

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Prometna smer

Kandidat:

**Primož Jurjavčič**

# **Stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij**

**Diplomska naloga št.: 2869**

**Mentor:**  
prof. dr. Janez Žmavc

Ljubljana, 27. 2. 2006

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

**UDK:** 625.8 (043.2)  
**Avtor:** Primož Jurjavčič  
**Mentor:** prof. dr. Janez Žmavc  
**Naslov:** Stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij  
**Obseg in oprema:** 113 str., 32 pregl., 23 sl., 16 en.  
**Ključne besede:** stabilizacija, vezivo, vezana nosilna plast, voziščna konstrukcija  
**Izvleček:**

Diplomsko delo obravnava osnove različnih vrst stabiliziranja zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij. Pri tem se osredotočim predvsem na cementno stabilizacijo kot tisto, ki se v cestogradnji uporablja najpogosteje. Podrobneje opišem prednosti in slabosti mehanizacije, ki se uporablja pri stabiliziranju zmesi kamnitih zrn, kjer predstavlja inovativni reciklator Wirtgen 2500 S posebno mesto. Predstavljeni so uporabni materiali za zmesi zrn ter lastnosti organskih (bituminoznih) in anorganskih (hidravličnih) veziv. Jasno so opredeljeni postopki načrtovanja mešanic za stabiliziranje materialov in vse skupaj je podkrepljeno s primerom v poglavju "Optimiranje sestave", kjer je bil osnovni cilj najti optimalnejše hidravlično vezivo za proizvodnjo cementne stabilizacije. Vezivo mora ustrezati veljavni in pričakovani novi regulativi, omogočati pa mora tudi pripravo s cementom stabilizirane mešanice s predpisanimi karakteristikami. Pri tem je zelo važna optimalna izbira vrste in deleža veziva, saj je glavni problem tehnoloških postopkov predvsem natančno doziranje in zadostna homogenizacija majhnih količin veziva. Velik problem predstavlja napačno doziranje količine veziva: pri prevelikem deležu veziva se zaradi previsokih trdnosti pojavljajo razpoke v voziščni konstrukciji, premajhen delež veziva pa vpliva na funkcionalnost voziščne konstrukcije, saj le ta ne more zadostiti pričakovanim prometnim obremenitvam. Pri tem se opiramo na zahteve, ki jih predpisujejo TSC in so v bodoče glavni vir poenotenja postopkov za kvalitetno izvedbo stabiliziranih zmesi za nosilne plasti voziščnih konstrukcij.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 625.8 (043.2)  
**Author:** Primož Jurjavčič  
**Supervisor:** prof. dr. Janez Žmavc  
**Title:** Aggregate mixture stabilization of the base course of the pavement structure  
**Notes:** 113 p., 32 tab., 23 fig., 16 eq.  
**Key words:** stabilization, binder, roadbase, pavement structure  
**Abstract:**

The present work discusses the basis of different manner of aggregate mixture stabilization of the base course of the road construction. At this point my focus is based on cement stabilization as the one mainly used in road building. Advantages and disadvantages of mechanization used for aggregate mixture stabilizing are at greater length depicted, where inovative recycler Wirtgen 2500 S has its own special place. Used materials for granulated mixture or compound and characteristic of organic (bituminous) and inorganic (hydraulic) binders are presented. Preparation procedure for aggregate mixtures and compounds are clearly defined and corroborated with example in chapter "Optimization structure", where the main goal was to obtain the optimal hydraulic bounding for the cement stabilization production. The bound material has to meet all the valid and expected new regulation and the preparation of the cement stabilization must be in accordance with all the regulated characteristic. Optimal choice of binder type and its proportion is at this point very important as the main problem of technological procedure would be mainly accurate dosage and adequate homogeneity of small amounts of binder. The main problem appears with incorrect dosage of binder quantities: when binders are overdosed cracks appear because of too high compressive strength, whereas underdosing influences on functionalism of a pavement structure that can not meet all the expected traffic loads. At this point we lean on demands that are regulated by TSC that in the future present the main resource to unify the procedure for quality construction of stabilized courses for base in the pavement structure.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svojemu mentorju prof. dr. Janezu Žmavcu za njegovo pomoč, nasvete in usmerjanje pri pisanju diplomske naloge.

Najlepša hvala vsem mojim najbližjim, staršem in prijateljem, ki ste me vsa ta leta bodrili in podpirali ter mi vseskozi stali ob strani pri izobraževanju za moj življenjski poklic.

Posebna zahvala gre tudi podjetju Primorje d.d. iz Ajdovščine za finančno pomoč skozi vsa leta študija, njihovo prijaznost in sodelovanje pri pripravi diplomske naloge.

Hvala vsem!

