovost osnovnih materialov,
- zahteve za kakovost proizvedene stabilizacijske mešanice,
- postopke za vgrajevanje in negovanje stabilizacijske mešanice,
- zahteve za kakovost izvedenih del in
- postopke za prevzem zgrajene stabilizirane plasti.

Primerjava zgoraj navedenih avstrijskih zahtev z zahtevami, ki veljajo v RS, presega okvir te magistrske naloge, saj se bomo omejili na betonske voziščne konstrukcije z nevezanimi nosilni plastmi, katerih postopek dimenzioniranja je predstavljen v nadaljevanju.

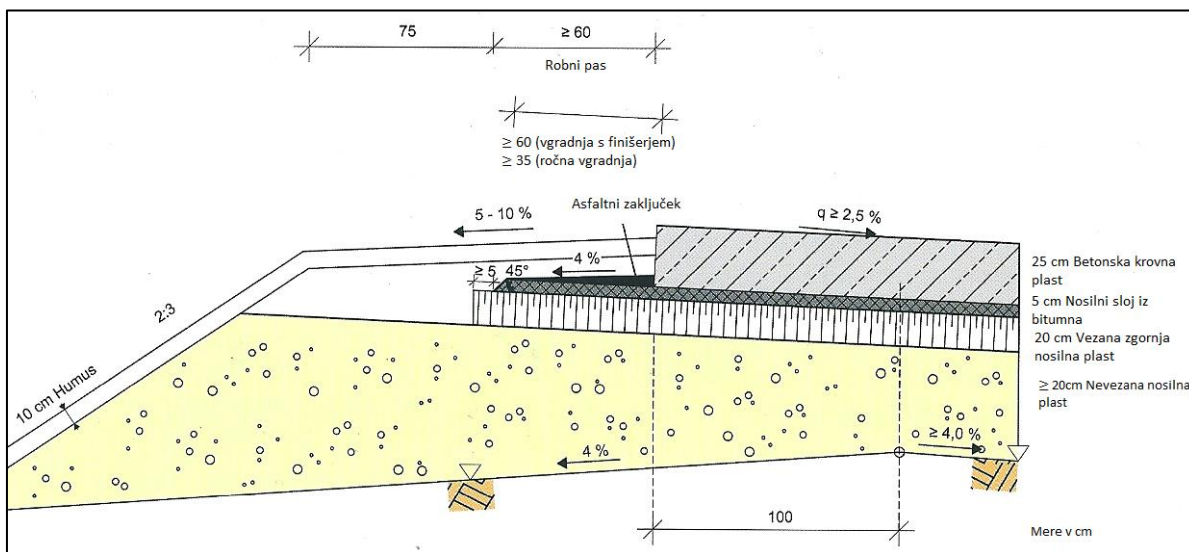
4.4 Bitumenski nosilni sloji

Z vgradnjo tesnilnega bitumenskega nosilnega sloja pod krovno betonsko ploščo poskrbimo za zaščito spodnjih plasti pred škodljivimi erozijskimi učinki vode, ki pronica skozi razpoke in rege v betonu, s čimer dosežemo trajno nosilnost in s tem pomembno podaljšanje življenjske dobe vozišča. Poleg tega asfaltni sloj v času gradnje uspešno služi potrebam gradbiščnega prometa brez nevarnosti za poškodbe spodnjih slojev, še posebej pa se izkaže pri vgradnji betonske krovne plasti zaradi svoje ravnosti in mehanske neobčutljivosti (Blab et al., 2012).

Za bitumenske nosilne sloje pod betonskimi ploščami se glede na avstrijske standarde uporablja bitumenski beton z oznako AC 16 trag 70/100, T3, G5. V primeru prometne obremenitve razredov S ter I, je potrebno zvišati razred kvalitete zmesi kamnitih zrn na G4. Oznaka AC v imenu pomeni bitumenski beton, trag oziroma v angleščini base (nosilna plast) nam pove lego bitumenskega betona v voziščni konstrukciji, 70/100 je oznaka za tip bitumna, G4 pa oznaka razreda zmesi kamnitih zrn. V RS se za oznako razreda kamnitih zrn uporablja razrede Z1-Z6, zato so na sliki 4.3 prikazane zahteve, ki veljajo v Avstriji.

| Gesteinsklasse G4 - Lastklassen S, I und II | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|------------------|---|--------------------|------------------|-------------------|----------------|------------------|
| G _c 90/20 | G _r 85, G _A 90 | G _{Tc} NR | f ₂ ; f _{NR} | MB _r NR | SI ₂₀ | C _{90/1} * | E _{cs} 35 | LA ₂₅ | PSV _{NR} | F ₂ | V _{8,5} |
| Gesteinsklasse G5 - Lastklassen III und IV | | | | | | | | | | | |
| G _c 90/20 | G _r 85, G _A 90 | G _{Tc} NR | f ₂ ; f _{NR} | MB _r NR | SI ₂₅ | C _{50/10} ; C _{50/30} * | E _{cs} 30 | LA ₃₀ | PSV _{NR} | F ₂ | V _{8,5} |

Slika 4.3: Zahteve za zmesi kamnitih zrn za proizvodnjo bitumenskega betona (Vir: http://www.hwk.at/index_htm_files/Anforderungen%20an%20Gesteinskoernungen%20im%20Strassenbau%20in%20Oesterreich.pdf)



Slika 4.4: Tipski prečni profil betonskega vozišča tipa 6 v primeru prometne obremenitve razreda S (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 65)

4.5 Prometne obremenitve

Prometna obremenitev je obremenitev, ki jo povzročajo vozila, ki prečkajo izbrani prerez ceste v določeni dobi trajanja voziščne konstrukcije. Za določitev prometne obremenitve na vozišču je treba opredeliti povprečni letni dnevni promet (PLDP) in določiti težo posameznih osi vozil ali oceniti izkoriščenost vozil. Povprečni letni dnevni promet predstavlja povprečno dnevno število motornih vozil, ki so v določenem letu prevozila izbrani prerez vozišča, in se določi s pomočjo števcev prometa oziroma v primeru novogradenj s pomočjo prognoz prometa (prometne študije). Če teža osi motornih vozil ni določena s tehtanjem, je treba določiti osne obremenitve reprezentativnih vozil z oceno izkoriščenosti le-teh. Različne osne obremenitve motornih vozil je treba pretvoriti v ekvivalentno dnevno prometno obremenitev (T_a) v odvisnosti od načina določanja prometne obremenitve. S pomočjo T_a lahko nato ob upoštevanju raznih dodatnih vplivov na prometno obremenitev, ki so posledica karakteristik ceste ter trajanja in letne stopnje rasti prometa, izračunamo merodajno prometno obremenitev. Glede na določeno merodajno obremenitev lahko prometne obremenitve razdelimo v značilne razrede prometnih obremenitev, ki služijo kot izhodišče za določanje dimenzij voziščne konstrukcije (Rijavec, 2013).

Utrujanje v voziščne konstrukcije vgrajenih materialov je z vidika prometnih obremenitev odvisno od značilnosti motornih vozil (osnih obremenitev, razporeditve osi na vozilu, razporeditve koles na osi vozila) in od merodajne prometne obremenitve. V zadnjem desetletju beležimo na visoko rangiranih cestah visok porast predvsem tovornega prometa, tako v RS kot tudi v drugih državah članicah EU. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) tako navaja: »Cestni blagovni prevoz je po vstopu Slovenije v EU skokovito narasel, saj se je obseg tonskih kilometrov slovenskih prevoznikov v obdobju 2004 – 2011 povečal kar za 83 %. Njegova rast se je v Sloveniji, razen v letalskem prometu, nadaljevala kljub gospodarskim težavam v EU. Posebej skrb vzbujajoča je rast cestnega blagovnega tranzita skozi Slovenijo« (Obseg in sestava blagovnega prevoza in prometa, 2015). To se odraža v pogostem nedoseganju projektne življenjske dobe vozišč in posledično številnih poškodbah voziščne konstrukcije in potrebah po sanacijah.

Kot odgovor na povečanje prometnih obremenitev strokovnjaki neprestano nadgrajujejo stare in iščejo nove načine dimenzioniranja voziščnih konstrukcij, ki bodo uspešno kljubovale povečanim obremenitvam. Pri tem se preverja in upošteva izkušnje, pridobljene iz preteklih projektov z zbiranjem podatkov na terenu, ter novosti na področju razvoja materialov (kvalitetnejši betoni). Spoznanja se nato uporabijo v novih izdajah tehničnih specifikacij oziroma standardov.

Področje določanja prometne obremenitve v RS obravnavajo TSC 06.511:2009 – Prometne obremenitve, določitev in razvrstitev, ki kot referenčno dokumentacijo (med drugim) uporabljajo nemško smernico RStO 86: 1989 (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen). Opozoriti velja, da je v Nemčiji trenutno veljavna šesta verzija standarda RStO, in

sicer RStO 12 (RStO 86 je bila druga verzija), pri čemer je prišlo do nekaterih sprememb pri določanju in razvrstitvi merodajne prometne obremenitve. Najbolj opazna je vsekakor daljša planska doba vozišča, in sicer se voziščne konstrukcije dimenzionirajo na 30-letno plansko dobo. Zaradi daljše planske dobe in s tem povečanja prometnih obremenitev je v standardu vpeljana tudi prilagojena razvrstitev prometnih obremenitev v posamezne razrede, ki po novem obsega 7 razredov prometnih obremenitev. Prav tako se pri določanju merodajne prometne obremenitve ne upoštevajo osebni avtomobili, ampak zgolj vozila katerih, nosilnost presega 3,5 t.

Preglednica 4.5: Razredi prometne obremenitve po RStO 12 (prirejeno po Vir: <https://de.wikipedia.org/wiki/Belastungsklasse>)

| Razred prometne obremenitve | Število prehodov nazivne osne obremenitve 100 kN (v 30 letih) v milijonih |
|-----------------------------|---|
| T _d 100 | > 32 |
| T _d 32 | > 10–32 |
| T _d 10 | > 3,2–10 |
| T _d 3,2 | > 1,8–3,2 |
| T _d 1,8 | > 1,0–1,8 |
| T _d 1,0 | > 0,3–1,0 |
| T _d 0,3 | ≤ 0,3 |

Z vidika potreb te naloge, je v nadaljevanju predstavljen način določanja merodajne prometne obremenitve po RVS 03.08.63, ki se uporablja v Avstriji in temelji na poznavanju PLDP . Določitev ekvivalentne dnevne prometne obremenitve T_d na osnovi povprečnih vrednosti faktorjev ekvivalentnosti se izvede po enačbi:

$$T_d = \sum FE_v \times n_v \quad (4.1),$$

kjer pomeni:

FE_v – faktor ekvivalentnega vpliva dejanske osne obremenitve motornega vozila na utrujanje v odnosu na vpliv nazivne osne obremenitve (NOO) 100 kN (preglednica 4.6),

n_v – število motornih vozil določene vrste na dan na začetku uporabe ceste.

Merodajno prometno obremenitev v načrtovani dobi trajanja voziščne konstrukcije izračunamo po enačbi 4.2:

$$T_n = T_d \times n \times f_r \times f_{ps} \times f_{pp} \times f_{sp} \times 365 \quad (4.2),$$

kjer pomeni:

n – načrtovana doba trajanja (praviloma 30 let v primeru betonskega vozišča),

f_r – faktor letne stopnje rasti prometa (enačba 4.3),

f_{ps} – faktor prometne smeri (0,5 v primeru enakovredne porazdelitve prometa glede smeri vožnje),

f_{pp} – faktor razdelitve obremenitve na prometne pasove (1,0 v primeru enega ali dveh istosmernih prometnih pasov, 0,9 v primeru treh ali več prometnih pasov),

f_{sp} – faktor širine prometnih pasov (preglednica 4.7).

$$f_r = \frac{(1+p)^n - 1}{p \times n} \quad (4.3),$$

kjer pomeni:

p – letna stopnja rasti prometa; letno stopnjo rasti prometa pridobimo iz prometnih študij. Če take študije ni mogoče pridobiti, upoštevamo stopnjo rasti za avtoceste 3 % in za ostale ceste 1 %.

Preglednica 4.6: Faktorji ekvivalentnosti za posamezne kategorije motornih vozil (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 68)

| Kategorija motornega vozila | FE _v |
|---|-----------------|
| Tovorno vozilo brez prikolice | 0,7 |
| Tovorno vozilo s prikolicco ali traktor | 1,2 |
| Avtobus | 0,6 |
| Medkrajevni avtobus | 0,8 |
| Zglobni avtobus | 1,4 |

Preglednica 4.7: Faktorji širine prometnih pasov v odvisnosti od širine pasov (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 68)

| Širina prometnega pasu | ≤ 3,0 m | 3,0 m | 3,25 m | 3,5 m | 3,75 m | ≥ 4,0 m |
|------------------------|---------|-------|--------|-------|--------|---------|
| f_{sp} | 1 | 0,9 | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,7 |

Glede na izračunano merodajno prometno obremenitev določimo obremenitveni razred, ki nam služi pri izbiri debelin posameznih slojev voziščne konstrukcije (preglednica 4.8).

Preglednica 4.8: Razredi prometne obremenitve po RVS 03.08.63 (prirejeno po Blab et al., 2012)

| Razred prometne obremenitve | Število prehodov nazivne osne obremenitve 100 kN (v 30 letih) v milijonih |
|-----------------------------|---|
| S | > 18–40 |
| I | > 6,5–18 |
| II | > 2,1–6,5 |
| III | > 0,6–2,1 |
| IV | > 0,15–0,6 |
| V | > 0,075–0,15 |
| VI | < 0,075 |

4.6 Načrtovanje (dimenzioniranje) betonskih voziščnih konstrukcij

Za načrtovanje voziščnih konstrukcij poznamo naslednje postopke (Blab et al., 2012):

- analitične oziroma teoretične postopke,
- empirične postopke,
- numerične postopke po metodi končnih elementov (MKE) in
- standardizirane postopke (standardizirani katalogi voziščnih konstrukcij).

Empirični postopki načrtovanja voziščnih konstrukcij slonijo na empiričnih vrednostih rezultatov, ki so bili pridobljeni iz terenskih preiskav oziroma testov. Razvoj empiričnih postopkov praviloma poteka tako, da pri poznani prometni obremenitvi, dimenzijah voziščne konstrukcije, karakteristikah uporabljenih materialov in poznanih vremenskih vplivih opazujemo obnašanje in/ali deformacije oziroma poškodbe voziščne konstrukcije. Običajno je za pridobitev uporabnih rezultatov potrebno večje število preiskav, pri čemer za rezultate velja, da ni pomembna njihova teoretična razlaga, temveč zgolj uporabna vrednost, ki jo kasneje apliciramo v prakso. Pomanjkljivost dimenzioniranja voziščnih konstrukcij po empiričnih modelih je, da uporaba takih modelov lahko vodi do negospodarne gradnje, saj postopki ne omogočajo optimiziranja dimenzij voziščne konstrukcije. Najbolj znan primer empiričnega testa predstavlja test AASHO, ki so ga v šestdesetih letih prejšnjega stoletja izvedli v ZDA pod okriljem Ameriške zveze za avtoceste in transport. To je bil eden najobsežnejših testov, ki je bil kadarkoli izveden in je obsegal preiskave tako na fleksibilnih kot tudi togih voziščnih konstrukcijah. Na podlagi empiričnih rezultatov testa je bil nato izdan priročnik AASHO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements, ki so ga kasneje večkrat posodobili. Verzija iz leta 1993, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, še vedno predstavlja najbolj uporabljeno metodo za dimenzioniranje na svetu.

Analitične metode načrtovanja voziščnih konstrukcij temeljijo na naslednjih teorijah: teoriji elastičnega polprostora, teoriji plošč in upogibni teoriji. Najbolj znana analitična metoda za dimenzioniranje betonskih vozišč je postopek po Weestergaardu in iz nje razviti postopek po Eisenmannu. Analitične metode so zasnovane na teoretičnih spoznanjih, s pomočjo katerih lahko ocenimo reducirane napetosti v betonski plošči.

MKE predstavlja numerično rešitev matematičnih problemov. V nasprotju z ostalimi metodami predstavlja MKE zelo sofisticirano in močno orodje, s pomočjo katerega lahko določimo napetosti in deformacije, ki se pojavijo zaradi vplivov temperature in prometa. Uporaba takega numeričnega modela je v splošnem dražja, vendar se priporoča v primeru zelo visokih prometnih obremenitev.

Kljub vsemu je tudi v primeru numeričnih in analitičnih metod treba sprejeti določene poenostavitve, predvsem materialne, zato lahko zanesljive rezultate dobimo zgolj s souporabo z empiričnimi metodami in testi.

Standardizirani postopki tako združujejo znanja, pridobljena z znanstvenimi raziskavami in s teoretičnimi osnovami. Prednosti kataloga standardiziranih voziščnih konstrukcij so enostavnejša izvedba načrtovanja, enotnejša cestna mreža, izognitev neustreznim projektnim rešitvam, lažje cenovno vrednotenje medsebojno enakovrednih voziščnih konstrukcij in bistveno manjša možnost za potrebe po spremembah projektov v fazi izvedbe (Jurgele, 2015).

Naj omenimo še, da je kvaliteta temeljnih tal v računskih modelih praviloma privzeta, kar je potrebno pri gradnji doseči z ustreznimi gradbenimi ukrepi. Tlačne napetosti na podlago pod voziščno konstrukcijo so zaradi ugodne razporeditve obremenitve v primeru betonskih vozišč zelo majhne in jih v računih dimenzioniranja praviloma zanemarimo.

4.6.1 Načrtovanje betonskih voziščnih konstrukcij v Sloveniji

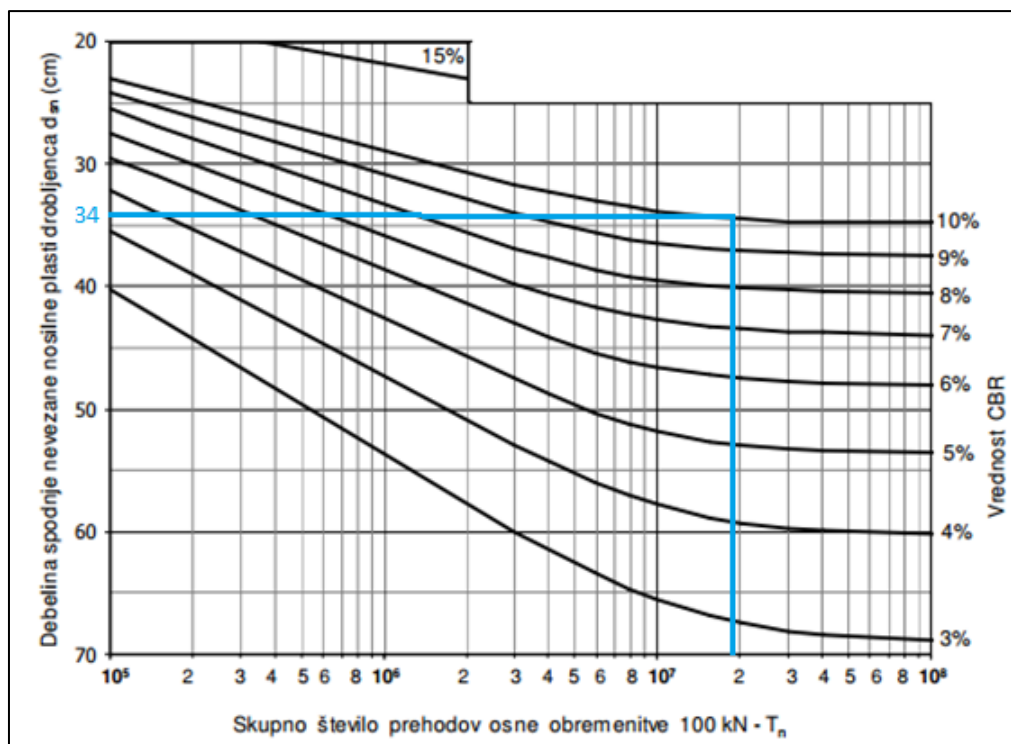
Načrtovanje betonskih voziščnih konstrukcij v Sloveniji poteka v skladu s tehničnimi specifikacijami za ceste TSC 06.530 (2009), ki temeljijo na rezultatih testa AASHO (American Association of State Highway Officials), dopoljenih s preveritvami merodajnih napetosti in deformacij na mejnih površinah posameznih plasti v voziščni konstrukciji.

Osnovni parametri pri tem empiričnem postopku določanja dimenzij voziščnih konstrukcij so:

- doba trajanja (življenjska doba) voziščne konstrukcije,
- uporabnost vozne površine na koncu dobe trajanja,
- nosilnost podlage = posteljice (CBR),
- merodajna dnevna prometna obremenitev (T_d),
- klimatski in hidrološki pogoji (R) in

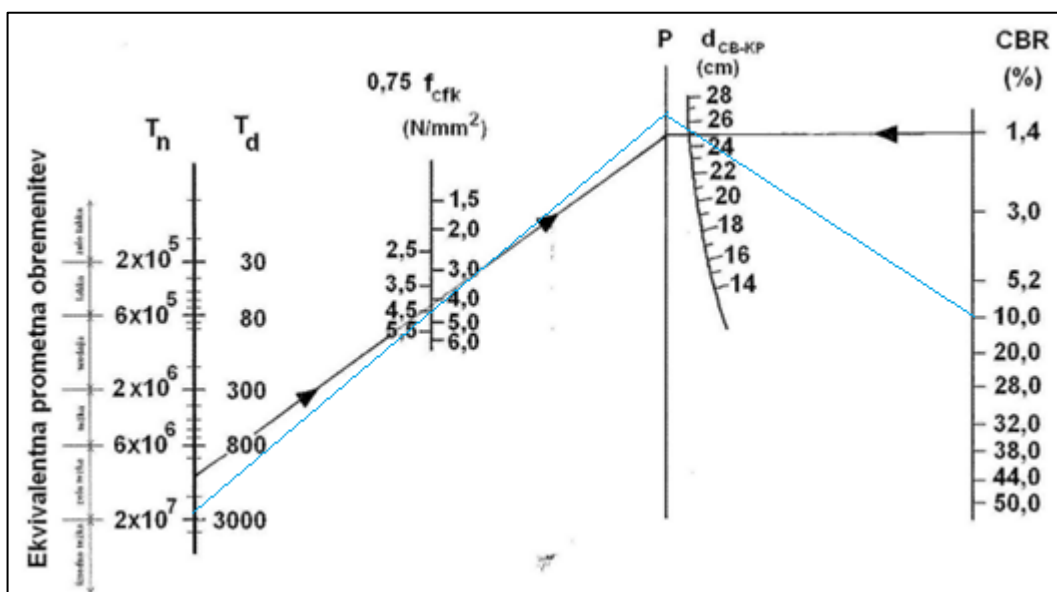
- značilnosti materialov.

Potrebno debelino betonske krovne plasti in plasti nevezane zmesi kamnitih zrn za prevzem v dobi trajanja voziščne konstrukcije načrtovane prometne obremenitve T_n je treba pri določeni vrednosti nosilnosti podlage CBR določiti na osnovi nomograma (slika 4.6) in diagrama (slika 4.5). Načrtovana debelina nevezane nosilne plasti zmesi zrn drobljenca mora znašati v primeru težke obremenitve najmanj 25 cm ter v primeru srednje ali lahke prometne obremenitve najmanj 20 cm. V primeru, da je zaradi slabe nosilnosti podlage in težke prometne obremenitve glede na spodnji diagram (slika 4.5) potrebna nevezana zmes kamnitih zrn drobljenca, debeline več kot 40 cm, je potrebno ustrezno povečati nosilnost podlage. V primeru uporabe prodnatega agregata je potrebno debelino plasti povečati za faktor 0,14/0,11. Debelina bituminizirane nosilne plasti, ki se nahaja med krovno in neveznato nosilno plastjo, mora znašati 5-6 cm in se je ne dimenzionira posebej.



Slika 4.5: Diagram za določitev debeline plasti zmesi kamnitih zrn v nevezani nosilni plasti (TSC 06.530, 2009, str. 9)

Potrebna debelina betonske krovne plasti je odvisna tako od merodajne prometne obremenitve in vrednosti CBR kot tudi od karakteristične upogibne natezne trdnosti (f_{cfk}) vgrajenega betona.



Slika 4.6: Nomogram za določitev debeline betonske krovne plasti (TSC 06.530, 2009, str. 8)

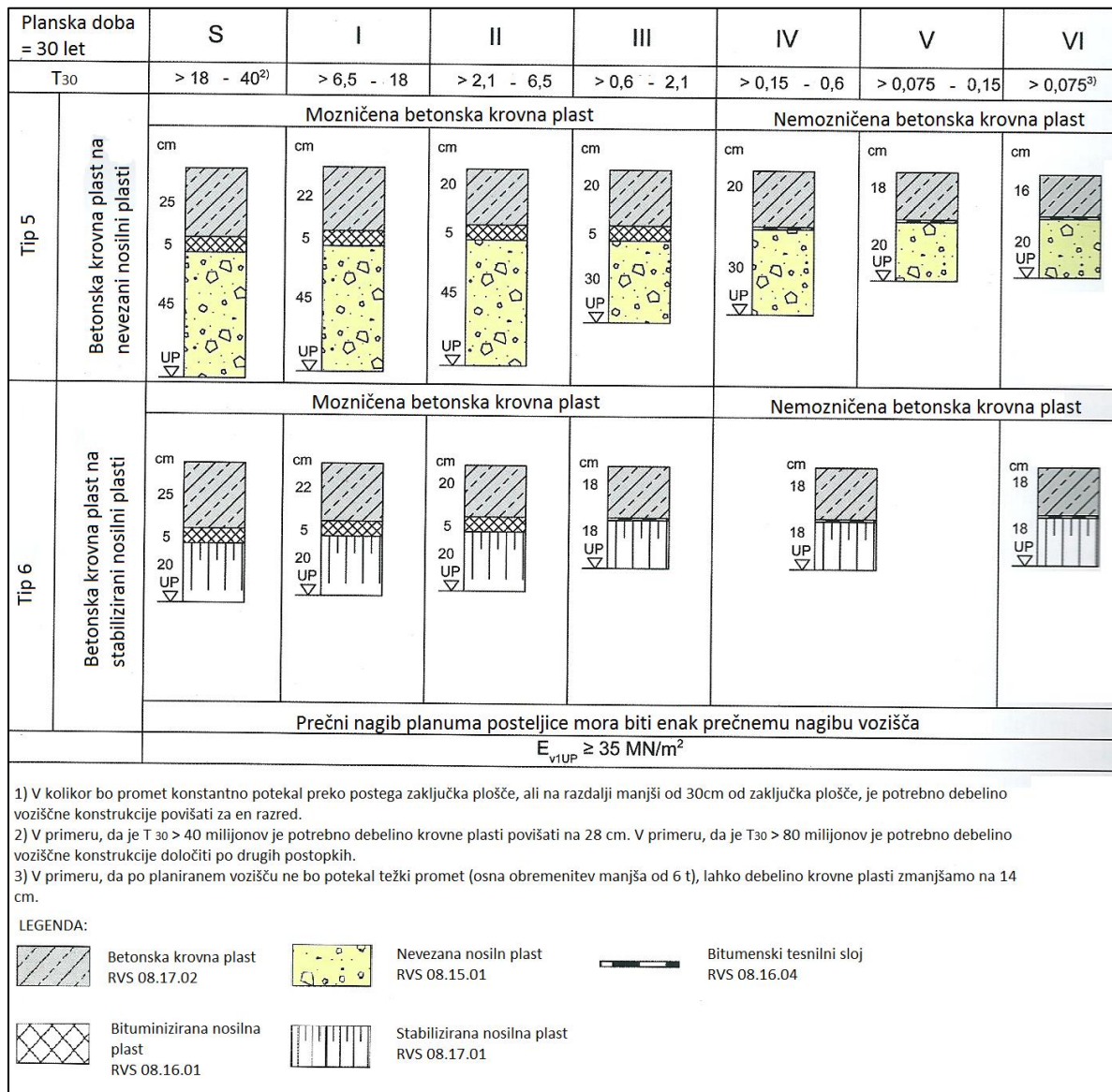
Ocenjevanje ustreznosti zgoraj predstavljenega postopka dimenzioniranja ni predmet te magistrske naloge, vendar bomo kljub temu podali nekaj pomislekov glede uporabe postopka.

Dejstvo je, da je referenčna dokumentacija za opisani postopek dimenzioniranja nastala še pred letom 2000, podlago pa ji predstavljajo empirični rezultati testa AASHO iz šestdesetih let prejšnjega stoletja. Med tem je razvoj materialov oziroma betona močno napredoval, predvsem na račun razvoja dodatkov za beton, ki bistveno pripomorejo k boljšim mehanskim karakteristikam betona. V ZDA so novostim sledili z izdajo programske opreme MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), s katero so nadgradili verzijo standarda AASHO iz leta 1993 z novimi spoznanji iz prakse, medtem ko postopek v TSC ni bil posodobljen.

Eno izmed glavnih prednosti togih betonskih vozišč v primerjavi s fleksibilnimi asfaltnimi vozišči predstavlja daljša planska doba, ki pa se posledično odraža tudi v višjih prometnih obremenitvah, ki nastopijo v življenjski dobi ceste. Ker se betonska vozišča praviloma gradijo predvsem na zelo visoko obremenjenih cestah, so posledično merodajne obremenitve še toliko višje. Zgornji postopek po TSC predvideva plansko dobo 20 let in omogoča načrtovanje voziščnih konstrukcij, katerih merodajne prometne obremenitve ne presegajo 20 milijonov prehodov nazivne osne obremenitve 100 kN. Ker so slovenske avtoceste močno obremenjene, z visokim deležem težkega tovornega prometa, znašajo preračunane merodajne prometne obremenitve za plansko dobo 30 let tudi preko 60 milijonov prehodov nazivne osne obremenitve. Posledično dimenzioniranje voziščnih konstrukcij po postopku v TSC ni mogoče.

4.6.2 Načrtovanje betonskih voziščnih konstrukcij v Avstriji

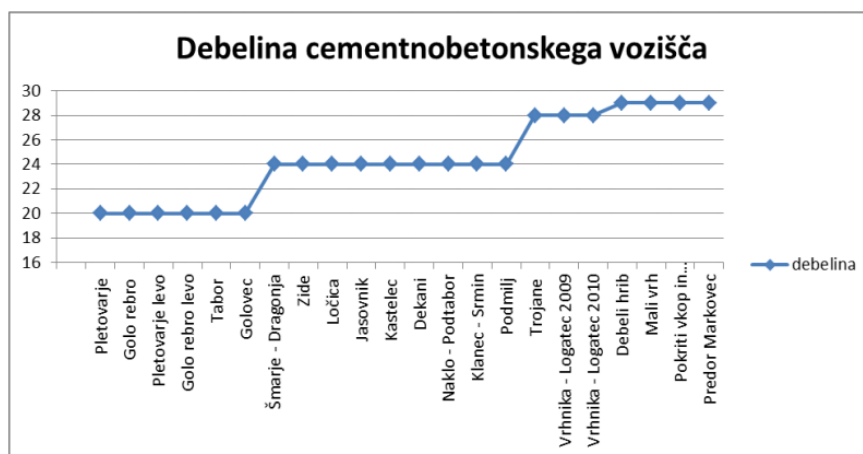
Načrtovanje betonskih voziščnih konstrukcij v Avstriji poteka s pomočjo standardiziranega kataloga voziščnih konstrukcij v skladu z RVS 03.08.63. Dimenzije voziščne konstrukcije se za izbrani tip konstrukcije določi glede na merodajno prometno obremenitev, ki se bo pojavila v 30-letni življenjski dobi, kot je prikazano na sliki 4.7.



Slika 4.7: Prikaz določitve dimenzij voziščne konstrukcije v odvisnosti od merodajne prometne obremenitve v Avstriji (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 68)

S slike 4.7 lahko razberemo, da znaša debelina krovne plasti v primeru najtežje prometne obremenitve (razred S) 25 cm. Slika 4.8 prikazuje debeline krovnih plasti izvedenih betonskih vozišč v Sloveniji.

Opazimo lahko, da se je debelina z leti povečevala, pri čemer je največja znašala 29 cm, 4 centimetre več, kot je to predvideno v Avstriji. Pri tem je potrebno upoštevati, do so bile debeline krovnih plasti v Sloveniji dimenzionirane na plansko dobo 20 let, medtem ko so v Avstriji na 30 let, zaradi česar so merodajne prometne obremenitve zagotovo večje. Ker je večja debelina krovne plasti v Sloveniji lahko tudi posledica blažjih zahtev glede vgrajenega betona, bomo v nadaljevanju pogledali tudi ta vidik. V kolikor ne, bi bilo smiselno razmisliti o manjših izvedbenih debelinah krovnih plasti, kar bi vodilo v večjo konkurenčnost betonskih vozišč.



Slika 4.8: Graf razvoja debeline krovne plasti betonskega vozišča v RS po posameznih projektih (Kavčič in Mrzelj, 2015)

4.6.3 Praktični primer načrtovanja betonskih voziščnih konstrukcij

Prikazali in primerjali bomo dimenzioniranje voziščne konstrukcije po avstrijskem postopku, opisanem v predhodnem poglavju, ter način dimenzioniranja po TSC; določitev prometne obremenitve bomo izvedli po TSC 06.511 (2009) ter določitev dimenzij voziščne konstrukcije v skladu s TSC 06.530 (2009). Izbrani AC odsek Črni Kal – razcep Sermin s PLDP 21320 vozil (Prometne obremenitve, 2014) spada med manj obremenjene avtocestne odseke v Sloveniji. Odsek dnevno v povprečju prevozi 1102 vlačilcev, kar je v primerjavi s posameznimi AC odseki v RS, kjer znaša število vlačilcev preko 3000, relativno malo, zato nam ta odsek omogoča izračun debeline voziščne konstrukcije tudi po postopku, ki je določen v TSC.

Podatki za izračun:

- Kategorija ceste: avtocesta (AC); številka ceste: A1; prometni odsek: Črni Kal – razcep Sermin.
- Dimenzije tipskega prečnega profila: vozni pasovi 4 x 3,75 m, robna pasova: 2 x 0,5 m ter odstavnica pasova 2x 2,5 m.
- Vzdolžni nagib ceste: 1-2 %.

- Planska doba: 30 let; faktor rasti prometa: 2 %.
- Podlaga: CBR = 10%, $E_{v1} > 35 \text{ MN/m}^2$.
- Ugodni klimatski pogoji, globina zmrzovanja = 30 cm (v skladu s TSC 06.512:2003).
- Mehanske karakteristike betona: C35/45, $f_{ck} = 6,0 \text{ N/mm}^2$.

Preglednica 4.9: Prikaz izračuna ekvivalentne dnevne prometne obremenitve po RVS in TSC

| Reprezentativno vozilo | Število | FEv_TSC | T _d _TSC | FEv_RVS | T _d _RVS |
|----------------------------------|----------|-------------|---------------------|---------|---------------------|
| Motorji | 88 | 0,5x0,00003 | 0,0013 | - | - |
| Osebna vozila | 17625 | 0,00003 | 0,26 | - | - |
| Avtobusi | 103 | 1,40 | 144,2 | 0,80 | 82,4 |
| Lahka tovorna vozila | 1687 | 0,005 | 8,4 | - | - |
| Srednja tovorna vozila | 214 | 0,06 | 128,4 | 0,70 | 149,8 |
| Težka tovorna vozila | 222 | 0,7 | 155,4 | 0,70 | 155,4 |
| Težka tovorna vozila s prikolico | 279 | 1,60 | 446,4 | 1,2 | 334,8 |
| Vlačilci | 1102 | 1,60 | 1763,2 | 1,2 | 1322,4 |
| | Σ | - | 2646 | - | 2045 |

Izračun T_{30} po RVS:

$$f_r = \frac{(1+0,02)^{30}-1}{30 \times 0,02} = 1,352 \quad (4.4)$$

$$T_{30} = 2045 \times 365 \times 0,5 \times 1,0 \times 0,75 \times 1,352 \times 30 = 11353124 \quad (4.5)$$

Z 11,35 milijona prehodov nazivne osne obremenitve 100 kN se prometna obremenitev uvršča v I razred prometne obremenitve. Izbrane dimenzije posameznih plasti voziščne konstrukcije so prikazane na sliki 4.8.

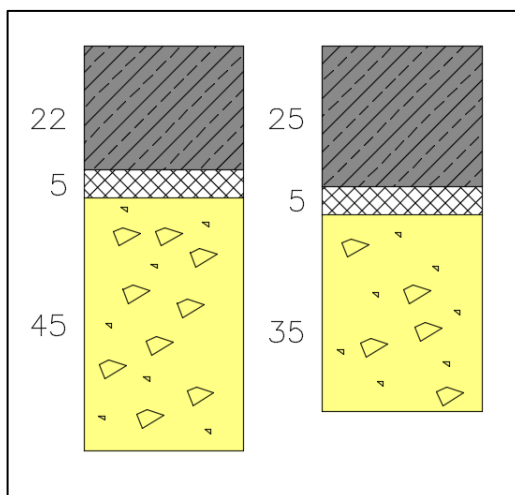
Izračun T_{30} po TSC:

$$T_{30} = 2646 \times 365 \times 0,45 \times 1,0 \times 1,10 \times 1,03 \times 30 \times 1,352 = 19972070 \quad (4.6)$$

$$h_{min} = 0,6 \times 30 = 18 \text{ cm} \quad (4.7)$$

Merodajna prometna obremenitev izračunana po TSC 06.511 (2009) znaša 19,97 milijona prehodov nazivne osne obremenitve 100 kN, s čimer se prometna obremenitev uvršča v razred zelo težke prometne

obremenitve. Določitev debeline nevezane nosilne plasti je prikazana na sliki 4.5, določitev debeline krovne plasti pa na sliki 4.6. Preverili smo tudi minimalno potrebno debelino voziščne konstrukcije zaradi vpliva zmrzovanja, ki znaša 18 cm. Izračunana debelina voziščne konstrukcije (slika 4.9), ki znaša 65 cm, izpolni ta pogoj.



Slika 4.9: Prikaz debeline voziščne konstrukcije po posameznih slojih; levo – dimenzije po RVS, desno – dimenzije po TSC

Primerjava dimenzij sprojektiranih voziščnih konstrukcij po postopkih, podanih v TSC in RVS, pokaže, da je debelina krovne plasti v primeru postopka po RVS manjša za 3 cm, medtem ko je debelina nevezane nosilne plasti večja za kar 10 cm. Ker je naloga te magistrske naloge predvsem prikazati in opozoriti na razlike med obravnavanimi standardi, ustreznosti izbranih dimenzij ne bomo ocenjevali.

Če bi želeli v RS predpisati 30-letno plansko dobo voziščnih konstrukcij, bi bilo treba posodobiti način načrtovanja debelin voziščne konstrukcije, saj trenutni postopek, opisan v TSC 06.530 (2009), tega v primeru prometnih obremenitev, ki presegajo 20 milijonov prehodov nazivne osne obremenitve 100 kN, ne omogoča. Predlagamo (začasno) uporabo standardiziranih katalogov voziščnih konstrukcij, ki jih uporabljajo v Avstriji in smo jih predstavili v predhodnih poglavjih te naloge. Prav tako je pri pripravi podlage smiselna vzporedna uporaba slovenskih in avstrijskih zahtev. V primeru odstopanja se izbere strožji kriterij.

5 ZAHTEVE ZA SESTAVINE BETONSKE MEŠANICE

5.1 Splošno

Zahteve za cementni beton, ki se uporablja za izvedbo krovnih plasti voziščnih konstrukcij, so postavljene zelo visoko, saj morajo vozišča zagotavljati ustrezno prometno varnost ter udobno vožnjo, istočasno pa kljubovati zahtevnim zunanjim vplivom. V prvi vrsti gre tukaj za prometne obremenitve, poleg tega pa tudi za zmrzovanja in tajanje, večje temperaturne spremembe ter spremembe vlage.

Doseganje ustreznih karakteristik vozne površine je poleg tehnike gradnje ter kvalitetnega vzdrževanja v prvi vrsti odvisno od kvalitete betona oziroma komponent, ki se vanj vgradijo.

Bistvene zahteve za svež beton (Blab et al., 2012):

- homogenost mešanice,
- dobra obdelavnost,
- zadosten čas obdelave ter
- pri uporabi metode drsnega opaža zadostna zgodnja trdnost.

Zahteve za strjeni beton oziroma voziščne konstrukcije (Blab et al., 2012):

- visoka natezna trdnost (odpornost na deformacije in tvorbo razpok),
- visoka odpornost proti obrabi,
- visoka odpornost proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti sredstev za tajanje in
- dobra kakovost površine (ravnost, odpornost proti drsenju, hrup, barva, odboj svetlobe (albedo), sposobnost hitrega odvodnjavanja).

Za zagotavljanje navedenih lastnosti betona morajo komponente betona ter ostali gradbeni materiali zadostiti predpisanim zahtevam, navedenim v nadaljevanju.

5.2 Standardizacija

V Evropski Uniji so bistvene zahteve za gradbene proizvode določene z Uredbo (EU) št. 305/2011 Evropskega parlamenta in Sveta, ki zavezuje vse članice EU, da svojo zakonodajo uskladijo z uredbo. Za implementacijo uredbe v Sloveniji skrbi Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro, Uradni list RS, št. 52/00), ki ureja pogoje za plasiranje gradbenih proizvodov na trg (Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo, 2016). Zakon za posamezne gradbene proizvode predpisuje uporabo harmoniziranih standardov EU oziroma nacionalnih standardov, kadar je posameznim državam dopuščeno, da lahko določijo dodatne zahteve za proizvod, ki so značilne za mesto uporabe. Gre za standarde, katerih uporaba

ustvari domnevo o skladnosti gradbenih proizvodov z zahtevami Zakona o gradbenih proizvodih, zato je njihova uporaba obvezna. Dodatno lahko države članice izdajo tehnične specifikacije, ki predpisujejo tehnične zahteve, ki jih mora izpolnjevati proizvod, proces ali storitev in imajo nižji status od standarda. Uporaba tehničnih specifikacij ni obvezujoča, razen če ni to drugače določeno s tehničnim predpisom.

Področje betonskih vozišč na nivoju EU urejajo standardi EN 13877-1, EN 13877-2 ter EN 13877-3. Gre za standarde, ki določajo, da morajo biti komponente betona, funkcionalne zahteve za betonska vozišča ter vgrajeni gradbeni materiali v skladu z ostalimi EU standardi. Medtem konkretne tehnične karakteristike vozišč ter področje dimenzioniranja niso določeni in so tako prepuščeni posameznim državam članicam, da le-te predpišejo zahteve v nacionalnih standardih, tehničnih specifikacijah itd.

Specifikacije, lastnosti, proizvodnja in skladnost betona so v RS določene z evropskim standardom SIST EN 206:2013 ter nacionalnim dodatkom k temu standardu SIST 1026:2016. Omenjena standarda se nanašata na številne referenčne standarde za proizvode, preskušanje in postopke, katerih določila morajo biti izpolnjena za sestavine betona ter proces proizvodnje in vgradnje betona.

Tehnične zahteve za krovne plasti, materiale ter za način in kakovost izvedbe vezanih obrabnonosilnih plasti s hidravličnimi vezivi v cestogradnji (betonske krovne plasti) v RS podaja tehnična specifikacija za ceste TSC 06.420 iz leta 2003. Vsebine te TSC ni mogoče tolmačiti in izvajati na način, ki bi preprečeval ali pogojeval ustrezno uporabo gradbenih proizvodov, danih v promet v skladu z zahtevami Zakona o gradbenih proizvodih, z drugimi besedami, uporaba TSC ni obvezna, razen če ni to posebej zahtevano.

5.3 Cement

Specifične lastnosti gradnje cest, kot so delo v praktično vseh vremenskih razmerah in stalno spreminjanje mesta gradnje, narekujejo skrbno izbiro komponent betonske mešanice. Ker gradnja vozišča poteka tudi v poletnem času, ko so temperature zelo visoke, beton pa je treba dostavljati iz bližnjih betonarn, potrebujemo za izvedbo voziščnih konstrukcij beton, ki bo v danem primeru sposoben ohranjati svojo obdelavnost. To lahko zagotovimo na več načinov, posebej dandanes, ko trg ponuja številne kemijske dodatke, vendar pa je v osnovi bistvena izbira ustreznega cementa. Cement z relativno poznim začetnim časom vezanja in s počasnejšim razvojem hidratacijske toplote se zato zdi smiselna izbira. Na ti dve lastnosti ima poleg mineralne sestave veziva velik vpliv tudi finost mletja, zato se za betonska vozišča priporočajo bolj grobo mleti cementi. Nižja specifična površina cementa ugodno vpliva tudi na zmanjševanje krčenja betona in posledično zmanjševanje pojava razpok, kar je še ena izmed zelenih lastnosti betonskega vozišča. Posamezne zahteve, kot sta odpornost betona proti alkalno-silikatni reakciji in odpornost proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli, zavisijo od pogojev okolja (klimatskih razmer, razpoložljivosti kvalitetnega agregata) in se spreminjajo od države do države. Zaradi

pomanjkanja kvalitetnega agregata, odporne proti alkalno-silikatni reakciji, imajo nekatere države strožje omejitve glede vsebnosti alkalij v cementu, spet druge odsvetujejo uporabo cementov z dodatkom elektrofiltrskega pepela zaradi neugodnega vpliva le-tega na zmrzlinsko odpornost betona. Svetlost končne površine ter zmanjševanje ogljičnega odtisa pa sta parametra, ki postajata vse pomembnejša in na katera prav tako lahko vplivamo z ustrezno izbiro cementa.

Cementi, ki se uporabljajo v državah članicah EU, morajo biti skladni s standardom EN 197-1. Standard cemente glede na sestavo razvršča v 5 glavnih vrst, in sicer:

- CEM I – portlandski cement,
- CEM II – portlandski mešani cement,
- CEM III – žlindrin cement,
- CEM IV – pucolanski cement in
- CEM V – mešani cement.

V Nemčiji, kot državi z eno najbolj razvitih tradicij gradnje betonskih vozišč, je za uporabo predpisan cement vrste CEM I (CEM I 32.5 R ali CEM I 32,5 N). Pri tem je zahtevano, da Blaine vrednost cementa ne presega $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$, vsebnost alkalij (izražena kot ekvivalent Na_2O) je omejena na 0,8 %, standardna konsistenca mora biti nižja ali enaka 28 %, dvodnevna tlačna trdnost pa ne sme presegati 29 N/mm^2 . Pogojno, če se naročnik strinja, je dovoljena tudi uporaba portlandskih mešanih cementov, in sicer CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T in CEM II/A-LL trdnostnih razredov 32,5 R ali 42,5 N, ter žlindrene cementa vrste CEM III/A, ki pa mora doseči vsaj trdnostni razred 42,5. Začetni čas vezanja mora biti pri vseh cementih daljši od 120 minut, medtem ko so specifična površina, dvodnevna tlačna trdnost ter standardna konsistenca omejene zgolj pri CEM I (Grünwald in Peck, 2015).

Podobno kot v Nemčiji uporabljajo za izvedbo voziščnih konstrukcij cement CEM I tudi na Češkem in v Belgiji. Poleg CEM I v Belgiji uporabljajo tudi žlindrin cement (CEM III/A) trdnostnega razreda vsaj 42,5 ter z omejeno vsebnostjo alkalij na 0,9 %, in sicer zaradi težav z alkalno-silikatno reakcijo (U.S. Department of Transportation, 2014).

V državah z milejšimi zimami, kot sta na primer Nizozemska in Španija, je mogoča uporaba tudi portlandskih cementov z dodatkom elektrofiltrskega pepela. To dokazujejo uspešne izkušnje iz prakse, ki jih imajo z uporabo CEM II/A-V 42,5 R v Španiji ter CEM II/B-V 32.5 R na Nizozemskem. Uporaba cementa z dodatkom elektrofiltrskega pepela oziroma žindre na Nizozemskem ni obvezna, je pa priporočena oziroma zaželeno.

V Franciji in Avstriji se za izdelavo betonskih voziščnih konstrukcij uporablja portlandski mešani cement z dodatkom žindre. V Avstriji je uporaba cementov CEM II/A-S ali CEM II/B-S predpisana v nacionalnih Pravilih in predpisih za cestno upravo (RVS 8S.06.32), nekakšni različici slovenskih TSC-

jev, njihova uporaba pa je obvezna za vse javne ceste. Za zagotavljanje visokih kriterijev, ki jih zahtevajo močno obremenjena betonska vozišča, imajo za cement za betonska vozišča predpisane dodatne zahteve (Blab et al., 2012):

- Začetni čas vezanja mora znašati minimalno 120 min.
- 28-dnevna upogibna natezna trdnost mora znašati vsaj 7 MPa.
- Maksimalna specifična površina (Blaine vrednost) je navzgor omejena na 4000 cm²/g.
- Temperatura cementa pred pripravo betona mora biti manjša od 80 °C (previsoka temperatura betona vpliva na obdelavnost in poveča nevarnost pojava razpok, povišanje temperature cementa za 7 °C pa se odraža v zvišanju temperature betonske mešanice za 1 °C).

Ker je tehničnim specifikacijam za javne ceste TSC 06.420 (2003) kot referenčni dokument služila knjiga o nemških izkušnjah in predpisih glede gradnje betonskih vozišč (Straßenbau heute, Betondecken, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1995), so zahteve glede izbire cementa v RS praktično iste kot v Nemčiji. TSC tako navaja, da so za proizvodnjo mešanic cementnega betona za krovne plasti voziščnih konstrukcij primerne vrste cementov, opredeljene v SIST EN 197-1, in sicer CEM I (trdnostnega razreda 32,5), v posebnih primerih pa so uporabne tudi vrste cementov CEM II/A-S, CEM II/B-S in CEM III/A (trdnostnega razreda 42,5). Poleg tega mora biti zagotovljena enakomerna kakovost uporabljenega cementa, zlasti kemijska sestava, finost mletja in čas vezanja. Konkretni vrednosti za našteje karakteristike cementa pa v tehničnih specifikacijah niso podane.

5.4 Agregat

Mineralni agregat zajema približno 70 % prostornine betona in v splošnem predstavlja njegovo glavno in najtršo sestavino. Betonu daje skelet ter ima bistven vpliv na lastnosti tako svežega kot strjenega betona.

Mineralni agregat razvrščamo glede na:

- način nastanka: magmatski, metamorfni, sedimentni,
- način priprave in obliko: prodnat in drobljen agregat.

Za pripravo betona se v splošnem uporabljajo tako prodnati kot drobljeni agregati. Prodnati agregati zaradi svojih zaobljenih zrn omogočajo lažje vgrajevanje betona. Poraba vode je manjša in posledično je manjše tudi vodocementno razmerje. Zaradi nehomogenosti lahko prodnati agregati vsebujejo visok delež organskih snovi in zaradi slabše kontrole mineraloške sestave predstavljajo večjo nevarnost za alkalno-silikatno reakcijo v betonu. Drobljen agregat je bolj homogen, zrna se zaradi ostrih robov med

seboj zaklinjajo, kar pripomore k izboljšanju mehanskih lastnosti betona (višja tlačna trdnost), vendar pa negativno vpliva na obdelavnost betona.

Beton, primeren za izvedbo betonskih vozišč, mora izpolnjevati zahtevne kriterije glede odpornosti in trajnosti, katerih ne bi bilo moč doseči brez kvalitetnega mineralnega agregata. Ker so zrna agregata bolj trda in odporna na obrabo kot cementni kamen, odigra agregat bistveno vlogo pri zagotavljanju ustrezne torne sposobnosti obrabne plasti voziščne konstrukcije. Ustrezne reološke in mehanske lastnosti betona dosežemo s previdno izbiro zrnastostne sestave agregata. Z zrnastostno sestavo namreč vplivamo na potrebo po vodi, vsebnost por v betonu, obdelavnost betona, trdnost betona itd.

Pri agregatu, ki ga bomo uporabili za izdelavo betona za krovno plast vozišča, je treba kontrolirati naslednje lastnosti (Blab et al., 2012):

- Zrnastostno sestavo; za doseganje predpisanih lastnosti betona je treba nujno s čim manjšimi odstopanji upoštevati predpisane zrnastostne krivulje.
- Gostoto agregata; majhna odstopanja od zahtevanih vrednosti so prvi pogoj za enakomerna zrna.
- Kategorijo zrnastosti; delež najmanjših in največjih zrn je omejen.
- Obliko zrn; ploščata in ostra zrna agregata zmanjšujejo obdelavnost betona.
- Vsebnost primesi iz morja; školjke znižujejo kvaliteto agregata.
- Vsebnost finih delcev ($< 0,063$ mm); prevelik delež finih delcev dviguje potrebo po vodi oziroma znižuje obdelavnost betona.
- Odpornost proti drobljenju; za večjo obstojnost vozišča.
- Odpornost proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli; kljub ustrezni betonski mešanici, beton z agregatom, ki ni odporen na zmrzovanje, ni odporen proti zmrzovanju in tajanju ob prisotnosti soli.
- Prisotnost sulfatov; v prevelikih količinah sulfati povzročajo sulfatno korozijo betona.
- Odpornost proti alkalno-silikatni reaktivnosti; alkalno-silikatna reakcija je kemična reakcija med alkalijami, ki jih v beton vključimo s cementom in z reaktivnimi minerali oziroma s kamninami v zrnih agregata. Pri reakciji nastane nabrekli gel, ki povzroča poškodbe betona.

Dodatno je za agregat v obrabni plasti vozišča potrebno kontrolirati še (Blab et al., 2012):

- Delež lomljenega agregata; lomljena zrna zagotavljajo ustrezne torne lastnosti na cestišču in ustrezno visoko natezno trdnost betona.
- Odpornost proti obrusu: majhen obrus materiala je bistven za zagotavljanje tornih lastnosti na dolgi rok.