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OSNOVE.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Vzroki in učinki stabilizacije .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Postopki oziroma načini stabiliziranja .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Gospodarski pomen stabiliziranja .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Prednosti postopkov stabiliziranja.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Slabosti postopkov stabiliziranja.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Mehanizacija (stroji) za stabiliziranje .....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Potujoči stabilizacijski stroji.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4.1.1</b>	<b>Izdelava stabilizacijskih zmesi s stroji z enim prehodom .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4.1.2</b>	<b>Izdelava stabilizacijskih zmesi s stroji z več prehodi.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Stabilni mešalni stroji.....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>UPORABNI MATERIALI.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Osnove.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Koherentni materiali .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Nekoherentni materiali.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Mešani materiali .....</b>	<b>28</b>
<b>3.5</b>	<b>Zmesi zrn .....</b>	<b>29</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Vrste zmesi zrn .....</b>	<b>29</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Geometrijske značilnosti zmesi zrn.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5.2.1</b>	<b>Gostota zmesi zrn.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5.2.2</b>	<b>Notranje trenje.....</b>	<b>34</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Mehanske značilnosti zmesi zrn .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5.3.1</b>	<b>Odpornost proti drobljenju .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5.3.2</b>	<b>Odpornost proti zaglajevanju.....</b>	<b>36</b>

3.5.3.3	Odpornost proti visokim in nizkim temperaturam .....	36
3.5.3.4	Odpornost proti vplivom vremena .....	36
3.6	Veziva .....	38
3.6.1	Anorganska veziva .....	38
3.6.1.1	Cement .....	39
3.6.1.2	Apno (zračno vezivo) .....	48
3.6.1.3	Pucolani.....	50
3.6.1.4	Žlindra visokih peči .....	50
3.6.2	Organska veziva .....	51
3.6.2.1	Bitumenska veziva .....	51
3.6.2.2	Naravni asfalti .....	61
3.8	Sestava stabiliziranih zmesi .....	62
3.8.1	Sestava stabiliziranih zmesi z anorganskimi vezivi .....	63
3.8.2	Sestava stabiliziranih zmesi z organskimi vezivi .....	63
4	NAČRTOVANJE MEŠANIC .....	65
4.1	Proizvodnja stabiliziranih zmesi .....	65
4.1.1	Proizvodnja stabiliziranih zmesi z anorganskimi vezivi .....	65
4.1.1.1	Priprava podlage.....	66
4.1.1.2	Priprava mešanice in vgrajevanje .....	67
4.1.1.3	Transport.....	70
4.1.1.4	Nega vgrajene mešanice .....	71
4.1.2	Proizvodnja stabiliziranih zmesi z organskimi (bitumenskimi) vezivi .....	72
4.1.2.1	Pridobivanje zmesi kamnitih zrn in veziv .....	72
4.1.2.2	Bitumenska veziva .....	72
4.1.2.3	Proizvodnja bituminiziranih zmesi .....	74
4.1.2.4	Navoz bituminiziranih zmesi .....	75
4.1.2.5	Vgrajevanje bituminiziranih zmesi.....	75

<b>5</b>	<b>OPTIMIRANJE SESTAVE.....</b>	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2</b>	<b>Cilji.....</b>	<b>77</b>
<b>5.3</b>	<b>Metode dela .....</b>	<b>78</b>
<b>5.4</b>	<b>Analize in rezultati.....</b>	<b>79</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Izbira optimalnega hidravličnega veziva za stabiliziranje nosilnih plasti VK .....</b>	<b>79</b>
<b>5.4.1.1</b>	<b>Veziva .....</b>	<b>79</b>
<b>5.4.1.2</b>	<b>Uporabljene zmesi zrn .....</b>	<b>83</b>
<b>5.4.1.3</b>	<b>Določitev optimalnega veziva na osnovi tlačnih trdnosti cementne stabilizacije .....</b>	<b>85</b>
<b>5.4.1.4</b>	<b>Receptura.....</b>	<b>95</b>
<b>5.4.1.5</b>	<b>Kontrola odpornosti mešanice proti vplivom zmrzovanja in tajanja .....</b>	<b>95</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Izvedba preskusnega polja cementne stabilizacije.....</b>	<b>96</b>
<b>5.4.2.1</b>	<b>Splošno .....</b>	<b>96</b>
<b>5.4.2.2</b>	<b>Določitev deformacijskega modula <math>E_v</math> s krožno obremenilno ploščo na podlagi.....</b>	<b>96</b>
<b>5.4.2.3</b>	<b>Tlačne trdnosti .....</b>	<b>102</b>
<b>5.4.2.4</b>	<b>Določitev maksimalne prostorninske gostote in optimalne vlažnosti zmesi..... po Proctorju na preskusnih poljih .....</b>	<b>103</b>
<b>5.4.2.5</b>	<b>Rezultati meritev zgoščenosti in vlažnosti .....</b>	<b>106</b>
<b>5.4.2.6</b>	<b>Mnenje .....</b>	<b>108</b>
<b>5.5</b>	<b>Komentar rezultatov.....</b>	<b>108</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>109</b>
	<b>VIRI.....</b>	<b>112</b>