5.4.1 Zahteve za agregat v Sloveniji

Tehnične zahteve glede mineralnega agregata za krovne plasti voziščnih konstrukcij v RS predpisuje tehnična specifikacija za ceste (TSC 06.420:2003) iz leta 2003. Od takrat so se določene zahteve glede osnovnih sestavin in kvalitete betona spremenile. Podane so v najnovejši izdaji standarda SIST 1026:2016.

Tako kot vsi agregati, ki jih uporabljamo za izdelavo betona, mora tudi mineralni agregat (zmes kamnitih zrn) za krovne plasti voziščnih konstrukcij izpolnjevati zahteve, podane v standardu SIST EN 12620:2013. Za obrabne plasti voziščnih konstrukcij moramo uporabiti agregat, proizveden iz silikatnih kamnin eruptivnega porekla, za spodnjo plast betona v krovni plasti voziščne konstrukcije pa lahko uporabimo tudi agregat iz karbonatnih kamnin sedimentnega porekla.

Tehnične specifikacije predpisujejo, da mora biti mineralni agregat za cementni beton za obrabno plast odporen proti škodljivim učinkom zmrzovanja ter proti obrabi, zaglajevanju in drobljenju. Zahteve, ki trenutno veljajo za agregat v obrabni plasti voziščne konstrukcije v Sloveniji, so združeno predstavljene v preglednici 5.1. Agregatu, ki se vgrajuje v spodnjo plast betona, ni treba izpolnjevati predpisanih zahtev iz preglednice 5.1. Izjema je odpornost proti drobljenju, kjer vrednost količnika Los Angeles ne sme biti višja od LA₃₀.

Preglednica 5.1: Zahteve v RS za agregat v obrabni plasti betonske voziščne konstrukcije

| Zahteva | Kategorija | |
|--|--|------------------|
| Odpornost proti zaglajevanju | PSV ₅₀ | |
| Odpornost proti obrabi | M _{DE25} | |
| Odpornost proti drobljenju | XM1 | LA ₃₅ |
| | XM2 | LA ₂₅ |
| | XM3 | LA ₂₀ |
| Odpornost proti zmrzovanju in tajanju | ne vsebuje slabih zrn | |
| | vodovpojnost zrn ni večja od 1 % | |
| | delež odkruškov ni večji od 1 % – F ₁ | |
| | pri večji vodovpojnosti delež odkruškov pri preskusu zmrzovanja in tajanja ni večji od 18 m. – % (NS18) | |
| Odpornost proti alkalno-silikatni reakciji | za agregat slovenskega izvora je treba odpornost preveriti zgolj za agregate iz porečij Mure in Drave (v skladu z SIST EN 12620) | |

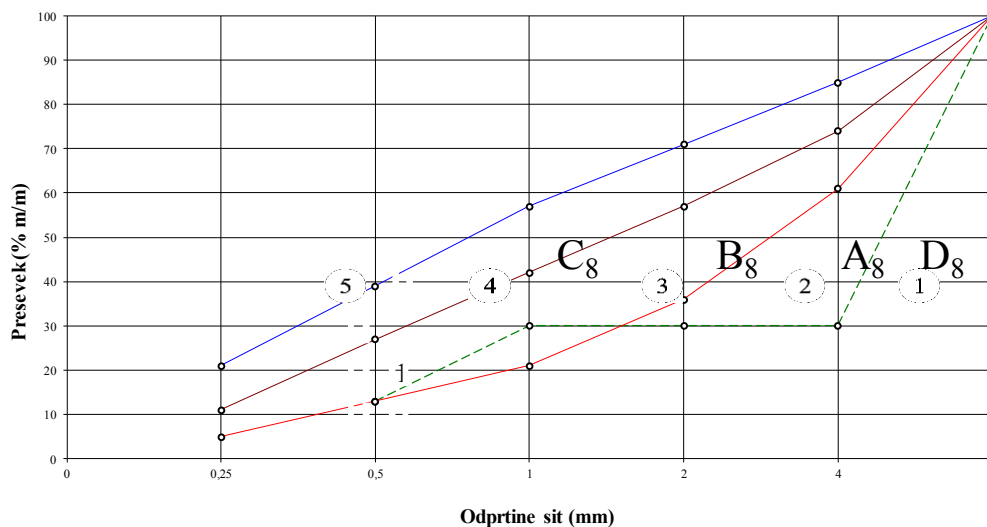
Glede geometrijskih lastnosti zrn agregata TSC opredeljuje zgolj največje kamnito zrno v mešanici betona (D_{max}), ki ne sme biti večje od 1/4 načrtovane debeline plasti oziroma sloja betona. V mešanici betona za ojačene nosilne plasti, pa mora biti največje kamnito zrno manjše od 1/3 razmika med

vzdolžnimi jeklenimi palicami (oziroma za 5 mm manjše od svetle razdalje med vzporednimi armaturnimi palicami po SIST 206:2013). Določen je še odstotek drobljenih zrn agregata za obrabno plast, in sicer:

- za težko prometno obremenitev najmanj 90 % mase drobljenih zrn in
- za srednjo in lahko prometno obremenitev najmanj 50 % mase drobljenih zrn.

TSC ne obravnava zrnastostne sestave mešanice agregata, so pa priporočene krivulje zrnastosti podane v standardu SIST 1026:2016, v dodatku NB. Standard dodatno dovoljuje, da je lahko zrnastost mešanice agregata za pripravo betona zvezna ali nezvezna (brez ene ali dveh srednjih frakcij). Na sliki 5.1 so prikazane priporočene mejne krivulje zrnastosti za mešanico agregata 0/8, pri čemer območje 3 predstavlja idealno območje. Omenimo še, da so iste mejne krivulje zrnastosti predpisane tudi v Nemčiji.

Ostale zahteve, kot so na primer vsebnost in kakovost finih delcev, kategorija zrnastosti itd., v slovenskih standardih niso eksplicitno zahtevane za betonska vozišča. Veljajo pa posredne omejitve, ki so v splošnem predpisane za betone v standardih SIST 1026:2016 in SIST EN 206:2013. Primer take zahteve je, da je pri izdelavi betona z uporabo kemijskega dodatka na bazi lignosulfonatov potrebno uporabiti frakcijo 0/4 mm s kategorijo vsebnosti finih delcev največ f_{10} .



Slika 5.1: Priporočene mejne krivulje zrnastosti za mešanico agregata 0/8 (SIST 1026:2016)

5.4.2 Zahteve za agregat v tujini – Avstrija

Za obrabne plasti betona se v Avstriji uporablja agregat, proizveden iz silikatnih kamnin eruptivnega porekla, kot sta na primer diabaz in bazalt. Dovoljena je tudi uporaba zrn iz umetnega kamna (elektrokorund, silicijev karbid), ki imajo visoko odpornost proti mehanskim obrabam. Za cementni beton za spodnjo plast je tako kot v RS dovoljena uporaba agregatov iz karbonatnih kamnin sedimentnega porekla. Prav tako lahko za spodnjo plast betona uporabimo tudi recikliran agregat, ki ga pridobimo z reciklažo starih betonskih vozišč.

Zahteve za agregat, vgrajen v krovno plast voziščne konstrukcije, so ločeno za obrabno plast in spodnjo plast betona podane v preglednicah 5.2 in 5.3. Opazimo lahko, da so zahteve v primerjavi s slovenskimi ostrejšje in jih je več. Standard bolj podrobno določa geometrijo zrn agregata ter vsebuje krivulje zrnivosti, ki so specificirane posebej za betonska vozišča.

Preglednica 5.2: Zahteve za agregat za spodnjo plast betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 23)

| Zahteva | Kategorija |
|--|--|
| Zahteve glede vsebovanih frakcij agregata | D = 22 ali D = 32, tri skupine zrnitosti, od tega ena z maksimalno D = 4 mm velikostjo zrna, ostali z minimalno d = 4 mm |
| Prostorninska masa | Deklarirana vrednost $\pm 30 \text{ kg/m}^3$ |
| Kategorija zrnivosti D > 4 mm; | G _C 90/15 ali G _C 85/20 |
| Kategorija zrnivosti D < 4 mm; | G _F 85 |
| Modul oblike zrn | SI ₄₀ |
| Vsebnost školjk | SC ₁₀ (odstotek školjk < 10 %) |
| Vsebnost finih delcev v grobem agregatu | f _{1,5} ; (procent mase delcev, manjših od 0,063 mm < 1,5 %) |
| Vsebnost finih delcev v drobnem agregatu | f ₁₀ (procent mase finih delcev < 10 %) |
| Odpornost proti zmrzovanju in tajanju D > 4mm | F ₁ |
| Odpornost proti zmrzovanju in tajanju D < 4 mm | F ₁ |
| Vsebnost kislinsko topnega sulfata | AS _{0,8} |
| Odpornost proti alkalno-silikatni reakciji | Razred zahtevnosti 2 v skladu z ÖNORM B 3100 |

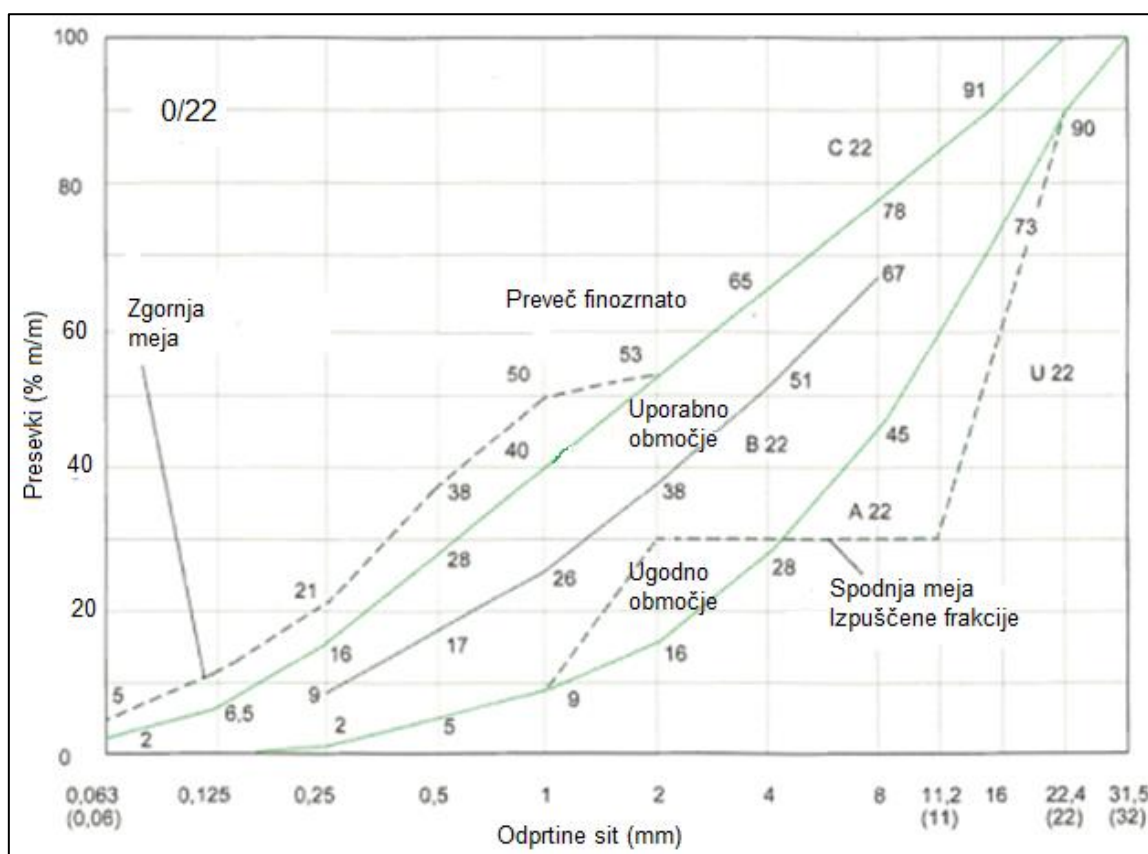
| | |
|--|---|
| Zrnavostna krivulja za $D = 22$ in $D = 32$ mm | Glej graf; sejalna krivulja AC22 ter AC32 |
|--|---|

Preglednica 5.3: Zahteve za agregat za zgornjo, obrabno plast betona (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 23)

| Zahteva | Kategorija |
|---|---|
| Zahteve glede vsebovanih frakcij agregata za $D=8$ in $D=11$ (metoda izpostavljenih zrn agregata) | frakcija 0/1 ali 0/2 ter $D = 8: 4/8,$ $D = 11: 4/8+8/11$ ali 4/11 |
| Zahteve glede vsebovanih frakcij agregata $D \geq 16$ (za primer metličenja) | tri frakcije, od tega ena z $D = 4$ mm, ostale z $d = 4$ mm; frakcijo 4/8 lahko izpustimo |
| Prostorninska masa | deklarirana vrednost $\pm 30 \text{ kg/m}^3$ |
| Kategorija zrnivosti $D > 4$ mm | kategorija $G_c 90/15$; v primeru $D \geq 16$ lahko $G_c 85/20$ |
| Sestava zrn agregata $D < 4$ mm | $G_f 85$ |
| Modul oblike zrn | SI_{40} ; pri metodi izpostavljenih zrn z zrni $D > 4$ imamo SI_{15} |
| Vsebnost školjk | SC_{10} |
| Vsebnost finih delcev v grobem agregatu | $f_{1,5}$ |
| Vsebnost finih delcev v drobnem agregatu | f_{10} |
| Odstotka lomljenih površin zrn grobega agregata | minimalno 90 % lomljenih zrn, od tega minimalno 30 % brez zaobljenih strani in maksimalno 1 % okroglih zrn. |
| Odpornost proti drobljenju (frakcija 8/11) | LA_{20} |
| Odpornost proti zaglajevanju $D > 4$ mm | PSV_{50} |
| Odpornost proti zaglajevanju $D \leq 4$ mm | $PWS \geq 0,50$ (po RVS 11.06.23) |
| Odpornost proti zmrzovanju in tajanju $D > 4$ mm | F_1 |
| Odpornost proti zmrzovanju in tajanju $D < 4$ mm | F_1 |
| Vsebnost kislinsko topnega sulfata | $AS_{0,8}$ |

| | |
|---|---|
| Odpornost proti alkalno-silikatni reakciji | Razred zahtevnosti 2 v skladu z ÖNORM B 3100 |
| Delež zrn ≥ 4 mm, v mešanici agregata z D = 8 ali D = 11 | ≥ 68 % ali 65 % pri betonu, ki vsebuje plastifikator |
| Zrnavostna krivulja za D = 22 | glej sliko 5.2 |

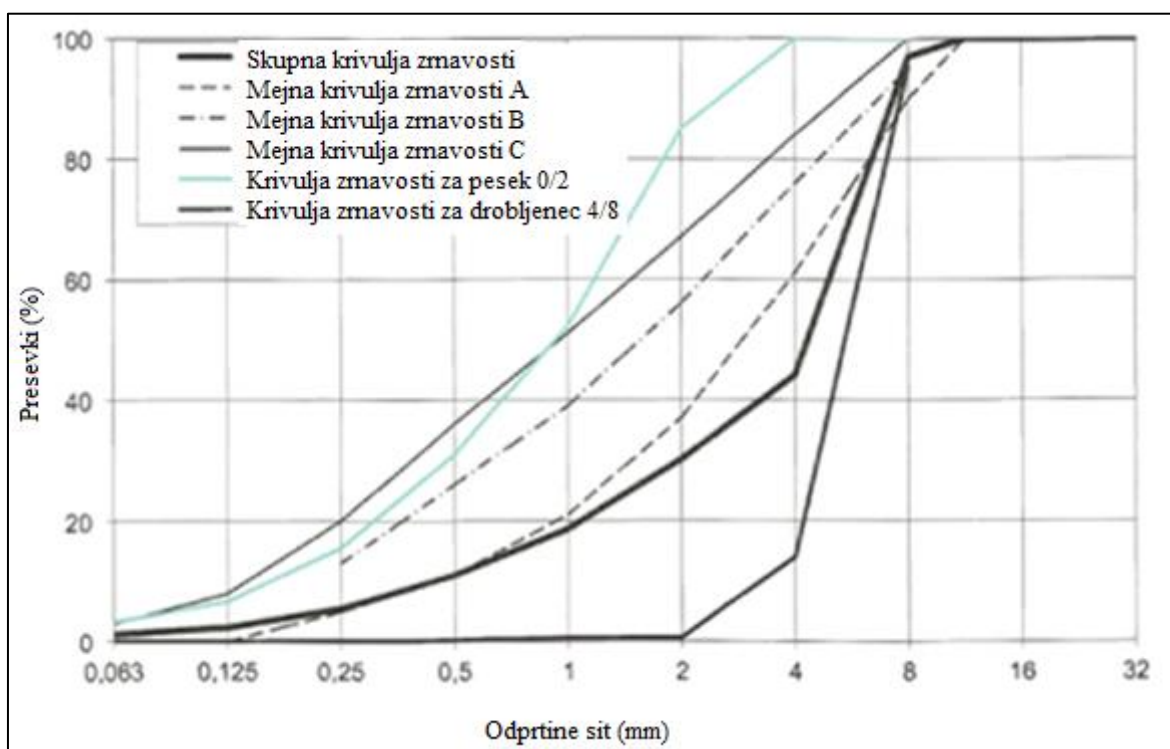
Na sliki 5.2 so prikazane priporočene mejne krivulje zrnivosti mešanice agregata v krovni betonski plasti. Agregat, ki se nahaja v območju A22, vsebuje preveč grobih zrn, zato se tak beton težko obdeluje. Agregat v območju C22 vsebuje preveč finih zrn, kar se odraža v veliki potrebi po vodi in je zato neprimeren za uporabo. Območje B22 predstavlja najbolj ugodno in uporabno območje.



Slika 5.2: Priporočene mejne krivulje zrnivosti mešanice agregata za beton krovne plasti voziščne konstrukcije (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 29)

Poseben primer pri izdelavi betonskih površin predstavljajo obrabne betonske površine, izvedene po metodi izpostavljenih zrn agregata. Za doseganje zahtevane specialne teksture takih površin je treba uporabiti posebno zrnavostno sestavo agregata. Beton sestoji iz zrn peska frakcije 0/1 ali 0/2, cementa in vode, nakar se doda grobi agregat frakcije 4/8 ali 4/8 in 8/11. Beton se po vgradnji poškopri z

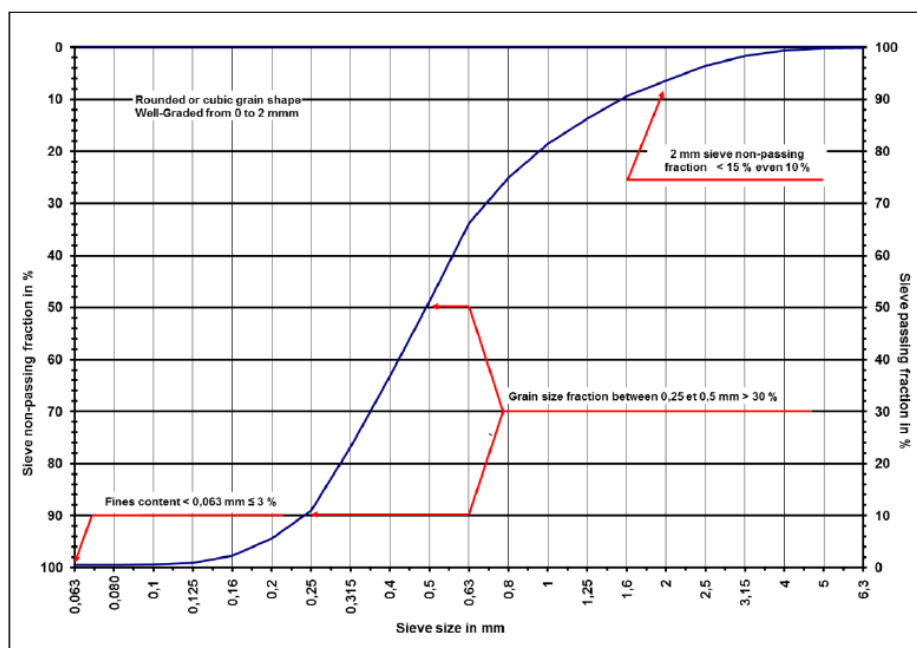
zavlačevalcem vezanja. Zaradi izbrane zrnivosti (manjkajo določene frakcije agregata) je mogoče odstraniti (sprati) zgornji sloj veziva (cca 1–2 mm) po tem, ko se spodnja plast strdi. Na ta način izpostavimo zrna grobega agregata in dobimo tako imenovano površino po metodi izpostavljenih zrn agregata. Spodnja slika (slika 5.3) prikazuje priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8, ki se uporablja za obrabne plasti vozišča in je primeren za obdelavo po metodi izpostavljenih zrn agregata. Prav tako je prikazana krivulja zrnivosti za peske 0/2, ki, kot bomo videli v nadaljevanju, pomembno vplivajo na tvorbo por v betonu in njegovo potrebo po vodi.



Slika 5.3: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8 (prirejeno po Blab et al., 2012, str. 29)

Medtem ko groba zrna agregata vplivajo predvsem na mehanske lastnosti betona, kot so trdnost, torna sposobnost itd., se vpliv peska v betonu kaže predvsem v potrebi po vodi in s tem povezani obdelavnosti. Pesek, ki vsebuje preveliko količino finih delcev, izkazuje visoko potrebo po vodi, medtem ko peski s previsokim deležem grobih zrn (30 % zrn, večjih od 2 mm) lahko povzročijo izcejanje vode in segregacijo betona.

Ker beton za betonska vozišča zahteva zelo nizko vodocementno razmerje, je torej smiselno še dodatno pozornost posvetiti izbiri peska. Dosedanje raziskave so pokazale, da za najbolj ustreznega velja naravni prodnat pesek z vsebnostjo finih delcev pod 3 % ter vsebnostjo srednje velikih zrn nad 30 % (0,25–0,5 mm). Prav tako je omejen odstotek zrn, večjih od 2 mm, ki naj ne bi presegal 10–15 %. Zaželeno je tudi, da so vsa zrna čim bolj zaobljena. Optimalna zrnovostna krivulja peska je prikazana na sliki 5.4.

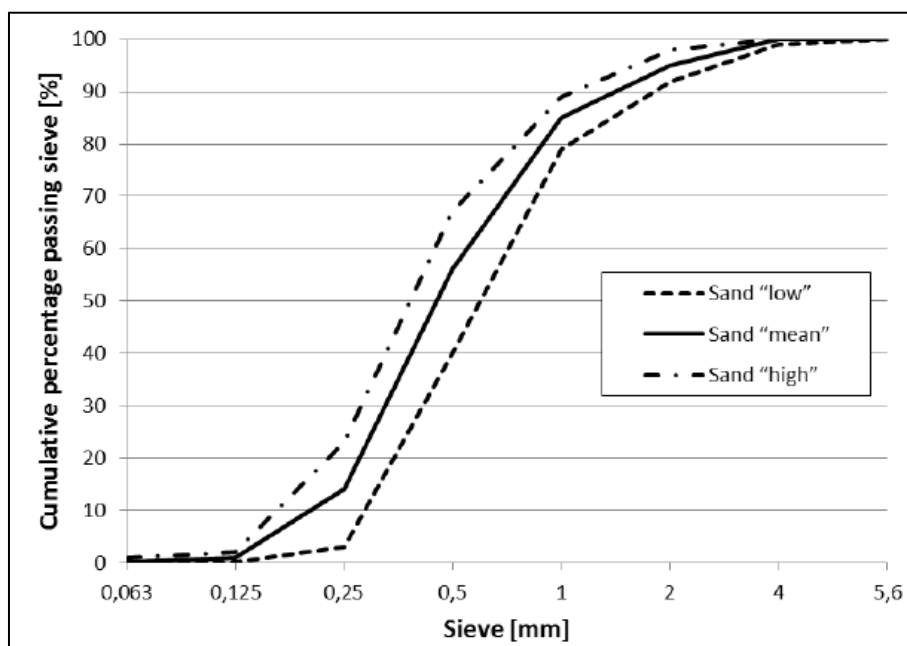


Slika 5.4: Optimalna krivulja zrnivosti za pesek 0/4 (Balfroid, Pilate in Ployaert, 2014)

Ker je naravni prodnat pesek težko dobiti, se ga v praksi zamenjuje z drobljencem frakcije 0/4. Drobljenec zaradi svojih nepravilnih ostrih robov praviloma negativno vpliva na obdelavnost betona in njegovo potrebo po vodi. Raziskave so kljub temu pokazale, da lahko prodnat pesek uspešno nadomestimo z drobljenim peskom, če odstopanja od optimalne zrnovostne krivulje niso prevelika.

Belgija ima določeno obvezno uporabo prodnatega peska za betonska vozišča. Spet druge evropske države, kot so Nemčija, Nizozemska in Avstrija, dovoljujejo tudi uporabo drobljenega peska. Glede vsebnosti finih delcev imajo v Belgiji in Nemčiji bolj strog kriterij kot na primer v Avstriji. Vsebnost finih delcev je v omenjenih dveh državah omejena na zgolj 3 %, medtem ko Avstrija, Francija in tudi Slovenija dovoljujejo vsebnost teh delcev do 10 % (Balfroid, Pilate in Ployaert, 2014).

Splošno mnenje stroke je, da več, kot je finih delcev v pesku (delcev, manjših od 0,25 mm), manj bo nastalih por v betonu in višja bo potreba po aerantu. Raziskava nizozemskih raziskovalcev Corporaala in Jurriaansa, ki sta se ukvarjala z vplivom zrnovostne sestave peska na skupno vsebnost zraka v betonu ter razvoj in strukturo por v betonu, namenjenemu za betonska vozišča, je dala nekoliko drugačne rezultate. V raziskavi sta analizirala 3 skupine peskov z različno zrnovostno sestavo, in sicer sta jih ločila glede na vsebnost delcev, manjših od 0,25 mm, na pesek z nizko, srednjo in visoko vsebnostjo teh delcev, kot prikazuje slika 5.5.



Slika 5.5: Prikaz izbranih krivulj zrnivosti (Corporaal in Jurriaans, 2014)

V raziskavi sta prišla do rezultatov, ki kažejo, da se pesek s srednjo vsebnostjo delcev pod 0,25 mm najbolj obnese tako glede vsebnosti zraka kot tudi vsebnosti por pod 300 μm ter njihove medsebojne oddaljenosti. Ugotovljeno je bilo tudi, da ustrezna zrnovostna sestava omogoča razvoj zgolj majhnih por (pod 0,3 mm), ki ugodno vplivajo na zmrzlinsko odpornost ter obdelavnost.

Čeprav bi tako imenovano idealno zrnovostno krivuljo iz prejšnje preiskave težko predpisali kot absolutno veljavno, pa vsekakor služi za orientacijo pri izbiri peska. Prav tako nedvomno kaže na velik vpliv peska na tvorbo por in poroznost v betonu, česar v fazi projektiranja betonske mešanice nikakor ne smemo spregledati.