## KAZALO RAZPREDELNIC

- Razpredelnica 1: Prednosti in slabosti izdelave stabilizacijske zmesi z grederjem
- Razpredelnica 2: Prednosti in slabosti izdelave stabilizacijske zmesi s traktorjem z branami
- Razpredelnica 3: Prednosti in slabosti izdelave stabilizacijske zmesi s stabilnimi mešalnimi stroji
- Razpredelnica 4: Pregled različnih vrst cementa – proizvodi Salonit Anhovo
- Razpredelnica 5: Uporabnost vrst cestogradbenega bitumna v asfaltnih zmesih za vezane spodnje nosilne plasti v odvisnosti od prometne obremenitve
- Razpredelnica 6: Dovoljene temperature cestogradbenega bitumna v cisterni
- Razpredelnica 7: Temperatura proizvedene asfaltne zmesi v odvisnosti od vrste uporabljenega bitumenskega veziva
- Razpredelnica 8: Optimalna in najnižja temperatura asfaltne zmesi pri vgradnji
- Razpredelnica 9: Mehanske karakteristike veziv
- Razpredelnica 10: Karakteristike cementa Salodur®
- Razpredelnica 11: Karakteristike Maltita®
- Razpredelnica 12: Pregled trdnostnih razredov in zahteve podane v prENV 13282
- Razpredelnica 13: Tlačne trdnosti preskušancev pri starosti 7 dni
- Razpredelnica 14: Primer računanja tlačnih trdnosti
- Razpredelnica 15: Izbrani optimalni delež veziva
- Razpredelnica 16: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Salodur A (7 dni)
- Razpredelnica 17: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Salodur B (7dni)
- Razpredelnica 18: Izbrani optimalni delež veziva
- Razpredelnica 19: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Salodur (28 dni)
- Razpredelnica 20: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Maltit
- Razpredelnica 21: Sestava 1 m<sup>3</sup> stabilizacijske mešanice
- Razpredelnica 22: Rezultati meritev posedkov na P 198 vozni pas desno
- Razpredelnica 23: Račun deformacijskih modulov  $E_{v1}$  in  $E_{v2}$  za P 198
- Razpredelnica 24: Rezultati meritev posedkov na P 202 vozni pas levo
- Razpredelnica 25: Račun deformacijskih modulov  $E_{v1}$  in  $E_{v2}$  za P 202
- Razpredelnica 26: Zahtevane vrednosti deformacijskih modulov na nevezanih nosilnih plasteh



Razpredelnica 27: Osnove za oceno stanja podlage na osnovi deformacijskih modulov

Razpredelnica 28: Tlačne trdnosti vzorcev na preskusnih poljih

Razpredelnica 29: Določitev maksimalne prostorninske gostote in optimalne vlažnosti za  
P 198

Razpredelnica 30: Določitev maksimalne prostorninske gostote in optimalne vlažnosti za  
P 202

Razpredelnica 31: Meritev zgoščenosti in vlažnosti na P 198 – P 200 (vozni pas desno)

Razpredelnica 32: Meritev zgoščenosti in vlažnosti na P 200 – P 203 (vozni pas levo)

## KAZALO SLIK

- Slika 1: Primerjava elementov visoke in cestne zgradbe
- Slika 2: Značilna utrditev sodobnega vozišča
- Slika 3: Raznos obremenitev v voziščni konstrukciji z vezano in nevezano nosilno plastjo
- Slika 4: Ravnost je ena izmed najpomembnejših lastnosti vozniških površin
- Slika 5: Shematični prikaz stabilizacijskega stroja s tremi osmi Vögele in namenom posameznih sestavnih delov
- Slika 6: WIRTGEN WR 2500 S (reciklator)
- Slika 7: Variabilni prostor mešalne komore
- Slika 8: Nadzorovano penjenje bitumna
- Slika 9: Med recikliranjem potiska reciklator pred seboj cisterni za vodo in bitumen
- Slika 10: Odmerjanje (vbrizganje) določene količine vročega bitumna in vode v mletveno-mešalni bobni preko mikroprocesorsko nadzorovanih črpalk
- Slika 11: Izdelava stabilizacijske zmesi z grederjem
- Slika 12: Različne vrste rotacijskih bran
- Slika 13: Traktor z rotacijskimi branami
- Slika 14: Kultivator
- Slika 15: Rotovator
- Slika 16: Osnovne skupine materialov za stabiliziranje
- Slika 17: Postopek zgoščevanja zmesi zrn v jeklenem valju (kalupu) z nabijalom (po Proctorju)
- Slika 18: Voteli jekleni bobni pri postopku LA
- Slika 19: Opus caementicium (zmes zrn iz gramoza, koščkov opeke ali kamna, vode in veziva)
- Slika 20: Postopek proizvodnje portland cementa
- Slika 21: Molekularna zgradba bitumna
- Slika 22: Preskušanci za določanje tlačnih trdnosti mešanice
- Slika 23: Zgoščevanje z valjarjem BOMAG

## KAZALO GRAFIKONOV

- Grafikon 1: Zrnava sestava uporabljene zmesi zrn iz kamnoloma Laže in območje sestave zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti, stabilizirane s hidravličnimi vezivi
- Grafikon 2: Odvisnost tlačne trdnosti cementne stabilizacije od deleža veziva pri starosti 7 dni (uporabljen tamponski drobljenec 0/32 mm iz kamnoloma Laže)
- Grafikon 3: Odvisnost tlačne trdnosti cementne stabilizacije od deleža veziva pri starosti 7 dni (linearni trend)
- Grafikon 4: Diagram posedkov v odvisnosti od obremenitve plošče (P 198)
- Grafikon 5: Diagram posedkov v odvisnosti od obremenitve plošče (P 202)
- Grafikon 6: Preskus po standardnem in modificiranem postopku po Proctorju (P 198 vozni pas desno)
- Grafikon 7: Preskus po standardnem in modificiranem postopku po Proctorju (P 202 vozni pas levo)

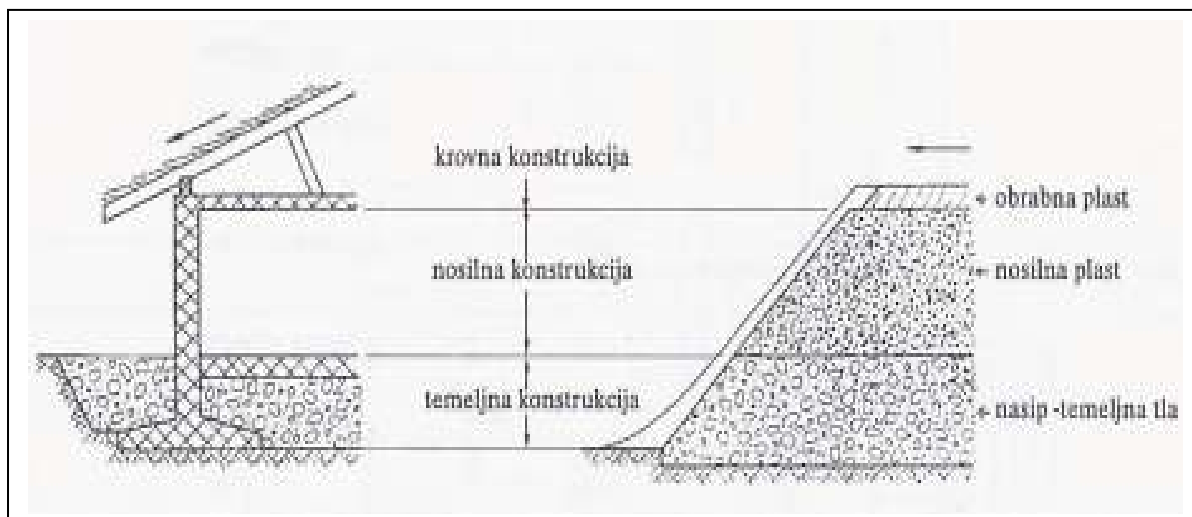
## 1 UVOD

Gradnja cest je pretežno empirična znanost, t.j. znanost katere način raziskovanja temelji na izkustvih in iz njih po analizi razbira zakone. Začela se je razvijati sočasno z razvojem človeka in se, tako kot človekovo znanje, razvija in zori še dandanes.

Cesta je gradbeni objekt (zgradba), ki sestoji iz več vrst plasti različnih materialov. Lastnosti teh materialov morajo biti primerne, da bodo prenesli obremenitve, ki jim bodo v času uporabe izpostavljeni.

Cestno zgradbo je v njenih osnovnih elementih mogoče primerjati z visoko zgradbo, saj pri obeh najdemo podobne značilne elemente (slika 1):

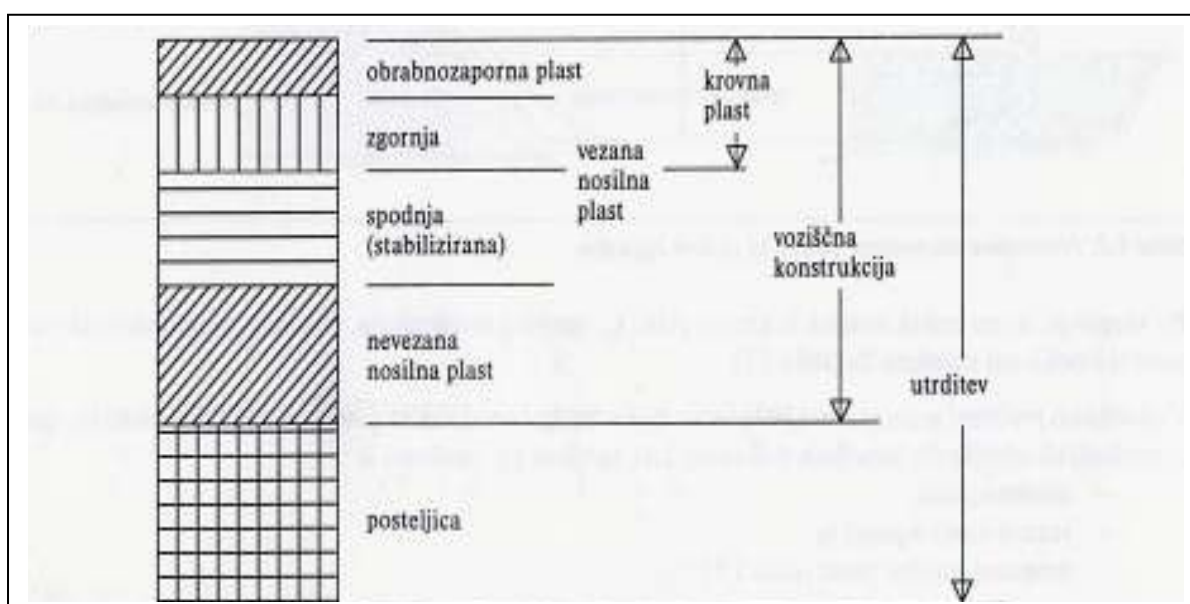
- temeljno konstrukcijo
- nosilno konstrukcijo
- krovno konstrukcijo