5.4.3 Primerjava zahtev za agregate v Sloveniji in Avstriji

Primerjava zahtev za agregate v RS in Avstriji pokaže, da so le-te v Avstriji ostrejše in jih je več. Avstrijski standard bolj podrobno določa predvsem geometrijo zrn agregata ter vsebuje krivulje zrnivosti, ki so določene posebej za betonska vozišča. Jasno so tudi opredeljene zahteve za agregate, ki se vgrajujejo v spodnji sloj betona za betonska vozišča. Zahteve glede odpornosti proti drobljenju, zaglajevanju ter zmrzovanju in tajanju so kot ene izmed bistvenih zahtev za agregat, primeren za vgradnjo v obrabno plast z vidika mehanskih lastnosti, enake v obeh državah.

Glede na navedene ugotovitve predlagamo naslednje izboljšave oziroma dopolnitve v naslednji verziji TSC:

- ažurirati oziroma uskladiti zahteve v TSC z zahtevami iz standarda SIST 1026:2016,

- jasno opredeliti zahteve za agregat, ki se lahko vgrajuje v spodnji sloj betona za krovno plast voziščne konstrukcije,
- opredeliti zahteve glede potrebnih frakcij agregata – predvsem v primeru obrabnega sloja betona – ter predpisati uporabo krivulj zrnivosti iz avstrijskega standarda.

6 ZAHTEVE ZA SESTAVO BETONSKE MEŠANICE, VGRAJENE V KROVNO PLAST VOZIŠČNE KONSTRUKCIJE

6.1 Zahteve za sestavo betonske mešanice v Sloveniji

V TSC 06.420 (2003), je zapisano takole: »Splošne tehnične zahteve za določevanje sestave cementnobetonskih mešanic in njihovo proizvodnjo, zahteve za lastnosti svežega in strjenega cementnega betona (normalne gostote) ter način ugotavljanja skladnosti proizvedenega cementnega betona so določeni v SIT EN 206-1. Dodatne zahteve za lastnosti, proizvodnjo, prevoz in vgraditev cementnega betona za krovne plasti voziščnih konstrukcij so določene v tej TSC. Prilagojene morajo biti pogojem okolja, prometni obremenitvi in pogojem gradnje«.

Preglednica 6.1: Zahteve betona za krovne plasti v RS

| Zahteva | Zgornja plast betona | Spodnja plast betona |
|--|--|----------------------|
| Razred izpostavljenosti | XF4 | / |
| Vsebnost cementa (kg/m ³) | 340 | 340 |
| Vodocementno razmerje | 0,45 | |
| Vsebnost cementa in delcev < 0,25 mm pri D _{max} = 16 mm (kg/m ³) | 450–520 | |
| Vsebnost cementa in delcev < 0,25 mm pri D _{max} = 32 mm (kg/m ³) | 400–460 | |
| Odpornost na prodor vode | srednja vrednost < 5 mm; največja dovoljena vrednost = 10 mm | / |

V odvisnosti od pričakovane prometne obremenitve so betoni za krovne plasti razvrščeni v tri razrede tlačne ter natezne trdnosti, ki opredeljujejo zahtevane mejne vrednosti.

Preglednica 6.2: Zahtevani razredi tlačne in natezne trdnosti betona za krovne plasti (TSC 06.420:2003)

| Prometna obremenitev | Razred tlačne trdnosti | Razred natezne trdnosti | |
|-----------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | upogibne F (MN/m ²) | cepilne S (MN/m ²) |
| lahka in srednja | C25/30 | 4,0 | 2,4 |
| težka | C30/37 | 5,0 | 3,0 |
| zelo in izredno težka | C35/45 | 5,5 | 3,3 |

Dodatne zahteve glede betona, primerne za vgradnjo v betonska vozišča, je določil standard SIST 1026, ki je prvič izšel leta 2004, najnovejša verzija pa izhaja iz leta 2016. Standard se dotakne tudi področja betonskih vozišč in za obrabno plast predpiše naslednje stopnje izpostavljenosti: XD3, XF4 ter XM. Razred odpornosti proti obrabi površine XM je treba določiti glede na stopnjo prometne obremenitve. Beton za obrabno betonsko plast mora izpolnjevati kriterije, predstavljene v preglednici 6.3.

Preglednica 6.3: Zahteve betona za obrabno krovno plast v RS

| Zahteva za zgornjo plast betona | Kategorija |
|---|------------------------|
| Razred izpostavljenosti | XF4, XD3, XM |
| Razred tlačne trdnosti | C30/37 |
| Vsebnost cementa (kg/m ³) | 340 |
| Vodocementno razmerje | 0,45 |
| Odpornost na prodor vode | PV-II |
| Vsebnost por | min. 4 % |
| Odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju | S25 |
| Odpornost proti obrabi površine | OO1–OO3, odvisno od XM |

V standardu je navedeno tudi, da je v primeru stopnje izpostavljenosti XM3 potrebno minimalno količino cementa povečati na 360 kg/m³. Pri aeriranih betonih je za ocenjevanje odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju s sredstvi za tajanje poleg metode OPZT-S možno vzporedno uporabiti tudi metodo linijske mikroskopske analize po SIST EN 480-11. Faktor oddaljenosti med porami pri tem ne sme biti večji od 0,2 mm. V primeru $D_{max} = 16$ standard svetuje nekoliko višji odstotek por, in sicer 5–7 %, kar predstavlja kriterij predvsem za obrabno plast betona.

Standard SIST 1026, za razliko od TSC, kot najnižji razred tlačne trdnosti predpiše C30/37, določi minimalno vsebnost zraka ter doda nov razred izpostavljenosti, in sicer XM. Prav tako popravi zahteve betona glede odpornosti proti prodoru vode ter nedvoumno določi merilo za ocenjevanje odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju. Beton, ki se vgrajuje v spodnjo plast vozišča, ima lahko nekoliko višje vodocementno razmerje, in sicer 0,50.

6.2 Zahteve za sestavo betonske mešanice v Nemčiji

V nemških standardih so zahteve za cementni beton določeno ločeno za obrabno in ločeno za spodnjo plast betona, glede na stopnjo prometne obremenitve, ki je razdeljena zgolj na 'težjo' in 'lažjo' prometno

obremenitev. Meja je postavljena pri $1,8 \cdot 10^6$ prehodov nazivne osne obremenitve 100 kN, izračunano po nemških smernicah RStO 12 (Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen)

Preglednica 6.4: Zahteve glede betona za krovno plast v Nemčiji (povzeto po Grünewald in Peck, 2015)

| Število prehodov prometne nazivne osne obremenitve 100 kN na dan | Zahteve | | | |
|---|---|---------------|---------------|---------------|
| | >1,8 | | ≤1,8 | |
| | Zgornji beton | Spodnji beton | Zgornji beton | Spodnji beton |
| Razred izpostavljenosti | XF4, XM2 | XF4 | XF4, XM1 | XF4 |
| Vodocementno razmerje | 0,45 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Razred tlačne trdnosti | C30/37 | | | |
| Vsebnost cementa (kg/m ³) | 340 | 320 | 320 | 320 |
| Vsebnost cementa v primeru izpostavljenih zrn agregata (kg/m ³) | 420 | / | 420 | / |
| Vsebnost delcev < 0,25 mm | ≤ 450 kg/m ³ oziroma ≤ 500 kg/m ³ za mešanico agregata 0/8 ter >500kg/m ³ pri metodi izpostavljenih zrn agregata | | | |
| Upogibna natezna trdnost F N/mm ² (EN 12390) | 4,5 | | 3,5 | |
| Porazdelitev por v strjenem betonu | A ₃₀₀ = 1,8 %; L' = 0,20 mm | | | |

Preglednica 6.5: Zahteve glede minimalne povprečne vsebnosti zraka v betonu za krovno plast v Nemčiji (povzeto po Grünewald in Peck, 2015)

| Največje zrno agregata (mm) | Minimalna povprečna vsebnost zraka pri določeni konsistenci betona (%) | |
|-----------------------------|--|--|
| | stopnja zgoščenosti C1, brez dodatka plastifikatorja | C2 ali F2 in F3; C1 z dodatkom plastifikatorja |
| 8 | 5,5 | 6,5 ¹⁾ |
| 16 | 4,5 | 5,5 ¹⁾ |
| 22 ali 32 | 4,0 | 5,0 ¹⁾ |

1) Če je z začetnim preskusom dokazano, da je porazdelitev por v strjenem betonu ustrezna, lahko vsebnost por znižamo za 0,5%.

2) Posamezne vrednosti lahko od zgornjih odstopajo za največ 0,5 %.

6.3 Zahteve za sestavo betonske mešanice v Avstriji

Izmed vseh treh držav lahko iz preglednice 6.6 razberemo, da so zahteve za beton najstrožje postavljene ravno v Avstriji. Za razliko od slovenskih ter nemških kriterijev, tukaj zahteve niso pogojene s stopnjo prometne obremenitve, temveč zgolj s tem, ali gre za beton v obrabni ali pa spodnji plasti krovne plasti voziščne konstrukcije. Bistveni preiskavi, ki ju je treba opraviti na strjenem betonu, sta linijska mikroskopska analiza ter določitev cepilne natezne trdnosti. V kolikor beton zadosti omenjenima kriterijema, se predpostavi, da je zmrzlinško odporen in dovolj kvaliteten, da kljubuje vsem zunanjim vplivom, ki v betonu povzročajo neugodne natezne napetosti.

Preglednica 6.6: Zahteve glede betona za krovno plast v Avstriji (povzeto po Blab et al., 2012)

| Zahteve | Kategorija | |
|---|---|---------------|
| | Zgornji beton | Spodnji beton |
| Razred izpostavljenosti | XF4, XM2 | XF4 |
| Vodocementno razmerje | 0,43 pri začetnem preizkusu ter 0,45 pri preizkusu potrjevanja kakovosti | |
| Razred tlačne trdnosti | C30/37 | |
| Vsebnost cementa – tehnika drsnega opaža s finišejem ter tehnika fiksnega opaža (beton razreda konsistence F4) (kg/m ³) | 400 | 350 |
| Vsebnost cementa – struktura pranelega betona | 450 | - |
| Vsebnost por – tehnika drsnega opaža, izvedba s finišejem (%) | 4,0–6,0 | |
| Vsebnost por – tehnika fiksnega opaža (beton razreda konsistence F4) (%) | 5,0–7,0 | |
| Porazdelitev por v strjenem betonu | A ₃₀₀ = 1,8 %; L' = 0,18 mm pri začetnem preskusu ter L' = 0,21 mm pri preskusu potrjevanja kakovosti in kontroli na gradbišču | |
| Razred cepilne natezne trdnosti | S3,3 | S2,7 |
| Cepilna natezna trdnost (N/mm ²) pri začetnem preskusu (vsaj trije vzorci prizem) | 4,4 | 3,7 |
| Cepilna natezna trdnost S (N/mm ²) pri preskusu potrjevanja kakovosti (vsaj trije vzorci prizem) | 4,2 | 3,5 |

V avstrijskem standardu je moč najti tudi določen potreben čas mešanja betona, ki velja za betonarne. Za beton z dodatkom aeranta ter brez plastifikatorja naj bi potreben čas znašal 50 sekund. Za betona z dodatkom aeranta ter plastifikatorja se čas podaljša na eno minuto, beton, ki se bo vgradil v vrhno plast in obdelal po metodi izpostavljenih zrn, pa je treba mešati 70 sekund. Gre seveda za vrednosti časa mešanja betona na betonarnah. Glede na izkušnje, ki smo jih pridobili med izvajanjem praktičnega dela, menimo, da je te vrednosti težko priporočiti kot absolutno merodajne. Potreben čas mešanja namreč v prvi vrsti zavisi od tipa mešalca (geometrija, hitrost obratov), nato pa tudi količine betona, vrste dodatkov itd.

6.4 Primerjava zahtev za sestavo betonske mešanice

Primerjava prikazanih zahtev posameznih držav pokaže, da se le-te v določenih zahtevah precej razlikujejo. Standardi so si medsebojno enotni zgolj glede minimalnega zahtevanega razreda tlačne trdnosti betona za krovno plast voziščne konstrukcije, in sicer je meja postavljena pri C30/37, ter zahtev po stopnji izpostavljenosti XF4 za obrabno plast. Do razhajanj prihaja tako v primeru minimalne vsebnosti količine potrebnega cementa kot tudi vodocementnega razmerja betonskih mešanic. Medtem ko je minimalna potrebna količina cementa za obrabno plast v Sloveniji in Nemčiji enaka 340 kg/m^3 , je v Avstriji zahteva postavljena bistveno višje, 400 kg/m^3 . Nemčija in Avstrija imata tudi posebej določeno minimalno vsebnost cementa za beton, obdelan po metodi izpostavljenih zrn agregata, kar v slovenskih standardih ni navedeno. Vodocementno razmerje variira od 0,43 v Avstriji, 0,45 v Sloveniji, pa do vrednosti 0,5, ki je dovoljena v Nemčiji. Razlike med standardi se pokažejo tudi glede zahtev po natezni trdnosti betona. V Avstriji kot merodajno testirajo cepilno natezno trdnost, nemški standard zahteva preverjanje upogibne natezne trdnosti, medtem ko TSC v Sloveniji podaja mejne vrednosti za obe vrsti natezne trdnosti. Pri tem so zahteve po upogibni natezni trdnosti v primerjavi z nemškim standardom višje za kar 1 MPa. Razred zahtevane cepilne natezne trdnosti S3,3 je sicer enak v primerjavi z avstrijskim standardom, vendar ima slednji podane zahteve ločeno za spodnji in zgornji sloj betona, medtem ko je v TSC podana vrednost za celotno krovno plast. Nasploh so zahteve v TSC zelo nejasno opredeljene z vidika, ali gre za zahteve za beton v celotni krovni plasti ali zgolj za obrabno plast betona. Podajanje enotnih zahtev za spodnji in krovni beton vsekakor ni smiselno. Razlikujejo se tudi zahteve glede vsebnosti por. Bolj pomembna kot razlika v odstotku zahtevane vsebnosti por v betonu se zdi razdelitev kriterija glede na konsistenco betonske mešanice oziroma načina vgradnje betona, kakor je to storjeno v Avstriji in Nemčiji. Dodatno je v omenjenih dveh državah pri metodi linijske mikroskopske analize določena zahteva za minimalno vsebnost por, manjših od 300 mikrometrov (A_{300}).

Glede na navedene ugotovitve predlagamo naslednje izboljšave oziroma dopolnitve v naslednji verziji TSC:

- popraviti oziroma uskladiti terminologijo v TSC 06.420 (2003) s SIST 1026:2016 in SIST EN 206:2013 glede poimenovanja plasti betonskega vozišča,
- ažurirati TSC 06.420 (2003) z zahtevami iz SIST 1026:2016 in SIST EN 206:2013,
- določiti minimalne vsebnosti cementa za beton, obdelan po metodi izpostavljenih zrn agregata,
- nedvoumno podati ločene zahteve za beton v spodnji plasti ter za beton v obrabni plasti krovne betonske plasti,
- pri analizi strukture por z metodo linijske mikroskopske analize je potrebno določiti tudi minimalni procent por, manjših od 0,3 mm (A_{300}) – po vzoru nemških in avstrijskih smernic predlagamo vrednost $A_{300}=1,8\%$,
- določiti minimalne vsebnosti por v sveži betonski mešanici glede na stopnjo konsistence betona in načina vgradnje, po vzoru avstrijskih ter nemških smernic,
- za spodnjo plast betona je treba predpisati razred izpostavljenosti XF4, po vzoru avstrijskih ter nemških smernic.

Podaljšane planske dobe betonskih vozišč z 20 na 30 let z vidika kvalitete betona ne bi smelo predstavljati nikakršnih problemov. Čeprav so določene zahteve, kot na primer vsebnost cementa, postavljene nižje kot v tujini (Avstriji), gre za minimalne predpisane vsebnosti cementa. Z izbiro količine veziva moramo v končni fazi zadostiti zahtevi po odpornost proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti sredstev za tajanje, doseči predpisano natezno trdnost betona ter zadostno odpornost proti prodoru vode, za kar so običajno potrebne višje vsebnosti cementov od predpisanih minimalnih. Ob upoštevanju predlaganih dopolnitev TSC menimo, da so trenutne zahteve v RS na področju betona za betonska vozišča povsem ustrezne in primerljive s tujimi. Zavedati se namreč moramo, da standard SIST EN 206 v točki 5.3.2 navaja: »Predpisi, ki veljajo v kraju uporabe betona, morajo vsebovati zahteve, ki pri predvidenih pogojih vzdrževanja predpostavljajo predvideno življenjsko dobo najmanj 50 let«. To velja tudi za betonska vozišča, s čimer beton kot material bistveno presega projektno življenjsko dobo vozišča.

7 CEMENT – HIDRATACIJA IN RAZVOJ MIKROSTRUKTURE CEMENTNEGA KAMNA

Povezava med mikrostrukturo materiala in njegovimi mehanskimi karakteristikami predstavlja osnovo moderne znanosti materialov. Za beton je značilno, da ima zelo kompleksno in heterogeno mikrostrukturo katero delimo na tri osnovne komponente oziroma faze:

- agregat,
- cementno pasto oziroma cementni kamen in
- prehodno območje med obema fazama oziroma stično območje.

Mikrostrukturo lahko definiramo kot tip, količino, obliko ter razporeditev naštetih faz v betonu. Medtem ko imamo s pojmom makrostruktura v mislih delce, ki jih lahko v prerezu materiala vidimo s prostim očesom, pod mikrostrukturo razumemo strukturo, ki ni vidna človeškemu očesu. Gre za delce, manjše od 200 μm , ki jih je moč opazovati zgolj s pomočjo mikroskopov. Za razumevanje vpliva mikrostrukture betona na njegove mehanske lastnosti je potrebno osnovno znanje oblikovanja cementnega kamna, ki nastaja s procesom, imenovanim hidratacija.

7.1 Hidratacija portlandskega cementa (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006)

Hidratacija je proces vezanja cementa ob prisotnosti vode. To je kompleksna serija reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom, mineralnimi in drugimi dodatki ter vodo. Gre za eksotermne kemijske reakcije, pri katerih se sprošča hidratacijska toplota. Med potekom hidratacije material spreminja svoje agregatno stanje od praktično Binghamove tekočine do materiala z visoko tlačno trdnostjo. Te spremembe so posledica sprememb v strukturi betona med potekom procesa hidratacije cementa.

Portlandski cement (PC) je značilni predstavnik silikatnih cementov, ki ga sestavljajo minerali PC klinkerja in različni dodatki (sadra, žlindra, elektrofiltrski pepel itd.). PC klinker v pretežni meri sestavljajo elementi kalcij (Ca), silicij (Si) in kisik (O_2). Sestavo PC klinkerja največkrat izražamo z masnimi odstotki posameznih oksidov (preglednica 7.1), ki tvorijo 4 glavne klinkerske minerale, prikazane v preglednici 7.2.

Preglednica 7.1: Glavni oksidi v portlandskem cementu

| Ime in kemijska oznaka | Okrajšava |
|---|-----------|
| Kalcijev oksid – CaO | C |
| Silicijev dioksid – SiO ₂ | S |
| Aluminijev oksid – Al ₂ O ₃ | A |
| Železov oksid – Fe ₂ O ₃ | F |

Preglednica 7.2: Glavne mineralne faze v PC klinkerju in njihove lastnosti

| Oznaka | Ime | Delež | Lastnosti |
|-------------------|--------------------------------|---------|--|
| C ₃ S | trikalcijev silikat – alit | 45–60 % | najpomembnejši, hitreje reagira, povzroča visoke trdnosti |
| C ₂ S | dikalcijev silikat – belit | 20–30 % | počasneje reagira in podaljšuje proces hidratacije in strjevanja |
| C ₃ A | trikalcijev aluminiat – celit | 4–12 % | pospešuje strjevanje in razvoj hidratacijske toplote, zvišuje zgodnjo trdnost betona |
| C ₄ AF | tetrakalcijev aluminat – ferit | 10–20 % | zavira strjevanje, odporen proti sulfatni koroziji |

7.1.1 Kemijske reakcije portlanskega cementa

Po stiku cementa in vode nastane veliko število zapletenih kemijskih reakcij. Reakcija dikalcijevega silikata (7.2) oziroma trikalcijevega silikata (7.1) z vodo povzroči nastanek kalcijevega silikat hidrata C-S-H.



Pri reakciji C₂S in C₃S z vodo se tvori tudi kalcijev hidroksid ali portlandit Ca(OH)₂. V drugi skupini reakcij nastopa mineral C₃A. Po reakciji minerala C₃A s sadro in z vodo (7.3) se tvori etringit (glavni predstavnik Aft spojini). Sčasoma postane nastali etringit nestabilen in reagira s preostalim deležem C₃A in z vodo (7.4), pri čemer nastane stabilen produkt kalcijev monosulfoaluminat hidrat (AFm).





Tudi po zadnji reakciji je še vedno lahko prisoten delež nevezanega C_3A , iz katerega po nadaljnji reakciji z vodo nastane kalcijev aluminatohidrat C-A-H (7.5).

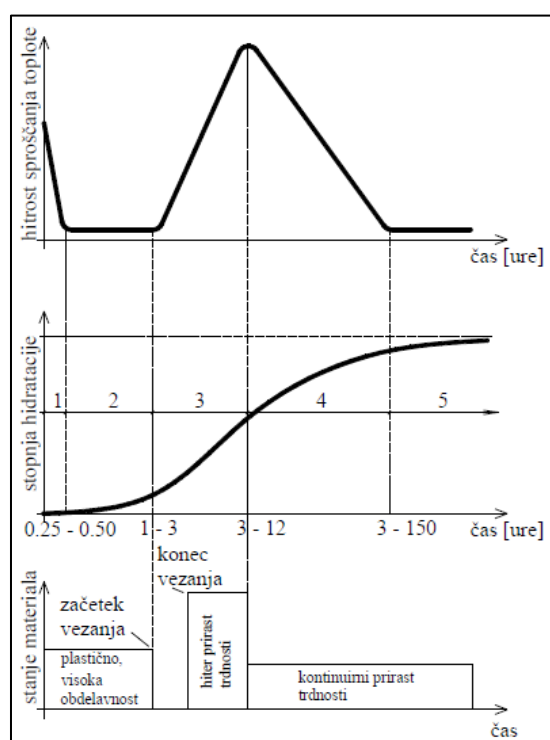


Glavni mineral tretje skupine reakcij je tetrakalcijev aluminoforit C_4AF . Reakcija tega minerala z vodo (7.6) je podobna reakciji 7.5.



7.1.2 Faze hidratacije in parametri, ki vplivajo nanjo

V osnovi ločimo pet obdobij hidratacijskega procesa portlandskega cementa v betonu (slika 7.1).



Slika 7.1: Obdobja hidratacijskega procesa (Trtnik, 2009)

Prva faza ali *predindukcijsko obdobje* traja prvih nekaj minut po stiku cementa in vode pri čemer pride do hitrega raztapljanja spojin v vodi in prične se hidratacija mineralov klinkerja. Procesu sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Najaktivnejši mineral v tem obdobju je C_3A (raztaplja se v deležu 5–25 %), ki reagira s sadro, pri čemer nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na

cementnih delcih. Alkalnost cementne poste se v tem obdobju bistveno poveča in doseže vrednost pH 12 ali več.

Po začetni hitri hidrataciji sledi *indukcijsko obdobje* ali relativno mirovanje, ko se reakcijska hitrost zelo zmanjša. To zmanjšanje se razlaga na dva načina:

- po teoriji zaščitne plasti se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v predindukcijskem obdobju, zaradi česar se hidratacija upočasni. Zaščitna plast se sčasoma spreminja in postaja prepustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije,
- po teoriji kristalizacijskih jeder nadaljevanje hidratacije ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom hidratacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidratacijski proces ponovno steče.

Konec indukcijskega obdobja je največkrat definiran kot začetek vezanja cementne paste in ga določimo v skladu s standardno Vicatovo metodo.

Indukcijskemu obdobju sledi *obdobje pospešene hidratacije*, v katerem je hidratacijski proces najintenzivnejši in traja nekje do 12 ure. Nasičena raztopina z novo nastalimi kristali preide iz faze sola v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zni. Hitrost hidratacije C_3S in C_2S narašča in doseže maksimalno vrednost.

Obdobju pospešene hidratacije sledi *obdobje pojemajoče hidratacije*. Hitrost reakcije se zmanjša in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih delcev. Nastaja C-S-H gel, kot posledica hidratacije C_3S in C_2S , pri čemer se prispevek C_2S k skupni količini C-S-H gela s časom povečuje. Na začetku nastali etrignit reagira z nehidratiziranim C_3A , pri čemer nastaja kalcijev monosulfoaluminat hidrat AFm (7.4). V nadaljevanju hidratacije nastopi zorenje hidratiziranega materiala. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti rastejo in tvorijo mrežo (prirejeno po Žarnić, 2003).

Hidratacijski proces se v obdobju mirne oziroma nespremenljive hidratacije skoraj popolnoma umiri.

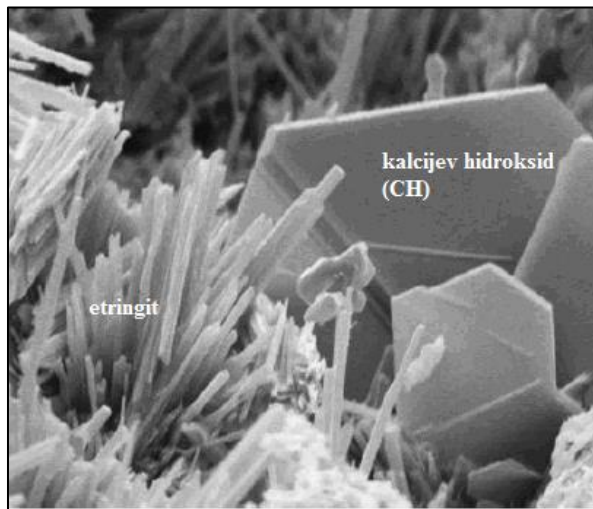
Proces hidratacije in hitrost sproščanja hidratacijske toplote sta odvisna od naslednjih parametrov (prirejeno po Trtnik, 2009):

- vrste cementa;
- vodocementnega razmerja (v splošnem velja, da je končna stopnja hidratacije višja pri višjem vodocementnem razmerju);
- finosti mletja cementa (večja specifična površina pospeši hidratacijski proces in obratno);

- *temperature okolice, v kateri se material nahaja med hidrationskim procesom* (višja T okolice pospeši hidrationski proces in obratno);
- *začetne temperature sveže betonske mešanice* (začetni razvoj temperature in s tem toplote v betonu je višji pri višji temperaturi sveže cementne paste oziroma betona, krajši pa je tudi čas, pri katerem je ta maksimalna vrednost hitrosti dosežena);
- *količine cementa* (z večanjem količine cementa v betonu vplivamo tako na dvig končne temperature (uporabno v hladnih pogojih betoniranja) kot tudi na povečanje hitrosti hidrationskega procesa cementa v betonu. Količina cementa vpliva tudi na čas, pri katerem je dosežena največja hitrost hidrationskega procesa, le-ta se namreč z večjo vsebnostjo cementa krajša. Za stopnjo hidrationsije velja, da je nižja pri višji vsebnosti cementa);
- *prisotnosti kemijskih in mineralnih dodatkov v materialu* (največji vpliv na hitrost hidrationsije imajo tako imenovani pospeševalci vezanja in strjevanja ter zavirala vezanja, medtem ko lahko vpliv drugih kemijskih dodatkov na potek hidrationsije zanemarimo).