Slika 1: Primerjava elementov visoke in cestne zgradbe

V značilnem prečnem prerezu ceste je voziščna konstrukcija (VK) temeljena na izboljšani zaključni plasti nasipa (posteljici) ali izboljšanih temeljnih tleh, praviloma pa zgrajena iz naslednjih plasti (slika 2):

- obrabnozaporne
- vezane nosilne
- nevezane nosilne



Slika 2: Značilna utrditev sodobnega vozišča

Pomen nekaterih osnovnih strokovnih pojmov:

- **krovnna plast** – vrhnji del voziščne konstrukcije na prometni površini, ki prometne obremenitve neposredno prevzema in jih prenaša (zaradi raznosa ustrezno zmanjšane) na spodaj vgrajene plasti; preprečuje vdiranje vode v voziščno konstrukcijo; po pravilu sestoji krovnna plast iz obrabne (obrabnozaporne) in vezane nosilne plasti (zgornja vezana nosilna plast)
- **nosilna plast** – plast (različne sestave, z vezivom ali brez njega) med obrabno plastjo in posteljico ali planumom podlage pod voziščno konstrukcijo, vgrajena predvsem za zagotovitev potrebnega raznosa prometnih obremenitev

- ***nosilnost*** – predstavlja mehansko odpornost utrditve ceste proti kratkotrajnim obremenitvam
- ***obrabna plast*** – obstojna in prometno varna vrhnja plast voziščne konstrukcije na cesti ali obloge na premostitvenem objektu; njena sestava je odvisna od prometne in klimatske obremenitve ter osnovnega namena uporabe (vezana/nevezana, zaprta/odprta)
- ***posteljica*** – vrhnja (zaključna) plast nasipa ali temeljnih tal, debela do 50 cm, s posebnimi lastnostmi (povečana nosilnost, zmanjšana občutljivost na učinke mraza), doseženimi z ustreznimi gradbenotehničnimi ukrepi (izboljšava, utrditev, stabiliziranje)
- ***temeljna tla*** – zemljina ali kamnina, praviloma v naravnih tleh, ki neposredno meji na nasip, voziščno konstrukcijo ali temelj gradbenega objekta oz. leži neposredno pod njim
- ***vezana nosilna plast*** – zmes ali mešanica kamnitih materialov enakomerne zrnivosti v voziščni konstrukciji, vezanih s hidravličnim ali bituminoznim vezivom;
  - razlikujemo:
    - Ⓢ hidravlično vezane nosilne plasti
    - Ⓢ cementnobetonske nosilne plasti
    - Ⓢ asfaltne (bituminizirane) nosilne plasti
    - Ⓢ utrjene oz. stabilizirane nosilne plasti
- ***voziščna konstrukcija (zgornji ustroj)*** - del utrditve prometne površine, ki sestoji iz ene ali več nosilnih plasti in obrabne plasti; prevzema in prenaša prometne obremenitve na posteljico in/ali podlago (nasip, temeljna tla) ter preprečuje pronicanje vode do podlage

## 2 OSNOVE

### 2.1 Vzroki in učinki stabilizacije

Vedno večje prometne obremenitve naših cest zahtevajo takšne voziščne konstrukcije, ki bodo sposobne prevzeti statične in dinamične obremenitve in jih prenesti na temeljna tla.

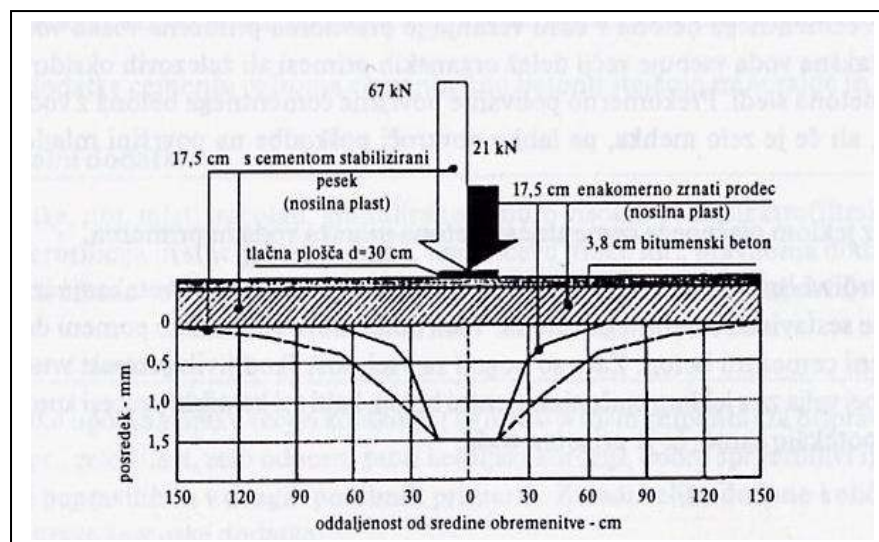
Z ozirom na napetosti in sile, ki nastopajo v voziščni konstrukciji, pa mora biti zagotovljena kvalitetna kontinuiteta posameznih plasti in ustrezna nosilnost od temeljnih tal do vrhnje, zaključne obrabnozaporne plasti.