7.2 Mikrostruktura cementnega kamna in pore v betonu (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006)

Cementna pasta se med procesom hidrationsije pretvori v cementni kamen (trdna faza), katerega sestavljajo hidrationski produkti ter pore. Glavni hidrationski produkti trdne faze so kalcijev silikat hidrat (C-S-H), kalcijev hidroksid (CH) in kalcijev sulfoaluminat hidrat.



Slika 7.2: Morfologija kristalov etringita in CH kristalov (Vir: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/CaOH2SEM.jpg>)

Kalcijev sulfoaluminat hidrat zavzema približno 15–20 % popolnoma hidratizirane cementne paste, vendar ima le manjši vpliv na mehanske lastnosti betona. Kot smo že omenili, se v začetnih fazah

hidratacije tvorijo kristali etringita (AFt), ki se najpogosteje pojavljajo v obliki iglic, dolžine do 10 μm in premera okrog 0,25 μm . Sčasoma se etringit pretvori v kalcijev monosulfoaluminat hidrat (AFm), katerega prostornina je približno 2,5-krat manjša od prostornine kristalov etringita. Kristali imajo obliko heksagonalnih ploščic.

Kalcijev silikat hidrat ali C-S-H gel predstavlja amorfn ali skoraj amorfn fazo, ki zavzema približno 50 – 60 % mase hidratizirane cementne paste in pomembno prispeva k trdnosti in obstojnosti strjene cementne paste in betona. Trdnost materiala je največkrat pripisana Van der Waalsovimi silami, velikost gel por ali razmik med trdnimi delci pa znaša okrog 1,8 nm, odvisno od morfologije gela. Najprej se formira tako imenovani zunanji gel C-S-H, kasneje, ko nastopi sekundarna hidratacija C_3A , posledica katere je nastanek manjših kristalov etringita, pa se formira notranji C-S-H gel. Zunanji gel zavzema prostor, ki nadomešča porabljeno vodo, in je tako manjše gostote. Notranji gel, ki ima višjo gostoto, pa zavzema prostor, ki je bil prvotno zaseden s cementnimi delci. C-S-H gel pri nastajanju povzroči manjšanje prostornine sistema kapilarnih por ter njihovo nezveznost, s čimer ugodno vpliva na nižjo prepustnost cementnega kamna.

Kristali CH predstavljajo okoli 10 – 20 % mase hidratizirane cementne paste. Po navadi se ti kristali pojavljajo v obliki heksagonalnih ploščic s pravilnimi robovi in so načeloma bistveno večji od delcev C-S-H. Kristali CH so lahko veliki od 100 μm pa celo do 1000 μm . Prispevek kalcijevega hidroksida k tlačni trdnosti je zaradi njegove male specifične površine zanemarljiv. Njegova pomembna vloga pa je vzdrževanje alkalnosti v cementni matrici.

Največji vpliv na morfologijo produktov hidratacije ima vodocementno razmerje. Večje, kot je vodocementno razmerje, več prostora je na voljo za razvoj hidratacijskih produktov, ki so zato večji.

Razvoj strukture por v cementni pasti je v veliki meri odvisen od razvoja procesa hidratacije in vodocementnega razmerja. Nastale pore delimo v tri skupine (slika 7.3):

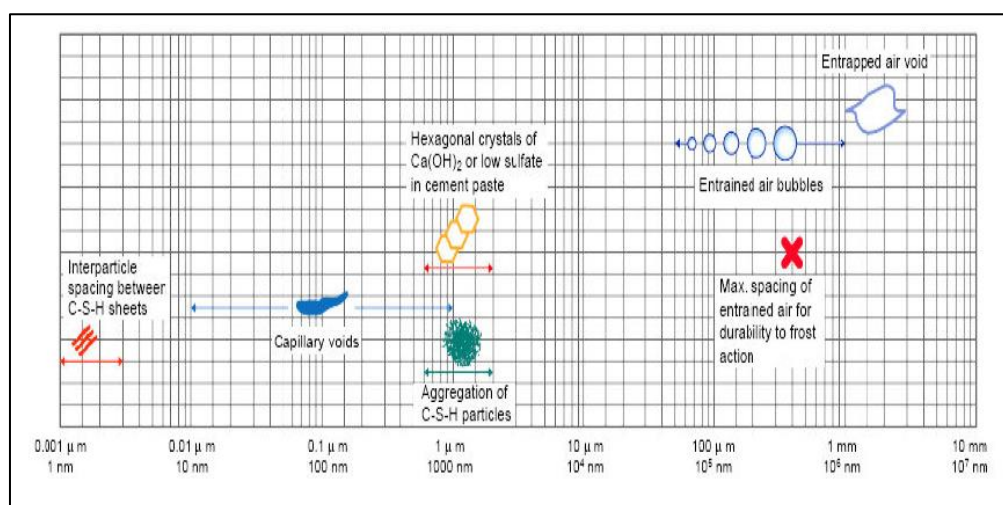
- gelne pore,
- kapilarna pore in
- zračne pore.

Gelne pore se nahajajo v interni strukturi C-S-H gela in so velikosti od 0,5 do 10 nm. Tako majhne pore ne vplivajo na trdnost in prepustnost cementnega kamna. Hidratacijo cementa si lahko predstavljamo kot proces, med katerim postaja prostor, ki sta ga v začetku zapolnjevala voda in cement, vse bolj zapolnjen s produkti hidratacije. Prostor, ki ga ne zavzemajo produkti hidratacije ali cement, sestavljajo kapilarne pore. Prostornina in velikost teh por sta določena z vodocementnim razmerjem in s stopnjo hidratacije cementa. Z vodocementnim razmerjem namreč vplivamo na povprečno razdaljo med

cementnimi delci, z drugimi besedami, večje, kot je vodocementno razmerje, večja je razdalja med cementnimi delci in večja sta prostornina ter velikost kapilarnih por.

Kapilarne pore so nepravilnih, običajno lasastih oblik, katerih dimenzija se lahko giblje od nekaj nm pa vse do 10 μm . V nasprotju z gelnimi porami, v katerih voda v naravnem okolju ne zmrzne, lahko voda v kapilarnih porah zmrzne in s tem na materialu povzroči nepovratne deformacije. Sistem kapilarnih por je med seboj v veliki meri povezan in zato predstavlja glavno transportno pot skozi vezivo za različne tekočine. Pojem kapilarna poroznost materiala predstavlja prostornino kapilarnih por in je neposredno povezana s trdnostjo materiala.

Zračne pore so v nasprotju s kapilarnimi porami večinoma kroglaste oblike in so lahko ujete ali namenoma vnesene. Premer por, ki ostanejo ujete v betonu med procesom mešanja, je lahko nekaj milimetrov. Običajno gre za izolirane pore, ki ne prispevajo k povečanju prepustnosti materiala. Vnesene zračne pore v prostorninskem deležu med 2 in 8 % v material uvajamo namenoma z uporabo aeranta. To so nepovezane pore kroglaste oblike in premera od 10 μm pa vse do 1 mm. Njihova funkcija je zniževanje hidravličnega tlaka med zmrzovanjem vode v kapilarnih porah, kar bistveno izboljša zmrzlinško odpornost cementnih materialov. Negativni vidik zračnih por je zmanjšanje trdnosti betona.



Slika 7.3: Shematski prikaz oblike in velikosti por in zračnih mehurčkov v cementnem kamnu (Mehta in Monteiro, 2006)

Med vsemi hidratacijskimi produkti imata največji vpliv na trdnost betona C-S-H gel ter kalcijev aluminat hidrat, zaradi njune velike specifične površine. Višji, kot je njun delež v cementni pasti, višja je trdnost betona. Dobro poznan je tudi inverzni odnos med poroznostjo cementne paste in trdnostjo materiala. Medtem ko so trdni delci nosilci trdnosti materiala, jo praznine v materialu bistveno zmanjšujejo. Prostornina kapilarnih por narašča z vsebnostjo vode v betonu in pada s stopnjo hidratacije cementne paste. Z večanjem deleža kapilarnih por se povečuje prepustnost materiala ter zmanjšuje trajnost materiala.

7.2.1 Mikrostruktura stičnega območja

Odgovore na vprašanja, kot so: zakaj ima beton visoko tlačno trdnost in relativno nizko natezno trdnost ter zakaj je za posamezno komponento betona (cementni kamen, kameni agregat) zveza med napetostjo in deformacijo linearna (elastično obnašanje), za beton pa je značilen nelinearen odziv pri tlačni obremenitvi, dobimo šele, ko podrobneje poznamo karakteristike cementnega kamna, ki se nahaja v stičnem območju med zrni agregata ter »osrednjim« cementnim kamnom.

Stično območje si lahko predstavljamo kot tanko lupino debeline 10–50 μm , ki obdaja zrna agregata. Običajno gre za najšibkejšo od treh komponent betona, ki ima bistveno večji vpliv na mehanske lastnosti betona, kot je soditi po njeni velikosti.

Glede na ugotovitve Masa (Maso, 1990), so karakteristike stičnega območja odvisne od stopnje razvoja cementnega kamna. V svežem vibriranem betonu so večja zrna agregata obdana s tankim filmom vode, zato ima to območje lokalno višje vodocementno razmerje, v primerjavi z osrednjo cementno pasto. Posledica višjega vodocementnega razmerja so večji kristali etringita ter kalcijevega hidroksida z bolj porozno mrežo por. V nadaljevanju hidratacije pride do tvorbe slabo kristaliničnega C-S-H gela ter dodatnih manjših kristalov etringita in kalcijevega hidroksida, kar pomaga izboljšati gostoto ter poveča trdnost faze.

Pri zgodnji starosti betona sta prostornina in velikost por v stičnem območju višja kot v osrednji cementni pasti. Prav tako sta višji koncentracija in velikost kristalov etringita in kalcijevega hidroksida. Posledica tega je lažja tvorba razpok. Zato je trdnost te faze nižja od trdnosti osrednjega cementnega kamna. Sčasoma se trdnost tega območja viša in lahko celo doseže ali preseže trdnost osrednjega cementnega kamna. To je posledica tvorbe novih kristalov zaradi počasne reakcije med agregatom in cementno pasto. V primeru agregatov silikatnega izvora pride do tvorbe C-S-H gela oziroma do tvorbe kalcijevih aluminatnih hidratov v primeru uporabe apnenčastih agregatov. Istočasno pride tudi do zmanjšanja vsebnosti kalcijevega hidroksida, kar še dodatno ugodno vpliva na trdnost.

Poleg visoke poroznosti ter usmerjenih kristalov kalcijevega hidroksida gre nizko, predvsem natezno trdnost, pripisati tudi prisotnosti mikro razpok. Do pojava teh razpok pride že pred nanosom kakršnekoli dodatne obremenitve. Prisotnost mikro razpok v tem območju gre pripisati različnim parametrom, kot so velikost in zrnastostna sestava agregatnih zrn, vodocementno razmerje, konsolidacija svežega betona, nega itd.

Z nanosom dodatne obremenitve pride do nadaljnjega širjenja razpok. Mikro razpoke v stičnem območju se ob nanosu obtežbe začnejo zaradi višje kapilarne poroznosti hitro širiti. Pri obtežbi velikosti približno 70 % tlačne trdnosti pride do dovolj velikih napetosti v osrednji cementni pasti ter večjih prazninah, da se začnejo pojavljati razpoke tudi na teh mestih. Razpoke se združijo s tistimi iz stičnega območja, kar

privede do porušitve materiala. V primeru natezne obremenitve se razpoke širijo bistveno hitreje ob bistveno manjših obremenitvah, kar je razlaga za nižjo natezno trdnost materiala.

7.3 Vpliv klinkerskih mineralnih faz na lastnosti svežega in strjenega betona (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006)

Trikalcijev aluminat velja za najaktivnejši mineral v začetnih fazah hidratacije. Ob stiku z vodo sprošča veliko hidratacijske toplote ter zvišuje hitrost hidratacije in s tem pospešuje vezanje cementne paste. Pri tem se tvori etringit, ki vpliva na znižanje obdelavnosti ter slabšo konsistenco cementne paste, z drugimi besedami, cementi z višjo vsebnostjo C_3A imajo višjo potrebo po vodi. Z višjo potrebo po vodi in posledično višjim vodocementnim razmerjem (v kolikor višje potrebe po vodi ne kompenziramo s plastifikatorji oziroma superplastifikatorji) narašča tudi prepustnost cementnega kamna kar vpliva na trajnost betona. Aluminat vpliva predvsem na zgodnjo trdnost, medtem ko je njegov doprinos h končni trdnost betona zanemarljiv. Eden najpomembnejših vplivov pa je seveda vpliv na sulfatno korozijo. Ob prisotnosti sulfatov se kalcijev monosulfoaluminat hidrat pretvori nazaj v etringit, ki ima večjo prostornino kot kalcijev monosulfoaluminat hidrat, kar privede do nabrekanja in pokanja betona.

Pri reakciji silikatnih mineralov C_3S in C_2S z vodo nastajata C-S-H gel in kalcijev hidroksid. V primeru C_3S delež C-S-H gela znaša praviloma okrog 60 % in v primeru C_2S okrog 80 % . Zato je pričakovati, da bodo cementi z višjo vsebnostjo C_2S dosegali višje končne trdnosti in bodo bolj odporni na kemijsko agresivna okolja in okolja, v katerih so prisotni sulfati. Za omenjena minerala velja, da potrebujeta 24 oziroma 21 % vode za popolno hidratacijo. Mineral C_3S reagira hitreje kot C_2S in med hidratacijo sprošča več toplote. V prisotnosti sadre C_3S reagira v času približno ene ure po zamešanju vode in prispeva k zgodnjim trdnostim betona.

7.4 Hidratacija Portlandskega mešanega cementa (CEM II) (Mehta in Monteiro, 2006)

Razvoju portlandskih mešanih cementov je v začetku poleg zavedanja o pozitivnih vplivih na lastnosti betona najverjetneje botrovalo predvsem znižanje proizvodnih stroškov s stališča nižje porabe klinkerja, nižje porabe energije pri mletju klinkerja in nižje specifične emisije ogljikovega dioksida. Kakorkoli že, z uporabo mineralnih dodatkov lahko dosežemo boljše karakteristike cementnih veziv, kot so nižja hidratacijska toplota, nižja prepustnost, sulfatna odpornost itd. Vse pomembnejši je tudi vpliv dodatkov na zmanjševanje ogljičnega odtisa. Materiali, ki se najpogosteje uporabljajo kot dodatki so, granulirana plavžna žindra, pucolanski materiali, mikrosilika itd.

Granulirana plavžna žindra je steklasta snov, ki jo v največji meri sestavljajo kalcijevi silikati in alumosilikati. V primerjavi s klinkerjem vsebuje manjši delež CaO in večji delež SiO_2 . Je latentno

hidravlično vezivo. Hidravlične vezivne lastnosti se aktivirajo v alkalnem okolju, pri čemer nastane material s cementnimi lastnostmi, ki pa je sam po sebi neprimeren za rabo v gradbeništvu.

V cementni industriji granulirano plavžno žlindro prištevamo med pucolanske dodatke, za katere je značilna pucolanska reakcija. Če je v sestavi cementa prisoten pucolanski material, pride do reakcije tega s kalcijevim hidroksidom ter z vodo, kar povzroči nastanek dodatnega C-S-H gela (7.7).



Za razliko od nastajanja C-S-H gela iz klinkerskih faz je pucolanska reakcija bistveno počasnejša in bolj občutljiva na temperaturo, kar se pozna predvsem na počasnem razvoju tlačne trdnosti in sproščanju hidratacijske toplote. Reakcijo spremlja porabljanje kalcijevega hidroksida, kar pomembno vpliva na obstojnost cementnega veziva, predvsem v sulfatnem okolju. Pucolanska reakcija s svojimi hidratacijskimi produkti (C-S-H gel) povzroči zmanjšanje kapilarne poroznosti cementnega kamna, kar se odraža v višji mehanski trdnosti in nižji prepustnosti materiala.

Znano je, da portlandski mešani cementi z dodatkom žlindre oziroma pucolanskega materiala ob ustrezni negi na dolgi rok dosegajo višje trdnosti od portlandskih cementov brez dodatkov. Odgovor na vprašanje, zakaj je temu tako, leži v spremembi mikrostrukture cementnega kamna oziroma spremembi porazdelitve por po velikosti, saj se na račun tvorbe dodatnega C-S-H gela zmanjšujeta kapilarna poroznost ter delež kalcijevega hidroksida. Tako pride do oblikovanja bolj fine strukture, in sicer tako na področju sistema por kot na področju trdnih delcev. Pri tem moramo biti pozorni tudi na velikost žlindrinih delcev. Znano je, da žlindrini delci, manjši od 10 μm , prispevajo k zgodnji tlačni trdnosti betona (do 28 dni). Beton, ki vsebuje žlindre delce velikosti med 10 in 45 μm , svojo tlačno trdnost razvije na daljše obdobje, medtem ko delci, ki so večji od 45 μm , le s težavo hidratizirajo.

S stališča nepropustnosti in trajnosti je efekt pucolanske reakcije pomembnejši na nivoju betona kot na nivoju cementnega kamna. Prepustnost betona je namreč višja od prepustnosti cementnega kamna, predvsem zaradi mikro razpok, ki se pojavijo v stičnem območju med cementnim kamnom in večjimi zrni agregata. Zmanjšanje velikosti por in mineralnih faz odločilno vpliva na utrditev cementnega kamna v območju stičnega območja med zrni agregata in osrednjim cementnim kamnom. Žlindra tako ugodno vpliva na reduciranje pojava mikro razpok v stičnem območju.

Znan je tudi ugoden vpliv portlandskih mešanih cementov z dodatkom žlindre na notranjo sulfatno korozijo. Zaradi nižje prepustnosti in nižje vsebnosti kalcijevega hidroksida so taki betoni, (kljub temu, da s pucolanskimi dodatki v vezivo vnašamo tudi določen delež aluminija, ki se vključuje v reakcije nastanka različnih AFt in AFm spojin) pokazali odlično odpornost proti sulfatni koroziji, kljub vsebnosti C₃A.

Žlindra vpliva tudi na naslednje lastnosti sveže betonske mešanice:

- zmanjšuje potrebno količino vode za doseganje določene konsistence,
- zmanjšuje izcejanje vode in segregacijo agregata,
- zmanjšuje hidrationsko toploto,
- podaljša začetek vezanja in
- izboljša odpornost na agresivne vplive.

7.5 Hidratacija sulfatno odpornega cementa

Sulfatna korozija je ena najpogostejših in najmočnejših korozij betona. Gre za kemično reakcijo, ki se zgodi v betonu, ko je ta že v strjenem stanju. Če je strjen beton izpostavljen zunanjemu viru raztopljenih sulfatnih ionov, lahko koncentracija sulfatov v porni vodi betona naraste. Mono sulfoaluminat postane nestabilen, ko naraste koncentracija sulfatnih ionov, in zato se pretvori nazaj v etringit. Etringit ima do 2,5-krat večjo prostornino kot mono sulfoaluminat in ko votli prostori v cementni pasti ne morejo več prevzeti nadaljnjega večanja prostornine, pride do notranjih nateznih obremenitev, ki povzročijo pokanje strjenega betona. To vodi k tipičnim posledicam sulfatne agresije, izgubi prečnega prereza in trdnosti, krušenju površine betona in končno k popolnemu razpadu betona (Gerbec, b. d.).

Parametri, ki vplivajo na odpornost betona proti sulfatni agresiji so:

- sestava cementa,
- kvaliteta projektiranja (predvsem vodocementno razmerje), vgradnje in nege betona,
- koncentracija zunanjih virov sulfatnih ionov in
- stopnja izpostavljenosti betona sulfatno agresivnemu okolju.

V okviru naloge se osredotočamo na kemično sestavo cementa in mikrostrukturo cementnega kamna. Največji vpliv na sulfatno odpornost imata trikalcijev aluminat in sadra, ki sta neposredno udeležena v tvorbi etringita in mono sulfoaluminata. S količino trikalcijevega aluminata kontroliramo količino mono sulfoaluminata, ki nastaja v svežem betonu, in s tem količino mono sulfoaluminata, ki bi se lahko v strjenem betonu pretvoril v etringit. Zato so cementi z nizkim odstotkom C_3A komponente odpornejši proti koroziji.

Z vidika mikrostrukture cementnega kamna imata glavno vlogo pri odpornosti proti sulfatni koroziji struktura por v betonu in vsebnost kemijsko nevezane porne vode. Struktura sistema por v betonu določa njegovo prepustnost in s tem možnost prodora sulfatov iz okolja. Zato je za doseganje korozijske odpornosti potrebna visoka odpornost proti prodoru vode (PV-III), kar lahko dosežemo z naslednjimi ukrepi:

- povečanje vsebnosti cementa v betonski mešanici in posledično zmanjšanje vodocementnega razmerja,

- uporaba plastifikatorjev in superplastifikatorjev, ki zmanjšujejo potrebo po vodi,
- uporaba aerantov, ki prispevajo k nižji vodovpojnosti betonov in
- uporaba cementov s pucolanskimi dodatki, ki zvišujejo gostoto cementnega kamna.

Poznani so še naslednji vplivi mikrostrukture cementnega kamna iz sulfatno odpornega cementa na sveži in strjeni beton:

- Sulfatno odporni cementi z nižjimi vsebnostmi minerala C_3A oziroma brez vsebnosti le-tega izkazujejo nižjo zgodnjo trdnost od primerljivih portland cementov z istim deležem klinkerja. Mineral C_3A namreč bistveno prispeva k omenjenim tlačnim trdnostim.
- Cementi z omejeno vsebnostjo trikalcijevega aluminata imajo počasnejši razvoj hidratacijske toplote.
- Sulfatnoodporni cementi so praviloma bolj grobo mleti, kar zmanjšuje njihovo potrebo po vodi, zato imajo betoni iz sulfatnoodpornega cementa praviloma nižje vodocementno razmerje. To se odraža v bolj gosti strukturi cementnega kamna ter stičnega območja, zato so zelo odporni na prodor vode.

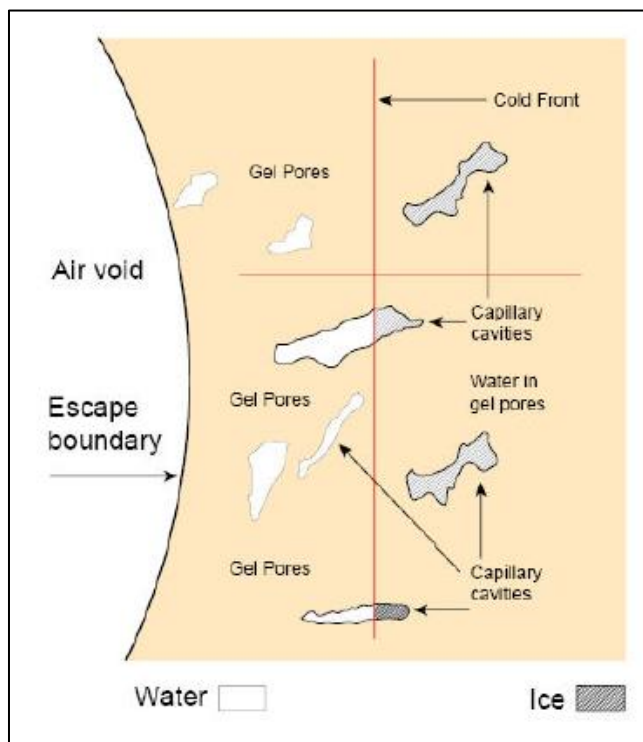
7.6 Vpliv mikrostrukture cementnega kamna na odpornost betona proti zmrzovanju (povzeto po Mehta in Monteiro, 2006)

V hladnih klimatskih pogojih, kjer temperature pozimi variirajo okrog temperature ledišča, prihaja do pogostih poškodb na izpostavljenih betonskih površinah zaradi delovanja zmrzali. Propadanje strjenega betona zaradi zmrzovanja in tajanja lahko pripišemo zapleteni mikrostrukturi materiala, poškodbe, ki nastajajo, pa so različnih oblik. Poškodba se po navadi začne s površinsko liso, ki je posledica naključnih nevzporednih razpok. Sčasoma pride do večjih razpok, ki so posledica ekspanzije matrice cementnega kamna zaradi ciklov zmrzovanja in tajanja. Če pa je med zmrzovanjem in tajanjem beton podvržen še vplivom vlage in talilne soli, pride še do luščenja betona. Kot učinkovit način zmanjševanja poškodb betona zaradi zmrzovanja/tajanja se je izkazal vnos zračnih mehurčkov v betonsko mešanico.

T. C. Powers je bil prvi, ki je razložil delovanje zmrzovanja/tajanja na cementni kamen in odgovoril na vprašanje, zakaj je vnašanje zraka učinkovit način preprečevanja poškodb zaradi vplivov zmrzovanja in tajanja.

»Ko voda začne zmrzovati v kapilarnih porah, se njena prostornina poveča za 9 %. Zaradi tega pride do hidravličnega pritiska, katerega velikost je odvisna od oddaljenosti do mesta, kjer se pritisk lahko sprost, prepustnosti materialov in hitrosti, s katero nastaja led. Izkušnje kažejo, da bo do 'kritičnega' pritiska prišlo v nasičenem vzorcu cementnega kamna, razen če je vsaka kapilarna pora oddaljena največ

0,1 mm od mesta, kjer se pritisk lahko sprostí. Takšne pogoje lahko ustvarimo le z vnosom zračnih mehurčkov v cementni kamen«.