Temeljna tla lahko služijo pri gradnji cest kot osnova za nadgradnjo voziščne konstrukcije ali pa kot osnovni material za izdelavo nosilne plasti same voziščne konstrukcije. Pomembno vlogo pri izbiri imajo dane ekonomske razmere.

Obrabnozaporne plasti voziščnih konstrukcij delujejo zaradi visokih elastičnih modulov kot elastične plošče, ki se zaradi kratkotrajnih obremenitev le malo upognejo, s tem pa povzročijo tudi samo manjše specifične obremenitve v nosilnih plasteh oziroma temeljnih tleh.

Različni znani gradbeni materiali so zaradi svojih lastnosti različno odporni proti klimatskim vplivom (vodi, mrazu, temperaturnim spremembam in prometnim obremenitvam). Z določeno obdelavo pa jih je mogoče v zadostni meri utrditi in prilagoditi za prevzem prometnih obremenitev v različnih, neugodnih klimatskih pogojih, kakor tudi za prenos nastopajočih obremenitev na temeljna tla. Najvažnejše pri tem je, da na plasti tako obdelanega materiala ne nastopijo deformacije, ki bi lahko povzročile poškodbe nadgrajenih, više ležečih plasti.

Z ozirom na zahteve, ki jih mora izpolnjevati posamezna nosilna plast voziščne konstrukcije (gostota, homogenost, sposobnost dušenja udarcev koles in vibracij ter zmanjšanje oziroma raznos prometnih obremenitev na temeljna tla (slika 3)), si z lahkoto predstavljamo stabilizirano plast kot tisto najbolj primerno, da zadosti vsem tem pogojem.



Slika 3: Raznos obremenitev v voziščni konstrukciji z vezano in nevezano nosilno plastjo

Z stabilizirano plastjo namreč zagotovimo kvalitetno kontinuiteto voziščne konstrukcije, ki je predpogoj za pravilno izkoriščenost posameznih vgrajenih materialov, istočasno pa zagotovimo optimalno vzdržljivost zgrajene voziščne konstrukcije. S stabiliziranjem temeljne ali nosilne plasti voziščne konstrukcije so zagotovljene materialu trajne zahtevane lastnosti tudi v najneugodnejših razmerah. S stabiliziranjem materiala je s tem preprečena možnost spremembe granulacije, ki bi nastopila v plasti voziščne konstrukcije zaradi spremenjene strukture materiala kot posledica utrujenosti oziroma notranje porušitve. *Granulacijske spremembe notranje porušnega materiala so namreč osnovni vzrok njegove zmanjšane obstojnosti oziroma odpornosti proti zunanjim vplivom.*

S pojmom stabiliziranje materiala nismo označili samo povečanje trdnosti, ampak predvsem spremembe mehanskih, fizikalnih in kemičnih lastnosti, ki nastopijo zaradi izboljšane zrnivosti ali dodatka veziv, s katerimi je doseženo, da bo takšna zmes sposobna za zgostitev, nosilna in odporna proti vsem klimatskim vplivom, predvsem uničujočim vplivom vode (proti hidrološkim razmeram). To pa je mogoče doseči le takrat, kadar obstoja možnost zmešanja prvotnega materiala z dodatki in pri tem dosežena homogenost in enakomernost zmesi. Slednja predstavlja enega izmed pomembnih vodil za zagotavljanje kakovosti gradnje cest.



Zaradi dodatkov se spremenijo mehanske, fizikalne in kemične lastnosti materiala, ki se bistveno razlikujejo od prvotnih (večje tlačne in natezne trdnosti, večja togost in notranje trenje materiala oziroma večja stabilnost obdelanega materiala, s tem pa tudi celotne voziščne konstrukcije).

**Stabiliziranje lahko torej ovrednotimo kot postopek graditve, pri katerem želimo z izbrano vrsto in količino (določenega) veziva izboljšati določene (pomembnejše) značilnosti razpoložljive zmesi kamnitih zrn lokalnega izvora.**

Namen stabiliziranja zmesi kamnitih zrn je, da z izbrano vrsto veziva:

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

Prevzem (sicer razmeroma majhnih) nateznih napetosti v stabilizirani (vezani) plasti pa pogojuje ustrezno tlačno obremenitev materiala v podložni nevezani plasti. Takšno obremenitev pa je ta sposoben prevzeti brez škodljivih posledic.