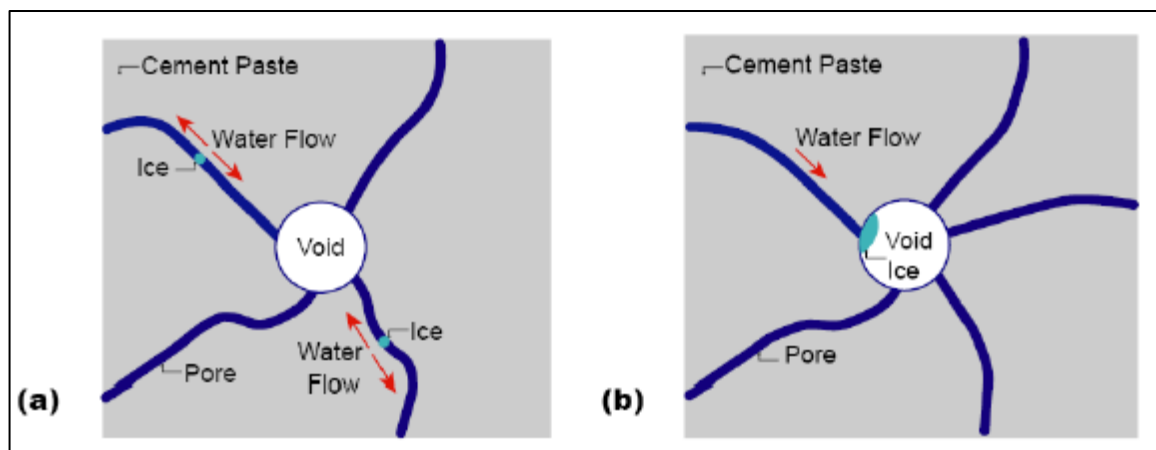


Slika 7.4: Prikaz nastajanja ledu v porah (Mehta in Monteiro, 2006 str. 139)

Powers je odkril, da na destruktivno ekspanzijo cementnega kamna poleg hidravličnega pritiska dodatno vpliva tudi osmotski tlak, ki je posledica delnega zmrzovanja raztopin v kapilarnih porah. Ker voda v kapilarah vsebuje v njej raztopljene snovi, kot so alkalije, kloridi in kalcijev hidroksid, zmrzne pri bistveno nižji temperaturi kot čista voda. Tako pride zaradi različnih lokalnih gradientov koncentracije soli v kapilarah do osmotskega tlaka.

Hidravlični in osmotski tlak pa nista edina vzroka za ekspanzijo cementnega kamna in s tem povezanimi poškodbami. Ocenjeno je, da voda v gelnih porah ne zmrzne nad $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tako potem v zasičenem cementnem kamnu, ki je izpostavljen zmrzovanju, voda v velikih porah zmrzne, medtem ko je voda v gelnih porah še vedno tekoča v superpodhlajenem stanju. To ustvari termodinamično neravnovesje med zmrznjeno vodo v kapilarah, ki vsebuje nizko energijsko stanje, in superpodhlajeno vodo v gelnih porah, ki ima visoko energijsko stanje. Razlika med entropijo ledu in superpodhlajeno vodo povzroči, da se voda iz gelnih por premakne proti kapilaram, torej proti nizko energijskemu stanju, kjer lahko zmrzne. Ta nova voda v kapilarnih porah povečuje prostornino ledu vse do takrat, ko zmanjka prostora za širjenje. Vsak nadaljnji dotok superpodhlajene vode povzroči notranji pritisk in ekspanzijo cementnega kamna. Ni pa nujno, da ta mehanizem vedno povzroči mehanske poškodbe. Do mehanskih poškodb

pride, ko obstajajo za to pogoji (velik temperaturni gradient, nizka prepustnost, visoka stopnja zasičenosti). Prav tako je znano, da se nagnjenost določenih območji k širjenju kompenzira z območji v cementnem kamnu, v katerih prihaja do krčenja. Opazovanja pod mikroskopom so pokazala, da kadar pride do tvorbe ledu v zračni pori, prihaja do krčenja v cementnem kamnu (Mehta in Monteiro, 2006).



Slika 7.5: Prikaz nastajanja ledu v kapilarni (a) in v zračni (b) pori (Mehta in Monteiro, 2006 str. 140)

Glede na zgornja dejstva je jasno, da na zmrzlinško odpornost betona vplivajo karakteristike cementnega kamna ter seveda kvaliteten zmrzlinško odporen agregat. Zmrzlinška odpornost betona je tako odvisna od naslednjih parametrov:

- lokacije meje sprostitve nastale napetosti (razdalja, ki jo mora voda prepotovati, da doseže območje sprostitve pritiska),
- vodocementnega razmerja (višje, kot je vodocementno razmerje, več vode zmrzne v porah in slabša je trajnost betona),
- strukture pornega sistema (velikost, število in razporejenost por),
- stopnje zasičenosti (količina prisotne vode),
- prepustnosti (kontrolira hidravlični pritisk, ki je povezan z notranjim gibanjem vode med zmrzovanjem, ter kritično stopnjo zasičenosti pred zmrzovanjem),
- hitrosti ohlajanja ter
- natezne trdnosti materiala, ki mora biti prekoračena, da pride do razpok.

Jasno je, da za zagotavljanje odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju ni bistvena celotna vsebnost zraka. Pri dani prostornini vnesenega zraka zmrzlinška odpornost betona namreč lahko zelo niha, saj je odvisna predvsem od razdalje med zračnimi mehurčki in s tem od njihove velikosti in porazdelitve v cementnem kamnu. Izkušnje kažejo, da v smislu zmrzlinške odpornosti običajnega vibriranega betona dajejo najboljše rezultate vneseni zračni mehurčki velikosti 0,15–0,25 mm, ki so v povprečju medsebojno oddaljeni 0,1–0,2 mm. Tako strukturo por v betonu je moč doseči z dodatki, imenovanimi

aeranti. Vneseni zračni mehurčki prekinejo mrežo finih kapilar, kar zmanjša kapilarno vpijanje vode, poleg tega pa ima voda, ki v primeru izpostavljenosti betona mrazu zamrzne, dovolj prostora za neovirano širjenje. V strukturi aeriranega betona se pojavijo bistveno manjše napetosti zaradi zamrzovanja vode kot v primeru odsotnosti zračnih mehurčkov, s čimer se bistveno zmanjša nevarnost poškodb betonske strukture. Z aeriranjem betonske mešanice se izboljša tudi obdelavnost svežega betona ter poveča odpornost na segregacijo.

8 PRAKTIČNI DEL

8.1 Uvod

Eksperimentalni del magistrske naloge smo izvedli v laboratorijih družbe Salonit Anhovo d.d. ter Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Cilj eksperimentalnega dela je bila priprava betonske mešanice, primerne za vgradnjo v obrabno plast betonskega vozišča, obdelanega po metodi izpostavljenih zrn agregata, in s tem praktična preverba dela zahtev, ki smo jih podali v teoretičnem delu naloge.

Pri tem nas je še posebej zanimal vpliv cementa na svež in strjen beton. Tako smo pri pripravi betona po recepturi, ki smo jo predhodno sprojektirali, uporabili dve različni vrsti cementa in na ta način lahko opazovali njun vpliv na karakteristike betona. Za potrebe naloge smo izvedli laboratorijski razvoj portlandskega mešanega cementa z dodatkom žindre. Drugi cement, ki smo ga uporabili, je bil sulfatno odporni cement, ki se je v praksi že odlično izkazal. Betona, ki smo ju proizvedli, smo poimenovali beton CEM I in beton CEM II.

Na svežem betonu smo izvedli preiskavo vsebnosti por v betonu, izmerili konsistenco z razlezom ter posedom in izmerili prostorninsko maso betona. Na strjenem betonu smo v laboratoriju FGG testirali odpornost na prodor vode ter tlačno in cepilno natezno trdnost. Zmrzlinsko odpornost betona smo preverili z metodo linijske mikroskopske analize. Dobljene rezultate smo primerjali z zahtevami za obrabni beton voziščnih konstrukcij in podali komentar oziroma predloge za izboljšavo mešanice.

8.2 Laboratorijski razvoj cementa CEM II/B-S 42,5N

Družba Salonit Anhovo d.d. trenutno ne proizvaja cementa, katerega osnovni namen bi bila uporaba za izvedbo krovnih plasti betonskih vozišč. Razlog za to je predvsem v nizkem povpraševanju na trgu. Do sedaj je bilo namreč v Sloveniji s cementnim betonom zgrajenih 40 km vozišč, kar predstavlja zgolj 3 % vozni površin na slovenskih AC (Mrzelj, 2013).

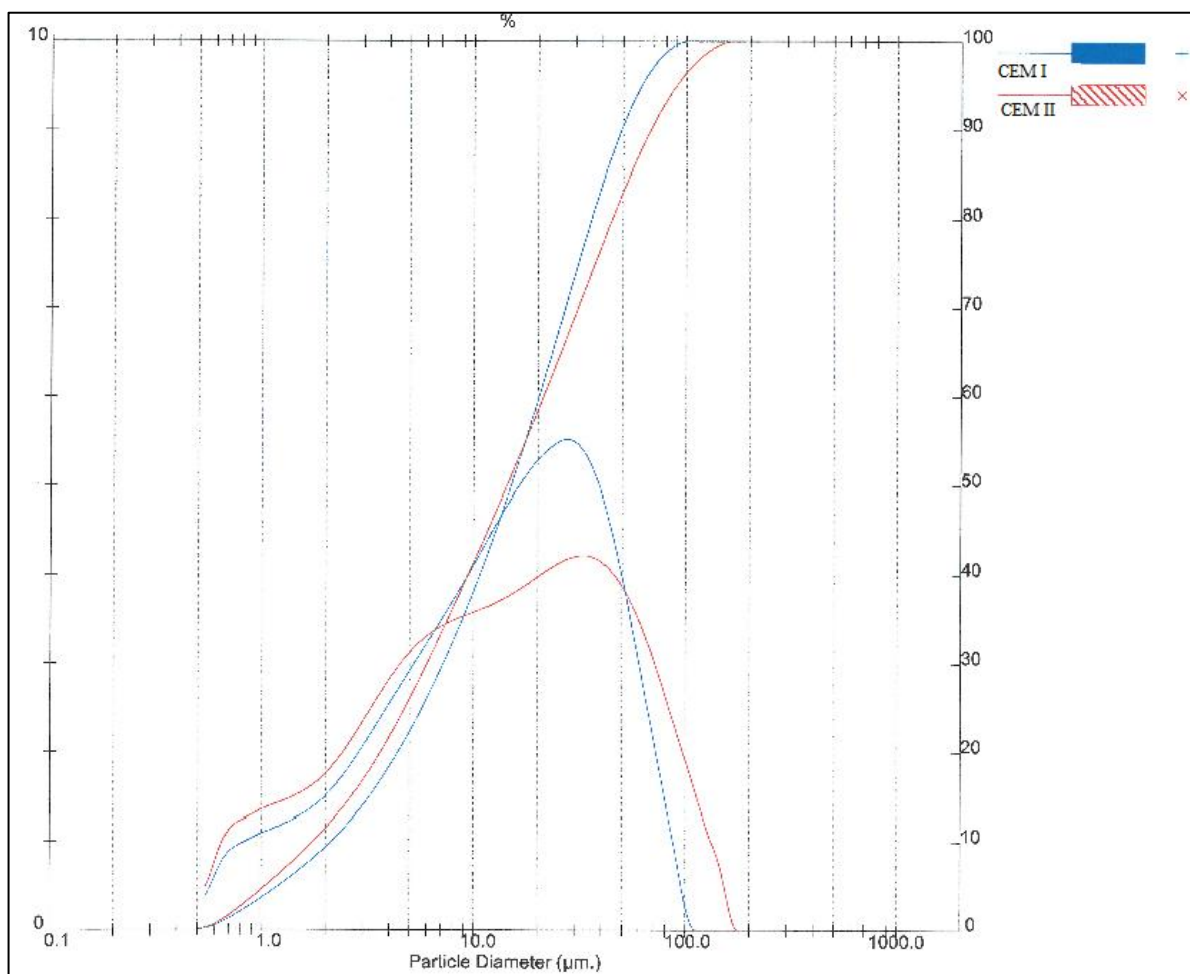
Kljub temu so bili cementi iz družbe Salonit Anhovo d.d. že uporabljeni za izvedbo betonskega vozišča. Nazadnje se je za primerne izkazal sulfatno odporen cement z oznako CEM I/42,5N SR0 (v nadaljevanju CEM I), ki je bil med drugim vgrajen tudi v betonsko vozišče predora Markovec. Cement se je odlično obnesel tako z vidika reoloških kot tudi mehanskih lastnosti betona. Slabi lastnosti omenjenega cementa z vidika uporabe v cestogradnji pa sta njegova temnejša barva in nekoliko višja cena, zaradi vsebnosti sulfatno odpornega klinkerja. Posledično ima ta cement tudi nekoliko višji ogljični odtis od portlandskih mešanih cementov z dodatkom pucolanov.

Zaradi vse večje ozaveščenosti gradbene industrije glede uporabe trajnostnih, okolju prijaznejših materialov in zaradi velikega potenciala cestogradnje, ki lahko kot ena osrednjih gradbenih panog odigra pomembno vlogo v teh prizadevanjih, smo se po priporočilih avstrijskih smernic za betonska vozišča v okviru magistrske naloge odločili za laboratorijski razvoj cementa CEM II/B-S 42,5 N. Ta cement naj bi po izkušnjah iz tujine izpolnjeval visoke kriterije za betonska vozišča tako z vidika reoloških kot tudi mehanskih lastnosti. Dodatna prednost je svetlost končne betonske površine zaradi vsebnosti žindre. Žindra nadomešča klinker v vsebnosti do 35 % mase cementa ter prispeva k zmanjševanju ogljičnega odtisa tega cementa.

CEM II/B-S 42,5N (v nadaljevanju CEM II) je portlandski mešani cement z dodatkom žindre, ki ga definira standard SIST EN 197-1:2011. Cement se uvršča v trdnostni razred 42,5N, kar pomeni, da mora znašati zgodnja tlačna trdnost pri dveh dneh minimalno 10 MPa, standardna tlačna trdnost pri 28 dneh pa minimalno 42,5 MPa. Oznaka B-S v imenu cementa nam pove, da je vsebnost žindre med 21 in 35 %. Dovoljeni odstotek ostalih dodatkov v cementu znaša maksimalno 5 %. V konkretnem primeru je cementu dodan manjši delež apnenca, ki igra predvsem vlogo polnila. Kot regulator vezanja je uporabljena sadra.

8.3 Primerjava laboratorijskih preiskav cementov CEM II/B-S 42,5N ter CEM I/42,5N SR0

Primerjava laboratorijskih preiskav cementa CEM II s cementom CEM I, ki nam je zaradi dobrih predhodnih izkušenj z uporabo v praksi služil kot »referenčni« cement, je pokazala, da imata cementa zelo podobne karakteristike tako z vidika mehanskih kot tudi reoloških lastnosti (preglednica 8.1). CEM II je nekoliko bolj fino mlet, saj je njegova Blaine vrednost višja za 260 cm²/g. Avstrijska smernica predpisuje za cimente, ki se uporabljajo za betonska vozišča, najvišjo dovoljeno vrednost Blaine pri 4000 cm²/g, kar izpolnjujeta oba cementa. Največja razlika med cementoma se pojavi pri ostanku na situ, premera 0,09 mm. To je posledica načina mletja, saj je bilo mletje CEM II izvedeno na manjšem laboratorijskem mlinu, medtem ko je bil CEM I industrijsko mlet. Laboratorijski mlin za razliko od industrijskega ne vsebuje separatorja grobih delcev, ki bi le-te vračal v ponovno mletje. Posledično cement CEM II vsebuje višji delež finih delcev, ki hitreje hidratizirajo, ter večji odstotek grobih delcev (večjih od 80 mikronov), ki hidratizirajo počasneje ali pa ne hidratizirajo v celoti (slika 8.1). Specifični teži cementov sta z 2,99 cm²/g pri CEM II in s 3,01 cm²/g pri CEM I praktično enaki.



Slika 8.1: Primerjava porazdelitve velikosti zrn cementov CEM I in CEM II

Cement CEM I izkazuje nekoliko boljše mehanske lastnosti glede tlačnih in upogibnih trdnosti, tako pri dveh kot tudi pri 28 dneh. Rezultat je zaradi višje vsebnosti klinkerja pričakovan. Pri tem je treba poudariti, da cement CEM II zaradi vsebnosti žilindre počasneje pridobiva na trdnosti, kar smo ugotovili v prejšnjem poglavju. Posledično bi bile razlike pri 90 dnevni trdnosti še manjše, medtem ko bi na dolgi rok cement CEM II lahko dosegel celo višjo končno trdnost. Z vidika betonskih vozišč je najpomembnejši kriterij dosežena upogibna trdnost pri starosti 28 dni. Le-ta mora znašati minimalno 7 MPa, kar oba cementa izpolnujeta.

Začetek vezanja je pri obeh cementih praktično isti, pri CEM I znaša 229 minut, pri CEM II pa 230 minut, s čimer oba cementa izpolnujeta kriterij 120 minut. Tako pozen čas začetka vezanja je posledica predvsem grobega mletja obeh cementov, poleg tega pa na čas precej vplivata še odsotnost trikalcijevega aluminata v primeru CEM I ter vsebnost žilindre v primeru CEM II. Samo obdobje vezanja traja nekoliko dlje pri cementu CEM II, zaključí se namreč po 277 minutah, gledano od trenutka prvega stika cementa z vodo, medtem ko se pri CEM I zaključí po 254 minutah.

Vsebnost zračnih por in razlez sta nekoliko nižja pri cementu CEM II, medtem ko je standardna konsistenca za malenkost višja. Zanimiv je predvsem rezultat glede vsebnosti zračnih por, saj bo, kot bomo videli v nadaljevanju, rezultat pri mešanicah betona ravno obraten.

Preglednica 8.1: Rezultati laboratorijskih preiskav cementov CEM I in CEM II

| Preiskava | Laboratorijske preiskave | | |
|---|--------------------------|------------------|-----------------------------|
| | CEM II/B-S 42.5 N | CEM I/42,5 N SR0 | Zahteve za betonska vozišča |
| Ostanek na situ 0,09 mm (%) | 3,3 | 0,2 | - |
| Blaine vrednost (cm ² /g) | 3860 | 3600 | < 4000 |
| Specifična teža (g/cm ³) | 2,99 | 3,01 | - |
| Vsebnost sulfata (kot % SO ₃ – klasično) | 2,56 | 2,07 | - |
| Žaroizguba (%) | 2,3 | - | - |
| Netopni ostanek (%) | 0,24 | - | - |
| UT 2 dni (MPa) | 3,9 | 4,1 | - |
| TT 2 dni (MPa) | 19,5 | 22,9 | - |
| UT 28 dni (MPa) | 7,8 | 8,1 | > 7 |
| TT 28 dni (MPa) | 47,9 | 55,1 | - |
| Vsebnost zračnih por (%) | 5,8 | 6,6 | - |
| Razlez (mm) | 165 | 176 | - |
| Standardna konsistenca (%) | 27,0 | 26,0 | - |
| Vežanje – pričetek (min) | 230 | 229 | > 120 |
| Vežanje – konec (min) | 277 | 254 | - |
| Na ₂ O _e | 0,87 | 0,62 | - |

Rezultati laboratorijskih preiskav cementa CEM II potrjujejo, da cement ustreza predpisanim zahtevam za proizvodnjo betona, primerne za vgradnjo v betonska vozišča. Tudi primerjava karakteristik s sulfatno odpornim cementom kaže na to, da gre za cement, s katerim bo moč pripraviti beton, ki bo ustrezen tako z vidika mehanskih kot tudi reoloških lastnosti.

8.4 Sestavine betonske mešanice

8.4.1 Agregat

Izdelava betonske površine primerne za obdelavo po metodi izpostavljenih zm agregata nam je narekovala izbiro dveh oziroma treh frakcij agregata z $D_{\max} = 8$ oziroma 11 mm. Odločili smo se za uporabo peska 0/2 ter agregata frakcije 4/8 in 8/11.

Iz preglednice 8.2 lahko razberemo, da uporabljeni pesek iz kamnoloma Černotiče frakcije 0/2 ne izpolnjuje kriterijev glede odpornosti proti drobljenju in zaglajevanju, ki jih podajajo avstrijske smernice. Čeprav sta ti dve vrednosti v avstrijskih smernicah predpisani kot absolutni in odstopanja niso dovoljena, lahko zasledimo, da na primer v Nemčiji dovoljujejo odstopanje glede stopnje odpornosti proti zaglajevanju, v standardu SIST 1026:2016 pa je odpornost proti drobljenju določena v odvisnosti od stopnje izpostavljenosti XM. Odpornost proti drobljenju in odpornost proti zaglajevanju sta namreč odvisni od stopnje prometne obremenitve – višja, kot je obremenitev, višji so kriteriji za omenjeni karakteristiki. Uporabljeni pesek tako brez dvoma ni primeren za vgradnjo v vozišča, ki bodo podvržena težkim prometnim obremenitvam, medtem ko bi se lahko v primeru lahke prometne obremenitve v praksi izkazal kot povsem ustrezen. Ostale karakteristike izpolnjujejo zahteve za krovne plasti betonskih vozišč, kljub temu, da ne gre za pesek eruptivnega, temveč karbonatnega izvora. Poudariti pa tudi velja, da pesek izpolnjuje predpisane zahteve za vgradnjo v spodnjo plast betona.

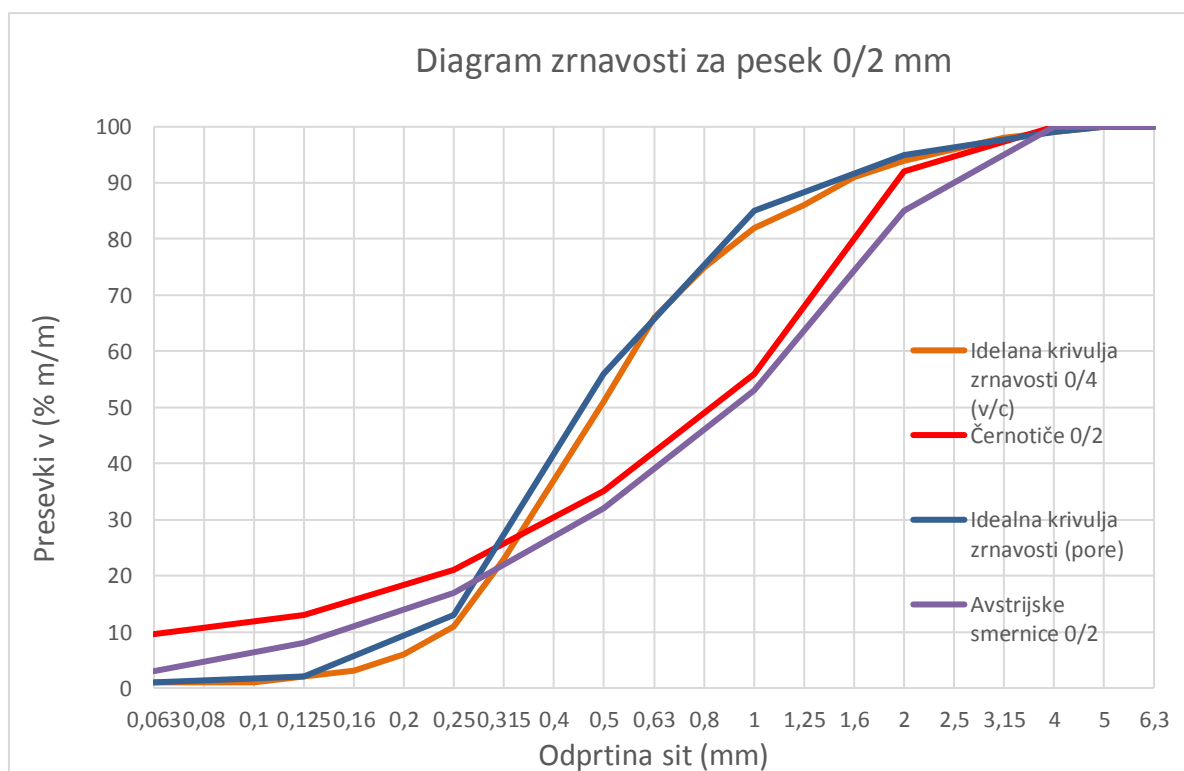
Preglednica 8.2: Primerjava karakteristik peska Černotiče 0/2 z zahtevami v RS in Avstriji

| Preiskava | Černotiče 0/2 | Zahteve – RS | Zahteve – Avstrija |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| Sestava zrn agregata | G _f 85 | G _f 85 | G _f 85 |
| Prostorninska masa zrn | 2,70 Mg/m ³ | - | - |
| Vsebnost finih delcev | f ₁₀ | f ₁₀ | f ₁₀ |
| Odpornost proti drobljenju | LA ₂₅ | LA ₃₅₋₂₀ | LA ₂₀ |
| Odpornost proti zaglajevanju | PSV ₃₂ | PSV ₅₀ | PSV ₅₀ |
| Odpornost proti obrabi | M _{DE10} | M _{DE25} | - |
| Kislinsko topni sulfati | AS _{0,2} | - | AS _{0,8} |
| Vodovpojnost | WA ₂₄ = 1,0 % | WA ₂₄ = 1,0 % | - |
| Odpornost proti zmrzovanju in tajanju | MS ₁₈ | MS ₁₈ | F ₁ |

Bolj kot mehanske karakteristike uporabljenega peska, nas z vidika te magistrske naloge zanima zrnastostna sestava peska. Graf medsebojne primerjave krivulj zrnastosti na sliki 8.2 pokaže, da ima uporabljeni pesek zelo podobno krivuljo zrnastosti, kot jo predpisujejo Avstrijske smernice. Zato smo

se odločili, da ta pesek uporabimo za pripravo betona, saj nam omogoča preveriti ustreznost zahteve glede zrnastostne sestave v avstrijski smernici.

Krivulja zrnastosti uporabljenega peska pa odstopa od 'idealne krivulje zrnastosti', ki smo jo predstavili v poglavju 5.4. V primerjavi z 'idealno' krivuljo ima uporabljeni pesek bistveno višji odstotek presevka skozi sito 0,25 mm, kar bi lahko bilo problematično z vidika tvorbe por. Za drobljenec je namreč značilno, da ima večji delež delcev pod 0,125 mm. 'Idealni' pesek naj bi vseboval tudi več kot 30 % zrn premera med 0,25 in 0,5 mm, medtem ko ima uporabljeni pesek zgolj 14 % takih zm.



Slika 8.2: Graf primerjave zrnastostne krivulje peska Černotiče 0/2

Kot grobi agregat smo uporabili silikatni agregat eruptivnega izvora iz separacije Bleiberg v Avstriji, frakcije 4/8 in 8/11, ki je bil vgrajen v obrabno betonsko plast vozišča v predoru Markovec in izpolnjuje vse zahteve, podane v preglednici 5.3.

8.4.2 Cement

Za izdelavo betonskih mešanic smo uporabili cementa, opisana v poglavju 8.3, CEM II/B-S 42,5N ter CEM I/42,5N SR0.

8.4.3 Voda

Uporabili smo pitno vodo iz vodovoda Anhovo.

8.4.4 Plastifikator in superplastifikator

Za splošno izboljšanje kvalitete betona smo uporabili plastifikator Cementol Delta Extra. Plastifikator ugodno deluje na zadrževanje vode, izboljša plastičnost in učinkovitost betona ter poveča njegovo trdnost z znižanjem vodocementnega razmerja. Priporočena dozacija s strani proizvajalca znaša 0,2–0,6 % na maso cementa (TKK Srpenica d.d., 2013).