Splošnega navodila za stabiliziranje materiala ni. Vsak material je potrebno posebej, specifično obdelati in iz vrste rezultatov izbrati postavljenim zahtevam vsestransko najprimernejšo rešitev. Pomemben vpliv na izbiro postopka ima včasih tudi razpoložljiva mehanizacija.

Z določenimi dodatki je mogoče stabilizirati tudi materiale, ki so sicer veljali kot neprimerni za cestogradnjo (npr. glina, kjer posamezne delce grude najprej z določenim vezivom razbijemo in s tem omogočimo povezavo vsakega delca z vezivom, tako povezan material pa

lahko brez problemov utrdimo). Pri klasični gradnji se je namreč pojavljala problem, kako z razpoložljivo mehanizacijo zagotoviti zadostno zgostitev takšnega materiala. Tudi previsoka vsebnost vlage pri današnjem poznavanju možnosti stabiliziranja ne predstavlja več ovire za uporabo takšnega materiala pri gradnji cest.

Stabiliziranje je mogoče uporabiti za:

- izboljšanje temeljnih tal in utrditev nasipov (povečanje nosilnosti in vodoodpornosti, preprečitev zmrznjenja materiala)
- izdelavo nosilne plasti voziščne konstrukcije (zlepljenje zrn in s tem povečanje nosilnosti in vodoodpornosti)
- izdelavo samostojnih plasti utrditev za manj obremenjene vozne površine (lokalne in gozdne ceste, parkirišča, garaže)
- zavarovanje brežin in pri gradnji vodnih kanalov
- vojaške in druge nujne primere, ko je potrebno v najkrajšem možnem času usposobiti vozne in druge površine za različne namene uporabe

Pri tem med seboj ločimo pomen nekaterih strokovnih izrazov kot so:

- **izboljšanje (improvement, die Verbesserung)**
  - je postopek, pri katerem je z dodanimi ustreznimi materiali (kamnitimi zrn ali anorganskim vezivom) izboljšana vgradljivost in zgostljivost osnovnega materiala ter olajšano izvajanje gradbenih del
- **utrditev temeljnih tal (ground stabilization, die Bodenverfestigung)**
  - je postopek, pri katerem se z vmešavanjem veziva v obstoječa tla in primerno zgostitvijo pripravljene zmesi ali mešanice trajno poveča odpornost vgrajene zmesi ali mešanice proti škodljivim vplivom vode
- **stabiliziranje (stabilization, die Stabilisierung)**
  - je postopek, pri katerem je z vmešavanjem veziva in vode v obstoječi material in primerno zgostitvijo pripravljene zmesi ali mešanice trajno povečana odpornost vgrajene zmesi ali mešanice proti vplivom prometnih obremenitev ter proti škodljivim klimatskim in hidrološkim vplivom

Material za stabiliziranje mora biti predhodno laboratorijsko preiskan in glede na postavljene zahteve, katerim mora stabilizirana plast določene debeline ustrezati, je potrebno določiti vrsto in količino potrebnih dodatnih materialov in veziv. *Veziva v prahu* je potrebno praviloma strojno razprostreti v zahtevani količini pred mešanjem, *tekoča veziva* pa po možnosti vbrizgati v mešalno napravo med mešanjem, saj se s tem izognemo neenakomerni porazdelitvi veziva zaradi zastajanja v kolesnicah.

Za stabiliziranje predvideni material mora biti predhodno izravnani v zahtevani profil plasti in delno skomprimiran tako, da je omogočeno enakomerno mešanje v predvideni debelini stabilizirane plasti in se vsa zrna materiala povežejo z vezivom. Za mešanje in zgostitev določene debeline stabilizirane plasti materiala je potrebno imeti na razpolago ustrezno mehanizacijo.

Za doseg določene kvalitete s stabiliziranjem materiala zgrajene nosilne plasti je potrebno predhodno proučiti:

- geomehanske in kemične lastnosti materiala
- možnosti izboljšav materiala z dodatnimi materiali in/ali vezivi
- potrebno vlago za optimalno zgostitev stabilizirane plasti
- zahtevane lastnosti stabiliziranega materiala
- način izdelave in zgostitve stabilizacijske zmesi

## 2.2 Postopki oziroma načini stabiliziranja

V splošnem se, odvisno od kakovosti razpoložljivih materialov in predvidenih vplivov na stabilizirano plast takšnega materiala, uporablja naslednje postopke (načine) stabiliziranja:

- mehanično stabiliziranje
- stabiliziranje z anorganskimi prašnatimi vezivi (cement, apno, elektrofiltrski pepel, žindra)
- stabiliziranje z organskimi vezivi (bitumenske in katranske emulzije, rezani bitumen)

- stabiliziranje s kemikalijami (kemična stabilizacija z dodatkom ene, dveh ali več kemikalij)
- zaščita proti vodi in/ali zlepljenje z naravnimi ali umetnimi smolami
- termična stabilizacija ali taljenje veznih materialov na mestu ali v pečeh
- elektro-kemična utrditev z odvzemom vlage in spremembo površinskih kemičnih lastnosti materiala
- različne kombinacije navedenih načinov stabiliziranja

### **2.3 Gospodarski pomen stabiliziranja**

Ustrezno stabilizirana plast lokalnega materiala lahko predstavlja pomemben nosilni del celotne voziščne konstrukcije.