Uporabili smo tudi superplastifikator Cementol Hiperplast 182. Gre za visoko učinkovit superplastifikator na osnovi polikarboksilatov, posebej primeren za izdelavo gradbiščnih in transportnih betonov z nižjimi dozami cementa in višjimi zahtevami glede časa obdelavnosti sveže betonske mešanice. Proizvajalec navaja, da je superplastifikator primeren tudi za izdelavo betonskih tlakov. Priporočena okvirna dozacija s strani proizvajalca naj bi znašala med 0,3 – 1,5 % na maso cementa.

Uporaba superplastifikatorja omogoča:

- močno zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti betona in s tem povečanje trdnosti betona,
- močno izboljšanje obdelavnosti betona ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode,
- nima negativnih učinkov na razvoj zgodnjih trdnosti in
- vzdrževanje zahtevane konsistence svežega betona dlje časa kot pri uporabi superplastifikatorjev predhodnih generacij.

Omenjena dodatka smo mešanici betona dodajali razredčena z delom zamesne vode v času mešanja.

8.4.5 Aerant

Za uvajanje zračnih mehurčkov v svež beton smo uporabili aerant Cementol Eta S. Gre za tekočino rumeno-rjave barve z gostoto 1,01 kg/dm³. Priporočena dozacija znaša 0,02 – 0,30 % glede na maso cementa. Mešanici betona smo ga dodajali razredčenega z delom zamesne vode v času mešanja.

8.5 Receptura betonske mešanice

V okviru praktičnega dela naloge smo se odločili za pripravo črpnega betona, razreda konsistence F4 oziroma S4, primerne za vgradnjo v obrabno plast krovne plasti voziščne konstrukcije, izvedeno s tehniko fiksne opaže in z uporabo vibracijske letve. Uporaba take vrste betona je primerna za gradnjo krajših odsekov cest, krožnih križišč in povsod, kjer bi bila uporaba finišerja ekonomsko neupravičena.

Pri projektiranju betonske mešanice (preglednica 8.4) smo se odločili, da bomo sledili strogim kriterijem, ki veljajo za betonska vozišča v Avstriji. To se odraža predvsem pri izbiri vsebnosti cementa, ki znaša kar 450 kg/m^3 . Ostale zahteve, prikazane v preglednici 8.3, ustrezajo tudi minimalnim predpisanim zahtevam v RS in Nemčiji. Izhodiščno vodocementno razmerje smo postavili pri 0,4, z razlogom, da bomo imeli pri doseganju želenega konsistenčnega razreda nekoliko rezerve in tako lahko po potrebi dodajali vodo.

Preglednica 8.3: Projektne zahteve za betonsko mešanico

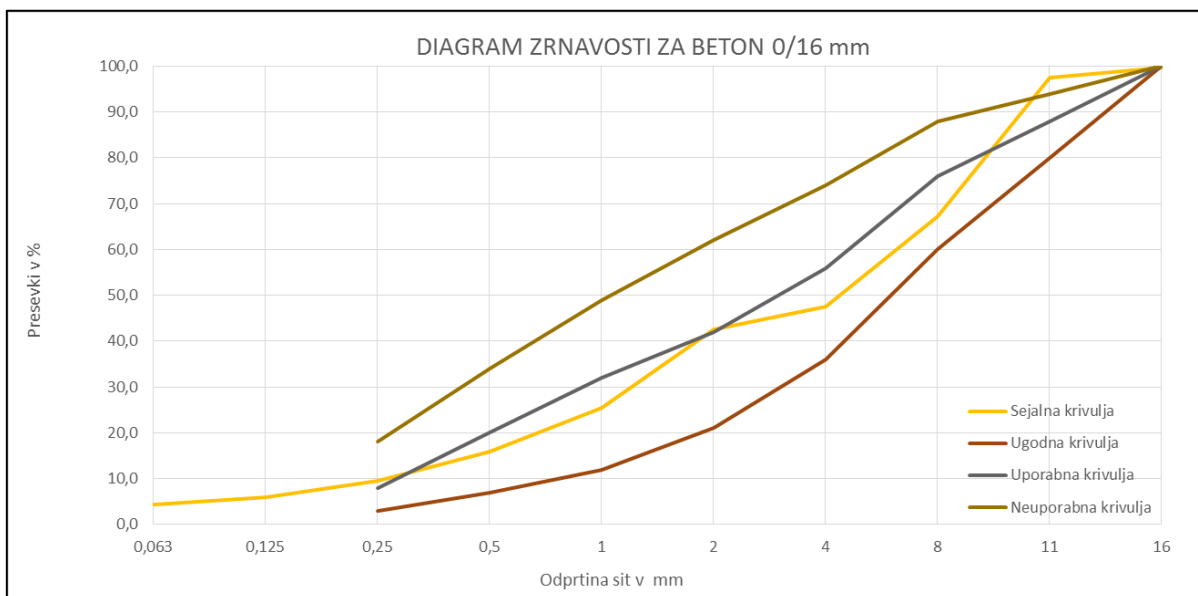
| Zahteva | Razred |
|------------------------|---------------------------------------|
| Razred tlačne trdnosti | C30/37 |
| Klasifikacija | XF4, XM2, (XD3), D_{\max} 11, PV-II |
| Vodocementno razmerje | 0,4 |
| Konsistenca | S4 (160–210 mm), F4 (490–550 mm) |
| Vsebnost por | 5,0–7,0 % |

Količino potrebnih dodatkov, se pravi aeranta, plastifikatorja in superplastifikatorja, smo določili s pomočjo predpisanih okvirnih dozacij in s predhodnimi poizkusnimi mešanji betona.

Preglednica 8.4: Receptura betonske mešanice

| Vhodne surovine | Proc. (%) | Masa (kg) | Specifična masa (kg/dm^3) | Volumen v litrih | Material za test, (25 l) v kg |
|-------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Vrsta cementa | | | | | |
| Cement CEM I / CEM II | - | 450 | 3,01 | 149,50 | 11,250 |
| Voda | - | 177,02 | 1 | 177,02 | 4,426 |
| Vsebnost por | 5 | - | - | 50 | 0,000 |
| Dodatki | | | | | |
| Cementol hiperplast 182 | 0,40 | 1,8 | 1,08 | 1,67 | 0,045 |
| Cementol delta extra | 0,30 | 1,35 | 1,21 | 1,12 | 0,034 |
| Eta S | 0,044 | 0,20 | 1,01 | 0,20 | 0,0050 |
| Agregat | | 1675,35 | 2,70 | 620,50 | 41,884 |
| 0/2 Černotiče | 45,00 | 753,91 | 2,70 | 279,22 | 18,848 |
| 4/8 Bleiberg | 20,00 | 335,07 | 2,70 | 124,10 | 8,377 |
| 8/11 Bleiberg | 35,00 | 586,37 | 2,70 | 217,17 | 14,659 |

Da bi dosegli konsistenco črpnega betona, smo pri izbiri mešanice agregata dodali nekoliko višji delež peska, kot ga priporoča avstrijska smernica v primeru izpostavljenih zrn agregata. Iz grafa na sliki 8.3 lahko vidimo, da krivulja zrnivosti relativno dobro sledi predpisani uporabni krivulji zrnivosti.



Slika 8.3: Zrnavostna krivulja mešanice agregata

8.6 Preskušanje svežega betona

Preiskave svežega betona smo izvedli v betonskem laboratoriju podjetja Salonit Anhovo d.d. Izvedene preiskave, postopki in uporabljena oprema pri delu so bili v skladu s standardi skupine SIST EN 12350. Izvedli smo naslednje preiskave:

- preskus s posedom po SIST EN 12350-2,
- preskus z razlezom po SIST EN 12350-5,
- določitev gostote po SIST EN 12350-6 in
- določitev vsebnosti zraka – metoda s pritiskom po SIST EN 12350-7.

Glede na obseg predvidenih preiskav na svežem in strjenem betonu, je potrebna količina betona znašala približno 50 litrov za posamezno vrsto betona. Odločili smo se, da bomo izvedli dve ločeni mešanji betona, vsako po 25 litrov. To nam je omogočilo, da smo lahko pri drugem mešanju korigirali količino aeranta glede na izmerjeno vsebnost zraka v betonu.

8.6.1 Rezultati preiskav svežega betona – beton CEM I

Mešanje smo izvajali s tako imenovanim prisiljenim mešalcem betona kapacitete do 200 l. Med mešanjem prve sarže se je pokazalo, da beton potrebuje celo nekoliko manj zamesne vode, kot smo predvideli pri projektiranju mešanice. Najprej smo namreč na suho zamešali agregat in cement, nato smo dodali 2/3 vode in zatem dodatke, razredčene z vodo. Preostalo vodo smo nato dodajali postopoma, pri čemer nam je na koncu ostalo 166 g vode od predvidenih 4426 gramov zamesne vode. Preskusa s posedom in z razlezom sta namreč pokazala, da smo dosegli želena konsistenčna razreda. Preračunano novo vodocementno razmerje je bilo 0,382. Ob upoštevanju tega vodocementnega razmerja smo zamešali tudi drugo mešanico betona CEM I (saržo). Smiselno bi sicer bilo, da bi nekoliko znižali količino superplastifikatorja in povišali vsebnost vode, vendar smo se, zaradi omejenosti s količino razpoložljivega eruptivnega agregata, odločili, da korekcij ne bomo opravili. V praksi pa bi mešanico korigirali zaradi ekonomskih razlogov. Preiskava s porozimetrom je pokazala, da znaša poroznost prve betonske mešanice 5,1 %, kar ustreza predpisanim zahtevam. Pri drugem mešanju smo se odločili, da malenkost zvišamo odstotek aeranta, in sicer za 0,004 % mase cementa. Posledično smo dobili nekaj višji delež por, in sicer 5,4 %.

Med pripravo betona je temperatura zraka v laboratoriju znašala 22 °C pri 47 % vlažnosti. Beton v prvi mešanici je dosegel temperaturo 21,6 °C, pri drugi mešanici pa 22,2 °C.

Preglednica 8.5: Rezultati preiskav svežega betona - CEM I

| CEM I/42,5N SR0 | 1. mešanje | 2. mešanje | Dosežen razred konsistence |
|---|-------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Posed (mm) | 170 | 200 | S4 (160-210) |
| Razlez (mm) | 540 | 550 | F4 (490-550) |
| Vsebnost zraka (%) | 5,1 | 5,4 | / |
| Prostorninska masa (kg/m ³) | 2405,1 | 2407,6 | / |
| Vsebnost aeranta (%) | 0,04 | 0,044 | / |



Slika 8.4: Prikaz preskusa s posedom

8.6.2 Rezultati preiskav svežega betona – beton CEM II

V primeru betona CEM II smo uporabili vso predvideno zamesno vodo, kar pomeni, da je vodocementno razmerje znašalo 0,4. Tudi v primeru betona CEM II smo dosegli zelena razreda konsistence. Pri prvem mešanju smo obdržali isto vsebnost aeranta kot pri drugem mešanju betona CEM I, in sicer 0,044 % mase cementa. Preiskava s porozimetrom je pokazala, da ima betonska mešanica previsoko vsebnost por (8 %) glede na predpisane kriterije. Posledično smo pri drugem mešanju količino aeranta znižali nazaj na 0,04 % mase cementa in tako dosegli predpisano 7 % vsebnost por v betonu.

Temperatura v laboratoriju je med mešanjem znašala 21,7 °C pri 44 % vlagi. Pri drugem mešanju je bila temperatura 22,5 °C pri 48 % vlagi, beton pa je imel temperaturo 21,5 °C.

Preglednica 8.6: Rezultati preiskav svežega betona - CEM II

| CEM II/B-S 42,5N | 1. mešanje | 2. mešanje | Dosežen razred konsistence |
|---|------------|------------|----------------------------|
| Posed (mm) | 180 | 170 | S4 (160-210) |
| Razlez (mm) | 510 | 510 | F4 (490-550) |
| Vsebnost zraka (%) | 8,0 | 7,0 | / |
| Prostorninska masa (kg/m ³) | 2298,2 | 2344,3 | / |
| Vsebnost aeranta (%) | 0,044 | 0,040 | / |



Slika 8.5: Prikaz meritve razleza

Ugotovitve:

- Beton, pripravljen s cementom CEM I, je imel nekoliko nižjo potrebo po vodi. Rezultat je skladen z laboratorijskimi preiskavami cementov in je, kot smo že ugotovili, posledica bolj

grobno mletega cementa CEM I. Na nižjo potrebo po vodi imata lahko manjši vpliv tudi odsotnost trikalcijevega aluminata ter nižji delež alkalij v cementu CEM I.

- Beton CEM I je imel boljše reološke lastnosti kot beton CEM II, kljub nižji vsebnosti vode in nižjemu deležu por. V vseh štirih mešanjih smo sicer dosegli želena razreda konsistence S4 ter F4, vendar sta bila tako razlez kot posed pri CEM I višja, kot je razvidno iz preglednic 8.5 in 8.6. Zaradi odsotnosti mineralne faze C_3A v cementu CEM I v predindukcijskem obdobju (prvih 5 – 25 min po stiku cementa in vode) ne prihaja do tvorbe etringita, kar ugodno vpliva na obdelovalnost in boljšo konsistenco betona. Drugi razlog za boljše reološke lastnosti betona CEM I se najverjetneje skriva v velikostni porazdelitvi delcev cementa, ki je v primeru cementa CEM I bolj optimizirana in s tem ugodnejša.
- Beton CEM II ima višji delež zraka. Če primerjamo drugo mešanico betona CEM I ter prvo mešanico betona CEM II, ki sta obe vsebovali 0,044 % mase cementa aeranta Eta S, znaša razlika v doseženi poroznosti kar 2,6 %. Kasneje smo kljub zmanjšanju količine aeranta na 0,04 % mase cementa še vedno dosegli za 1,6 % višjo vsebnost por. Rezultat je nekoliko nepričakovan, glede na to, da so preiskave cementa pokazale, da ima cementna pasta iz cementa CEM I za 0,8 % višjo vsebnost por. Delno bi lahko to pripisali nekoliko nižjemu vodocementnemu razmerju (čeprav je bila konsistenca višja), vendar pa najverjetnejši vzrok tiči v kompatibilnosti oziroma občutljivosti uporabljenih cementov na dodatke, predvsem aeranta. V prihodnje bi bilo smiselno testirati različne vrste aerantov, da bi lahko domnevo potrdili.
- Ne glede na vrsto uporabljenega cementa imata oba betona relativno visok delež vsebnosti por pri relativno nizki dozaciji aeranta. Z aerantom sicer v beton vnašamo predvsem mikro pore, ki k celotni vsebnosti zraka v betonu prispevajo bistveno manj kot zračne pore, ki jih v beton ujamemo med mešanjem betona. To kaže na verjetni precejšnji vpliv zrnastostne krivulje agregata, predvsem peska na celotno vsebnost zraka v betonu. Uporabljeni pesek je imel namreč bistveno višjo vsebnost delcev, manjših od 0,25 mm, kot jih predlaga tako imenovana idealna krivulja zrnastosti, ki naj bi bistveno vplivali na tvorbo por v betonu.
- Oba betona sta se izkazala kot zelo homogena. Med opravljanjem preiskav (slika 8.5) in kasnejšo vgradnjo v kalupe nismo zaznali nevarnosti segregacije, ki bi se pokazala v obliki izcejanja vode, ki sicer predstavlja nevarnost za plastične in tekoče betonske mešanice.

Po izvedenih preiskavah svežega betona smo preostanek betona s pomočjo vibracijske mize vgradili v standardne kalupe dimenzije 150 x 150 x 150 mm. Iz prvih mešanj betona CEM I in CEM II smo pripravili po štiri vzorce, iz drugih mešanj pa po pet vzorcev, skupaj tako 9 kock za vsako vrsto betona. Vzorce smo ustrezno označili, jih prekrili s polivinilom, da smo preprečili izhlapevanje

vode, in jih pustili v laboratoriju na temperaturi 20 ± 2 °C. Po 24 urah smo kocke razkalupili in jih položili v bazen s temperaturo vode 20 ± 2 °C, kjer smo jih negovali do preiskav na strjenem betonu.

8.7 Preiskave na strjenem betonu

Preiskave strjenega betona smo opravili v laboratoriju FGG. Preiskave, postopki in uporabljena oprema so bili v skladu s standardi skupine SIST EN 12390. Opravili smo naslednje preiskave:

- tlačna trdnost betona po SIST EN 12390-3,
- razcepna (cepilna) natezna trdnost po SIST EN 12390-6 in
- globina prodora vode pod pritiskom po SIST EN 12390-8.

Tlačna trdnost betona je podana z enačbo:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (8.1),$$

kjer pomeni:

f_c – tlačna trdnost (N/mm²),

F – največja sila (N),

A_c – površina vodoravnega prereza preizkušanca (mm²).

Cepilna natezna trdnost je podana z enačbo:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (8.2),$$

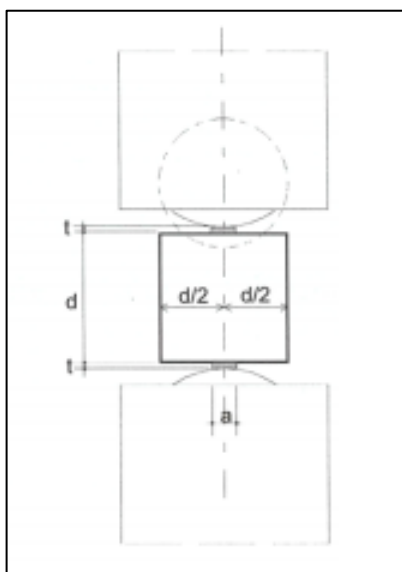
kjer pomeni:

f_{ct} – cepilna natezna trdnost (N/mm²),

F – največja sila (N),

L – dolžina raznosa sile (mm),

d – nazivna dimenzija prečnega prereza (mm).



Slika 8.6: Shematski prikaz določanja cepilne natezne trdnosti po SIST EN 12390-6

Zaradi zmanjšanja potrebnega števila vzorcev smo preiskavo globine prodora vode pod pritiskom ter preiskavo cepilne natezne trdnosti opravili na istih vzorcih. To smo storili tako, da smo na treh vzorcih starosti 25 dni najprej opravili preiskavo globine prodora vode pod pritiskom, ki traja tri dni, in nato 28. dan starosti betona opravili še preiskavo cepilne natezne trdnosti betona. S poružitvijo vzorca smo najprej dobili največjo cepilno silo, s prereza razcepljenega preskušanca pa smo v nadaljevanju odčitali globino prodora vode. Glede na standard SIST EN 12390-8 naj bi preiskavo globine prodora vode pod pritiskom sicer izvajali pri starosti preizkušanca najmanj 28 dni, vendar za potrebe te magistrske naloge to ni bilo bistveno.

8.7.1 Rezultati preiskav strjenega betona – beton CEM I

Preglednica 8.7: Rezultati preiskave tlačne trdnosti – CEM I

| Kocka | Sila (kN) | Tlačna trdnost (MPa) | Povprečna tlačna trdnost (MPa) |
|-------|-----------|----------------------|--------------------------------|
| 1 | 1696 | 75,37 | 76,6 |
| 2 | 1764 | 78,4 | |
| 3 | 1711 | 76,04 | |

Po EC 2 se karakteristično tlačno trdnost izračuna po enačbi (8.3).

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,64 \times \sigma_f$$

$$f_{ck} = f_{cm} - \Delta f = f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad (8.3)$$

Beton CEM I se z doseženo karakteristično tlačno trdnostjo 68,6 MPa uvršča v trdnostni razred C55/67.

Preglednica 8.8: Rezultati preiskave cepilne natezne trdnosti in prodora vode pod pritiskom – CEM I

| Kocka | Sila (kN) | Cepilna trdnost (MPa) | Povprečna cepilna trdnost (MPa) | Prodor vode (mm) | Povprečen prodor vode (mm) |
|-------|-----------|-----------------------|---------------------------------|------------------|----------------------------|
| 4 | 139 | 3,93 | 3,85 | 5,6 | 3,4 |
| 5 | 133,7 | 3,78 | | 1 | |
| 6 | 135,4 | 3,83 | | 3,6 | |

Povprečna cepilna natezna trdnost betona znaša 3,85 MPa. Najvišjo cepilno trdnost doseže kocka 4, ki je vsebovala za 0,3 % manj por od ostalih dveh kock. Glede na rezultate prodora vode lahko betonu pripišemo stopnjo odpornosti proti prodoru vode PV-III.



Slika 8.7: Prikaz preiskave cepilne natezne trdnosti



Slika 8.8: Prikaz porušenega prereza betonskega vzorca kot rezultat preizkusa cepilne natezne trdnosti

8.7.2 Rezultati preiskav strjenega betona – beton CEM II

Preglednica 8.9: Rezultati preiskave tlačne trdnosti – CEM II

| Kocka | Sila (kN) | Tlačna trdnost (MPa) | Povprečna tlačna trdnost (MPa) |
|-------|-----------|----------------------|--------------------------------|
| 1 | 1388 | 61,7 | 62,0 |
| 2 | 1409 | 62,6 | |
| 3 | 1391 | 61,8 | |

Beton CEM II se z doseženo povprečno tlačno trdnost 54,0 MPa uvršča v trdnostni razred C40/50.

Preglednica 8.10: Rezultati preiskave cepilne natezne trdnosti in prodora vode pod pritiskom – CEM II

| Kocka | sila (kN) | cepilna trdnost (MPa) | Povprečna cepilna trdnost (MPa) | Prodor vode (mm) | Povprečen prodor vode (mm) |
|-------|-----------|-----------------------|---------------------------------|------------------|----------------------------|
| 4 | 129,3 | 3,66 | 3,99 | 11,5 | 9,9 |
| 5 | 147,8 | 4,18 | | 7,3 | |
| 6 | 145,8 | 4,13 | | 10,9 | |

Povprečna cepilna natezna trdnost betona znaša 3,99 MPa. Med rezultati posebej izstopa kocka 4, kar je posledica tega, da kocka pripada 1. mešanju in vsebuje 1 % več por od ostalih dveh kock. Rezultat ponovno kaže na precejšen vpliv vsebnosti por na cepilno natezno trdnost betona. Glede na rezultate prodora vode lahko betonu pripišemo stopnjo odpornosti proti prodoru vode PV-III.



Slika 8.9: Prikaz preiskave tlačne trdnosti



Slika 8.10: Prikaz preiskave prodora vode pod pritiskom

Ugotovitve:

- Oba betona dosežeta zahtevani razred tlačne trdnosti C30/37. Tlačna trdnost betona CEM I je sicer od betona CEM II višja za 3 trdnostne razrede, kar je skladno z raziskavami, ki smo jih izvedli na cementih. Cement CEM I ima višjo vsebnost klinkerja, kar se pri 28-dnevni tlačni trdnosti še močno pozna. Zaradi vplivov počasne pucolanske reakcije bo beton CEM II sčasoma bolj pridobival na trdnosti, tako da se bo razlika najverjetneje zmanjšala. Cement CEM II zaradi laboratorijskega mletja vsebuje več kot 10% grobih zrn cementa (nad 80 mikronov), ki zelo počasi oziroma lahko sploh ne v celoti reagirajo, kar dodatno upočasnjuje hitrost razvoja tlačne trdnosti. Na višjo tlačno trdnost betona CEM I imajo vpliv tudi nižje vodocementno razmerje in posledično nižja kapilarna poroznost ter manjša vsebnost por. Vsak dodaten odstotek por v betonu se namreč praviloma odraža v 5 % nižji tlačni trdnosti betona.
- Betona CEM I in CEM II ne izpolnita zahteve glede cepilne natezne trdnosti, podane v avstrijskem standardu, ki naj bi pri začetnem preizkusu znašala 4,4 MPa. V Standardu se cepilna natezna trdnost določa na betonski prizmi, medtem ko smo mi cepilno natezno trdnost testirali na kockah, zato bi bilo smiselno z dodatnimi preiskavami ugotoviti vpliv oblike preizkušanca na cepilno natezno trdnost, kljub temu, da enačba 8.2 tega ne predvideva. Razlogi za nedoseganje predpisane cepilne natezne trdnosti so podani v nadaljevanju dela.
- Beton CEM II ima (najverjetneje) zaradi vsebnosti žindre v cementu, ki je odgovorna za pucolansko reakcijo, višjo natezno trdnost, kljub višjemu vodocementnemu razmerju in višjemu deležu por. Sklepamo, da zrna drobljene žindre večajo natezno trdnost cementnega kamna.

Oba cementa izpolnita zahteve glede predpisane odpornosti proti prodoru vode, in sicer dosežeta razred PV-III. To je posledica predvsem visoke vsebnosti cementa ter nizkega vodocementnega razmerja, kar se odraža v gosti strukturi cementnega kamna. Beton CEM I se sicer obnese nekoliko bolje, zaradi nižje kapilarne poroznosti, kar je posledica predvsem nižjega vodocementnega razmerja in večjega deleža klinkerja. Pri betonu CEM II pričakujemo, da se bo odpornost zaradi pucolanske reakcije sčasoma še izboljšala.

8.8 Linijska mikroskopska analiza

Izpolnjevanje zahtev za stopnjo izpostavljenosti XF4 (odpornost horizontalne površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli) je, poleg preizkusa odpornosti površine betona proti zmrzovanju/tajanju (OPZT) pri aeriranih betonih, možno dokazati tudi z metodo linijske mikroskopske analize po SIST EN 480-11.

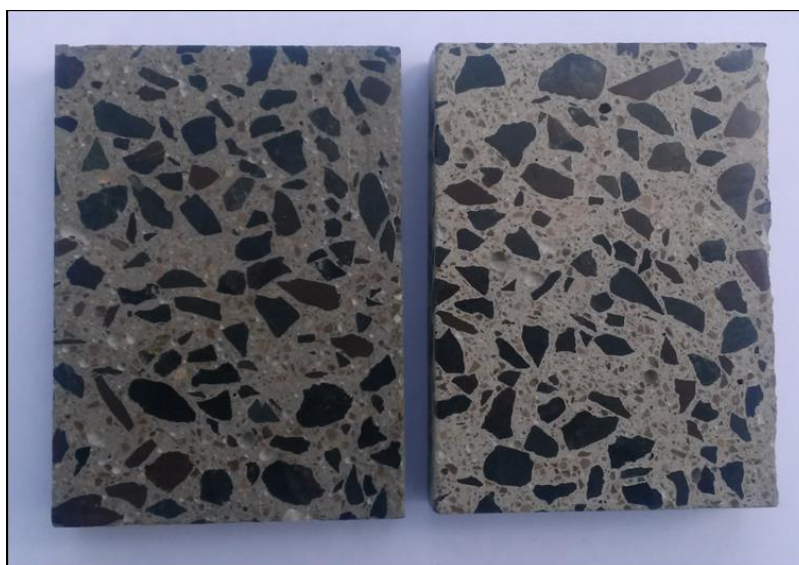
Razlogi, da smo se odločili za preiskavo z linijsko mikroskopsko analizo, so sledeči:

- Pri preiskavi vsebnosti zraka v betonu s porozimetrom dobimo za rezultat celoten delež zraka, pri čemer ne moremo vedeti, ali smo v beton s pomočjo aeranta uspešno vnesli dovolj mikro por ali pa gre rezultat prepisati zgolj ujetemu zraku v betonu med mešanjem. Linijska mikroskopska analiza nam omogoča pregled porazdelitve por po velikosti in izračun medsebojne razdalje med porami, ki sta glavna parametra, ki vplivata na odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju, brez in v prisotnosti sredstev za tajanje.
- Drugi razlog je povezan predvsem z dolgotrajnostjo OPZT preiskave, ki traja nekje 2–3 mesece na preizkušancih, starih 28 dni. Linijsko mikroskopsko analizo lahko opravimo na posebej pripravljenih vzorcih, starih 14 dni, sama preiskava pa traja zgolj teden dni.
- Preiskava z linijsko mikroskopsko analizo nam je omogočila opazovanje betona pod mikroskopom, s čimer smo dobili vpogled v strukturo strjenega betona in možnost opazovanja potencialnih nepravilnosti v cementnem kamnu.

Vzorci za preiskavo smo v skladu s standardom SIST EN 480-11 pridobili z žaganjem iz sredine treh kock, nakar smo površino vzorcev obdelali z mokrim brušenjem do sijaja, s čimer so bili vzorci primerni za preiskavo (slika 8.12). Preiskavo smo izvajali v laboratoriju FG z digitalnim video-mikroskopskim sistemom HIROX KH-3000 (slika 8.11).



Slika 8.11: Digitalni video-mikroskopski sistem HIROX KH-3000



Slika 8.12: Prikaz preizkušancev za preiskavo z metodo linijske mikroskopske analize; levo (CEM I), desno (CEM II)

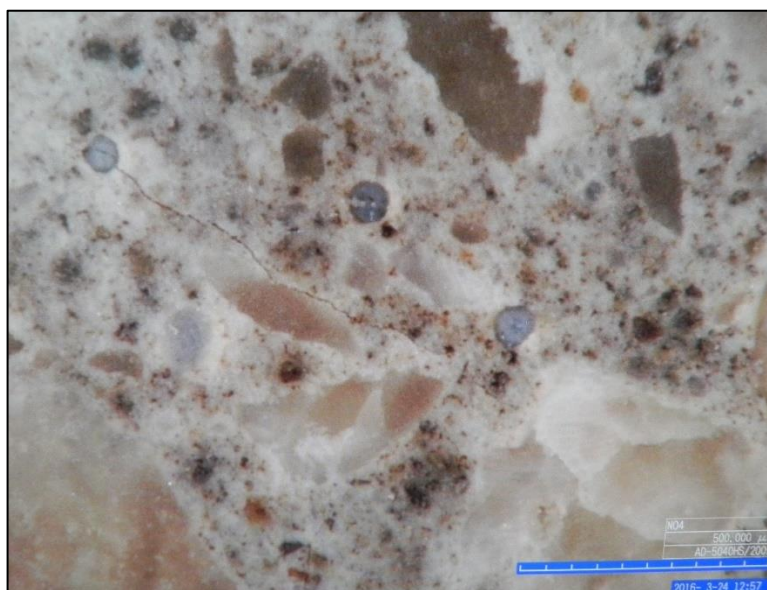
Preglednica 8.11: Rezultati preiskave z linijsko mikroskopsko analizo

| Beton CEM II | Beton CEM I |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| P (delež cementne paste) = 32,7% | P = 32,7 % |
| $T_s = 2252,5$ mm | $T_s = 2287,2$ mm |
| $T_a = 147,5$ mm | $T_a = 112,8$ mm |
| Skupna dolžina prečnih linij | Skupna dolžina prečnih linij |
| $T_{tot} = 2400$ | $T_{tot} = 2400$ |
| Skupna vsebnost zraka | Skupna vsebnost zraka |
| A = 6,15 % | A = 4,70 % |
| Skupno število izmerjenih tetiv | Skupno število izmerjenih tetiv |
| N = 719 | N = 403 |
| Specifična površina zraka | Specifična površina zraka |
| $\alpha = 19,5$ mm ⁻¹ | $\alpha = 14,30$ mm ⁻¹ |
| Razmerje pasta – zrak | Razmerje pasta – zrak |
| R = 5,320 | R = 6,96 |
| Povprečni faktor oddaljenosti | Povprečni faktor oddaljenosti |
| $L' = 0,244$ mm | $L' = 0,377$ mm |
| Procent por, manjših od 0,3 mm | Procent por, manjših od 0,3 mm |
| $A_{300} = 2,24$ % | $A_{300} = 1,038$ % |

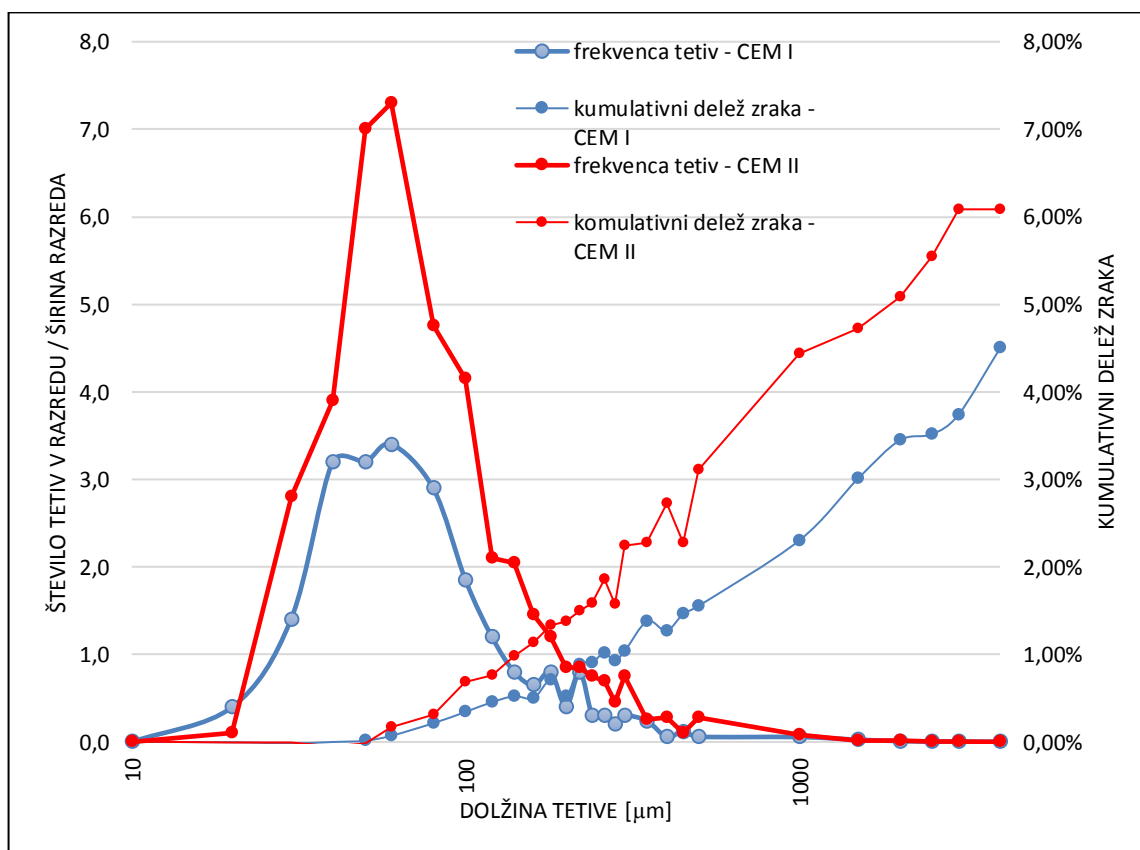
Izmerjen delež por pri linijski mikroskopski analizi je v primerjavi s tistim, ki smo ga dobili s pomočjo porozimetra v svežem betonu, manjši, in sicer iz dveh razlogov. Prvi je, da por, ki so večje od 4 mm, pri linijski mikroskopski metodi ne upoštevamo. Drugi pa je, da upoštevamo izključno vnesene (okrogle) pore in ne zajetih por. Poleg tega pa z zgoščanjem betona v standardne kocke (prostornine 3,375 litrov) dobimo bolj homogen beton kot z vgrajevanjem v porozimeter (prostornine 8 litrov), kjer je vzorec skoraj 3-krat večji in je posledično verjetnost napak večja.

Povprečen faktor oddaljenosti znaša v primeru betona CEM I 0,377 mm ter betona CEM II 0,244 mm, s čimer ne izpolnjujeta kriterija glede odpornosti na zmrzovanje in tajanje, podanega v avstrijskih in nemških standardih, kljub temu, da ima beton CEM II ustrezen delež por, manjših od 300 mikrometrov. Beton CEM II sicer izpolnjuje kriterij glede na slovenski standard, kjer L' ne sme biti večji od 0,2 mm (če 0,244 mm zaokrožimo na eno decimalko, dobimo 0,2 mm). Tak rezultat nakazujeta že vrednosti α in N , ki sta precej nizki. Velja namreč, da če je vrednost specifične površine (α) ali frekvenca zračnih mehurčkov (N) visoka, bo tudi faktor oddaljenosti ustrezen – tudi v primeru, če je vsebnost zraka nizka (Cimperman, 2008). Glede na navedeno ne moremo, v primerjavi z betonom CEM II, pripisati neizpolnjevanje kriterija v primeru betona CEM I nižji vsebnosti zraka. Prenizka vsebnost por, manjših od 300 mikrometrov, v primeru CEM I, ki je lepo vidna tudi na sliki 8.14, je najverjetneje posledica tega, da cement CEM I potrebuje nekoliko višjo dozacijo aeranta za uspešen vnos zadostnega števila mikro por v strukturo cementnega kamna (vsebnost aeranta je bila v primeru CEM I celo višja, in sicer za 0,004 % mase cementa). Pri projektiranju betonske mešanice in določanju ustrezne količine aeranta za doseganje predpisane vsebnosti zraka v betonu (5–7 %) smo za zahtevan delež zraka dodali zgolj 0,044 % aeranta, kar je nekje na spodnji priporočljivi meji dozacije. Na grafu slike 8.14 lahko opazimo, da velik delež izmerjenega deleža por v betonu pripada zračnim mehurčkom, zajetim med mešanjem betonske mešanice. Razlog za prevelik delež teh mehurčkov je lahko prekratek čas virbriranja svežega betona pri vgradnji v kalupe ali pa najverjetneje neustrezna zrnavostna krivulja, predvsem peska. Zrnavostna krivulja uporabljenega peska je namreč precej odstopala od tako imenovane idealne zrnavostne krivulje. Posledica tega je, da ne pride do idealne zapolnitve prostora, zaradi česar med zrni peska ostajajo prazni prostori, kamor se lahko ujamejo večje zračne pore. S tem, ko bi znižali vsebnost teh zračnih mehurčkov, bi lahko povečali dozacijo aeranta in s tem zvišali delež mikro por.

Kljub temu, da betona CEM I in CEM II ne izpolnjujeta strogih kriterijev glede zmrzljive odpornosti betona po metodi linijske mikroskopske analize, ne moremo trditi, da nista odporna na zmrzovanje in tajanje v prisotnosti soli. Za kaj takega bi bilo potrebno izvesti OPZT-S preiskavo, s katero praktično simuliramo dejanske razmere pri zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli na terenu. Nizko vodocementno razmerje, nizka kapilarna poroznost in visoka odpornost proti prodoru vode ter visoka natezna trdnost obeh betonov so parametri, ki kažejo na to, da najverjetneje gre za zmrzljivo odporen beton.



Slika 8.13: Mikrorazpoke v cementnem kamnu



Slika 8.14: Graf primerjave porazdelitvene funkcije ocenjenega premera zračnih por glede na kumulativni delež zraka ter število tetiv v posameznem razredu za betona CEM I in CEM II

Pri izvajanju linijske mikroskopske analize smo na vzorcih betonov v cementnem kamnu opazili pojav (mikro) razpok, katerih je bilo bistveno več v betonu CEM I (slika 8.13). Manjše število mikro razpok pri betonu CEM II pripisujemo vsebnosti žindre v cementu CEM II, katere ugoden vpliv na zmanjševanje števila razpok smo že opisali v predhodnih poglavjih. Manjše število razpok se odraža predvsem v višji cepilni natezni trdnosti betona CEM II, ki je eden glavnih kriterijev pri določevanju primernosti betona za vgradnjo v krovno plast betonskega vozišča.

8.9 Ocena primernosti uporabe cementa CEM II B-S/42,5 N in sprojektirane betonske mešanice za vgradnjo v betonsko vozišče

Laboratorijske preiskave betona so potrdile rezultate preiskav na cementu ter teoretične domneve, predstavljene v delu. Glede na to, da je bila receptura v primeru betonov CEM I in CEM II z manjšimi odstopanji praktično enaka, lahko razlike v dobljenih rezultatih med betonoma v veliki meri pripišemo vplivu cementa na lastnosti tako svežega kot strjenega betona. Preiskavi cepilne natezne trdnosti ter linijske mikroskopske analize sta potrdili teoretična spoznanja glede ugodnega vpliva žindre na tvorbo razpok v betonu, kar se je odražalo v višji cepilni natezni trdnosti betona CEM II. V primeru betona CEM II smo dosegli ugodnejšo razporeditev por v betonu in uspešno zadostili kriteriju glede odpornosti proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli glede na zahteve, podane v standardu SIST 1026, kar kaže na nižjo potrebo po aerantu v primeru uporabe cementa CEM II oziroma ugoden vpliv cementa na tvorbo por. Cement CEM II se izkaže kot ustrežnejši tudi z vidika svetlejše končne površine ter nižjega ogljičnega odtisa. Nižja tlačna trdnost ter nekoliko višji prodor vode pod pritiskom sta parametra, ki sta sicer nekoliko slabša v primeru CEM II, vendar še vedno v okviru zahtev za obrabno voziščno plast. Končna ocena je torej, da je laboratorijsko razvit cement CEM II B-S/42,5 N primeren za pripravo betona, ki je v skladu z zahtevami za vgradnjo v krovno plast betonskega vozišča.

Ustreznost sprojektirane betonske mešanice za vgradnjo v obrabno betonsko plast voziščne konstrukcije smo preverili z vidika reoloških in predvsem mehanskih lastnosti, s preiskavami tlačne in natezne trdnosti, odpornosti proti prodoru vode in odpornosti proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli. Rezultati so pokazali, da mešanici betona CEM I in CEM II ne izpolnita zahtev glede cepilne natezne trdnosti ter povprečne oddaljenosti med porami po avstrijskih standardih. Na rezultate je treba gledati iz dveh vidikov, in sicer:

- zahtev za sestavo betonske mešanice (minimalna vsebnost cementa, vodocementno razmerje, zrnastostna krivulja, ustreznosti uporabljenih materialov) in
- predpisanih zahtev glede odpornosti ter zahtevanih trdnosti.

Ker smo betonsko mešanico sprojektirali glede na avstrijske zahteve za obrabne plasti voziščnih konstrukcij, bi morali v vsakem primeru zadostiti tudi kriterijem glede cepilne natezne trdnosti in

ustrezne razporeditve por, ki so podane v njihovih standardih. Nedoseganje zahtev v primeru cepilne natezne trdnosti ter previsoke povprečne oddaljenosti med porami, manjšimi od 0,3 mm, pripisujemo uporabi karbonatnega peska, katerega krivulja zrnivosti precej odstopa od idealne zrnovostne krivulje peska. Uporabljeni pesek ima visoko vsebnost delcev, manjših od 0,25 mm, in sicer kar 21 %, medtem ko naj bi bila idealna vsebnost približno 15 %. V teoretičnem delu naloge smo omenili vpliv zrnovostne krivulje peska na vsebnost in porazdelitev por v betonu, kar je predstavljalo glavni problem tudi v našem primeru. Menimo, da bi z izbiro ustrežnejšega peska lahko vplivali na manjši odstotek ujetih zračnih por v betonu, s čimer bi znižali celotno vsebnost zraka v betonu in tako uporabili večjo količino aeranta za doseganje zahtevanega deleža zraka v svežem betonu. S tem bi v beton vnesli večje število mikro por, s čimer bi lahko izpolnili tudi avstrijski kriterij proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli. Rezultati cepilne natezne trdnosti so pokazali, da so imeli vzorci z nižjim deležem por v betonu višjo trdnost, konkretno je pri 8 % deležu por cepilna natezna trdnost znašala 3,66 MPa, pri 7 % deležu por pa 4,15 MPa. To kaže na to, da bi, če znižamo delež por, ujetih med mešanjem betona, lahko pri 5–6 % vsebnosti zraka v betonu celo dosegli avstrijski kriterij 4,4 MPa. Vsekakor pa bi bilo za potrditev zgornjih domnev treba izvesti dodatne preiskave.

Odgovor na vprašanje, ali so zahteve za beton za obrabne plasti voziščnih konstrukcij v Sloveniji postavljene prenizko, je glede na izvedene preiskave težko podati. Dejstvo je, da z minimalno količino cementa, ki je zahtevana v Sloveniji (360 kg/m^3), zagotovo ne bi izpolnili kriterija glede potrebnega razreda cepilne natezne trdnosti, podanega tako v avstrijskih kot tudi slovenskih standardih. Ker o ustreznosti zahteve glede višine potrebne cepilne natezne trdnosti ne moremo razpravljati, lahko glede na dobljene rezultate predlagamo višjo zahtevo po vsebnosti cementa v betonski mešanici za obrabno plast. Ker pri doseganju drugih kriterijev nismo imeli težav (tlačna trdnost, prodor vode), kriteriji glede sestave betonske mešanice pa se med posameznimi državami (Slovenija, Avstrija, Nemčija) ne razlikujejo, menimo, da so ti kriteriji primerni.

9 Zaključek

V magistrskem delu smo zbrali zahteve za betonska vozišča, ki veljajo v RS na področju dimenzioniranja in priprave betonske mešanice, ter jih primerjali z zahtevami v tujini. Pregled zahtev je pokazal, da so zahteve v RS večinoma ustrezne in primerljive s tujimi, vendar so v različnih dokumentih, se nemalokrat med seboj izključujejo ali pa so nejasno podane. Združitev in ureditev vseh zahtev v tem delu, je bil tudi eden glavnih ciljev te naloge. Ugotovili smo, da načrtovana planska doba betonskih vozišč v tujini praviloma znaša 30 let, pri čemer smo podali razloge za smiselnost povišanja planske dobe tudi v RS. Predstavljene zahteve za betonska vozišča, ki veljajo v RS, smo tako primerjali predvsem z namenom, da ugotovimo, ali le-te zagotavljajo želeno življenjsko dobo. Primerjave so pokazale, da večjih odstopanj ni, kjer pa so se pojavila, smo nanje opozorili in predlagali dopolnitev trenutno veljavne regulative v RS.

Z vidika načrtovanja betonskih voziščnih konstrukcij se je za najbolj problematičnega izkazal postopek določanja dimenzij posameznih slojev voziščne konstrukcije, ki je predstavljen v TSC 06.530 (2009). Postopek namreč ne omogoča načrtovanja dimenzij voziščnih konstrukcij, katerih prometna obremenitev presega 20 milijonov prehodov NOO. Omenjena obremenitev je v primeru močno obremenjenih AC v Sloveniji in ob upoštevanju daljše planske dobe lahko večkrat presežena. V nalogi smo zato predstavili nov postopek dimenzioniranja betonskih voziščnih konstrukcij, ki ga uporabljajo v sosednji Avstriji.

Pri primerjavi zahtev za pripravo betonske mešanice smo ugotovili, da se posamezne zahteve med državami razlikujejo, vendar so zahteve za strjeni beton, ki so merodajne, praviloma enake. Beton mora namreč zagotavljati odpornost proti zmrzovanju in tajanju, proti prodoru vode, proti obrabi ter imeti zadostno natezno trdnost. Portlandski mešani cement z dodatkom žlindre, ki smo ga razvili v okviru naloge, je izkazal odlične reološke in mehanske lastnosti. Raziskave na svežem in strjenem betonu ter primerjava s sulfatno odpornim cementom so pokazale, da je cement primeren za pripravo betona primerne za vgradnjo v obrabno plast voziščne konstrukcije. Preiskava linijske mikroskopske analize, s katero smo preverili odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju, je pokazala na določene težave pri vnosu mikro por v betonsko mešanico. Glede na teoretične osnove podane v nalogi ter izkušnje pridobljene s pripravo betonske mešanice menimo, da gre težave pripisati predvsem vplivu uporabljenega peska.

Delo, opravljeno v tej magistrski nalogi je pokazalo, da so projektne zahteve za betonska vozišča v RS, ob upoštevanju podanih dopolnitev primerljive s tujimi in tako ustrezne. Betonsko vozišče, zgrajeno po podanih zahtevah, mora biti sposobno zagotoviti življenjsko dobo 30 let, brez pojava poškodb. Vsekakor pa je potrebno nadaljevati z delom na tem področju, predvsem spremljati stanje trenutnih betonskih vozišč v RS ter slediti razvoju v tujini..

VIRI

Učbeniki

Blab, R., Hoffmann, M., Langre, M., Marchtrenker, S., Nischer, P., Peyerl, M., Steingerberger J. 2012. Betonstrassen, Das Handbuch. Wien, Zement + Beton Handels - und Werbeges.m.b.H: 215 str.

Delatte, R. 2008. Concrete Pavement Design, Construction, and Performance. USA, Taylor & Francis: 372 str.

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. 2006. Concrete : Microstructure, Properties, and Materials. Third Edition. New York, McGraw-Hill: 659 str.

Rijavec, R. 2013. Učno gradivo. Predmet ceste. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometnotehniški inštitut.

Žarnič, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 349 str.

Žmavc, J. 2007. Gradnja cest. Voziščne konstrukcije. 2. Izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 357 str.

Članki

Kavčič, F., Mrzelj, J. 2015. Betonska vozišča – pregled izvedenih del v Sloveniji in Evropi. V: 12. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 22.-23. april 2015.

<http://www.zabeton.si/p7.pdf> (Pridobljeno 18. 12. 2015.)

Jurgele, M. 2015. Cenovna analiza izvedb vozišč – toge in fleksibilne voziščne konstrukcije. V: 12. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 22.-23. april 2015.

<http://www.zabeton.si/p3.pdf> (Pridobljeno 18. 12. 2015.)

Balfroid, N., Pilate, O., Ployaert, C. 2014. Quality and optimal grading of sand for optimal performances of concrete pavements. V: 12TH International symposium on concrete roads 2014, Prague, 23. - 26. september 2014.

Corporaal, H., Jurriaans, G. 2014. The influence of sand grading on the air void system. V: 12TH International symposium on concrete roads 2014, Prague, 23. - 26. september 2014.

Gerbec, B. (b.d.). Proučevanje korozijskih odpornosti betonov. Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.

http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/46-4_clanek_sl.pdf (Pridobljeno 3. 3. 2016.)

Mrzelj, J. 2013. Izkušnje pri gradnji cementnobetonških vozišč v Sloveniji. V: Beton in trajnostna gradnja – Betonska vozišča, oktober 2013, Ljubljana. Zbornik. Ljubljana ZBS, SLOCEM, GZS: 92 str.

Rens, L. 2009. Concrete roads: A smart and sustainable solution. Brussels, European Concrete Paving Organisation: 31 str.

Rens, L. 2013. Concrete roundabouts. Brussels, European Concrete Paving Organisation: 27 str.

Elektronski viri

ACPA's Concrete Pavement Wiki. (b.d.).

[http://wikipave.org/index.php?title=Welcome to ACPA%27s Concrete Pavement Wiki](http://wikipave.org/index.php?title=Welcome_to_ACPA%27s_Concrete_Pavement_Wiki) (Pridobljeno 6. 1. 2016.)

Grünewald, A., Peck, M. 2015. Fahrbahndeckenbeton für Straßen.

<http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkb1%C3%A4tter/S1.pdf> (Pridobljeno 2. 2. 2016.)

Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo. 2016. Gradbeni proizvodi.

http://www.mgrt.gov.si/si/delovna_podrocja/notranji_trg/sektor_za_proizvode_in_blagovne_rezerve/gradbeni_proizvodi/ (Pridobljeno 17. 2. 2016.)

Obseg in sestava blagovnega prevoza in prometa. 2015. Agencija Republike Slovenije za okolje.

http://kazalci.arso.gov.si/?data=indicator&ind_id=716 (Pridobljeno 3. 5. 2016.)

Pravilnik o projektiranju cest. 2005. Uradni list RS št. 91-3896/2005: 9303.

<https://www.uradni-list.si/1/content?id=58173> (Pridobljeno 12. 2. 2016.)

Prometne obremenitve. 2014.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Stran_navodila_in_vzorci/Stetje_prometa/2014_Prometne_obremenitve_2014.pdf (Pridobljeno 3. 5. 2016.)

Logar, J. (b.d.). Gradnja nasipov. Učno gradivo. Predmet Mehanika tal. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal.

<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/Gradiva%20za%20vec%20predmetov/Skripta%20Janko%20Logar/Gradnja%20nasipov.pdf> (Pridobljeno 28. 3. 2016.)

TKK Srpenica d.d. 2013.

<http://www.tkk.si/si/izdelki/izdelki-glede-na-lastnosti/gradimo-in-saniramo> (Pridobljeno 8. 3. 2016.)

U.S. Department of Transportation. 2014. Cement and Concrete.

http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl07027/llcp_07_05.cfm (Pridobljeno 19. 1. 2016.)

Standardi

TSC 06.511:2009. Prometne obremenitve - Določitev in razvrstitev.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_511_2_009_Prometne_obremenitve_Dolocitev_in_razvrstitev.pdf (Pridobljeno 11. 4. 2016.)

TSC 06.420:2003. Vezane obrabnonosilne plasti - Cementni beton.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_420_Vezane_obrabnonosilne_plasti_cementni_beton.pdf (Pridobljeno 11. 12. 2015.)

TSC 06.720:2003. Meritve in preiskave - Deformacijski moduli vgrajenih materialov.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_720_2_003_Meritve_in_preiskave_Deformacijski_moduli_vgrajenih_materialov.pdf (Pridobljeno 21. 1. 2016.)

TSC 06.530 : 2009. Projektiranje, dimenzioniranje novih betonskih voziščnih konstrukcij.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_530_2_008_Projektiranje_Dimenzioniranje_novih_cementnobetonskih_voziscnih_konstrukcij.pdf
(Pridobljeno 11. 12. 2015.)

SIST EN 206-1:20013. Beton - 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost

SIST 1026:2016. Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo

SIST EN 197-1:20011. Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.

Visokošolska dela

Cimperman, L. 2008. Vpliv konsistence in deleža zraka v svežem betonu na značilnosti zračnih por v strjenem betonu. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Cimperman): 103 str.

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

Trtnik, G. 2009. Uporaba ultrazvočne metode za analizo vezanja in strjevanja betona. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Trtnik): 152 str.

Zupan, P. 2016. Ocena sistema za spremljanje in nadzor rednega vzdrževanja državnih cest v Republiki Sloveniji s predlogi za izboljšave. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Zupan): 102 str.