Obsežne študije so pokazale, da je s stabiliziranjem lokalnega materiala mogoče doseči ekvivalentno nosilno plast s 40-60 % stroška, ki bi jih sicer zahteval klasični način gradnje. Jasno je, da pri vse večjih prometnih obremenitvah in razpoložljivih finančnih sredstvih to vsekakor ni zanemarljiv podatek. Z enakimi sredstvi kot pri klasičnem načinu gradnje je mogoče usposobiti znatno večje vozne površine za nastopajoče prometne obremenitve.

#### **2.3.1 Prednosti postopkov stabiliziranja**

Stabiliziranje temeljnih tal ima veliko prednost predvsem v tem, da je mogoče uporabiti kot osnovno gradivo lokalne materiale, ki so že na mestu vgradnje in jim po potrebi z določenimi dodatki in vezivi samo izboljšamo mehanske, fizikalne in kemične lastnosti. S tem se prihrani predvsem pri transportnih stroških, ki bi sicer nastali z navozom običajno uporabljenih materialov iz kamnolomov. Znižajo se stroški priprave teh materialov v kamnolomih oziroma separacijah, pogosto pa je potreben še izkop in odvoz nenosilnih materialov.

S finančnega vidika dobimo zelo ugodne rezultate, če bi namesto pripeljanega tamponskega materiala stabilizirali material obstoječega vozišča ali zemeljskega planuma, kar je pri modernizacijah obstoječih cest in rekonstrukcijah zaradi razpoložljivega, za stabiliziranje zelo primerne lokalnega materiala, pravzaprav osnovni namen samega postopka. Zmrzlinsko

neodporen material, ki bi ga sicer morali nadomestiti z ustreznim novim materialom, po stabiliziranju lahko smatramo kot vgrajeno protizmrzovalno plast, obogateno še z ostalimi kvalitetami stabiliziranega materiala oziroma plasti.

Pomembno prednost pred klasičnim načinom gradnje ima stabiliziranje tudi v sami hitrosti izvedbe postopka – postopek je namreč zelo hiter, saj je mogoče s sodobno mehanizacijo kvalitetno stabilizirati tudi do več km ceste na dan.

### **2.3.2 Slabosti postopkov stabiliziranja**

Slabosti stabilizacije materialov se pojavljajo predvsem v obliki napak pri delu. Najpogostejši napaki pri stabilizaciji materialov sta:

- segregiranje stabilizacijske zmesi in
- neravnost površine plasti stabilizacijske zmesi

Segregiranje stabilizacijske zmesi lahko nastane že pri transportu na gradbišče ali pa pri izdelavi stabilizacijske zmesi na gradbišču. Ta pomanjkljivost se praviloma pokaže šele pri zgoščevanju ali komprimiranju. Segregirana mesta manjšega obsega je mogoče zadovoljivo popraviti s posipanjem z drobnejšim materialom stabilizacijske zmesi, ki ostane pri profiliranju plasti. Segregirana mesta večjega obsega pa je potrebno izkopati do minimalne globine 10 cm (še boljše pa v debelini celotne plasti), ves izkopani material pa nadomestiti s stabilizacijsko zmesjo enake sestave, kot je vgrajena v ostali sestavi.

Neravnine na mehanično stabilizirani plasti materiala, ki so le malo večje od dopustnih odstopanj, je mogoče popraviti z dosipom drobnejšega materiala ustrezne zrnivosti in valjanjem. Pri neravninah in višinskem odstopanju, ki sta večja od dovoljenega odstopanja, je potrebno mehanično stabilizirano plast ponovno zrahljati v minimalni debelini 10 cm, jo splanirati in ponovno utrditi.



Slika 4: Ravnost je ena izmed najpomembnejših lastnosti vozniških površin

Ravnost planuma vezane spodnje nosilne plasti (slika 4) je treba ugotoviti v poljubni smeri na os ceste kot odstopanje pod položeno 4 m merilno letvo ali z drugačnim merilnim postopkom, opredeljenim v TSC 06.610 : 2003.

Planum strojno vgrajene vezane spodnje nosilne plasti sme odstopati od merilne letve največ (skrajna mejna vrednost):

- na voziščih za težko prometno obremenitev
  - Ⓢ vgrajevanje v eni plasti 15 mm
  - Ⓢ vgrajevanje v dveh plasteh (zgornja plast) 10 mm
- na voziščih za ostale prometne obremenitve 15 mm

Višino posameznih merilnih mest na planumu vezane spodnje nosilne plasti je treba določiti z niveliranjem. Planum plasti sme na poljubnem mestu odstopati od projektirane kote največ + 15 mm.

Nagib planuma vezane spodnje nosilne plasti mora biti praviloma enak prečnemu in vzdolžnemu nagibu vozišča. Dopustna odstopanja so določena z dopustno neravnostjo in

odstopanjem od višina planuma te plasti, vendar ne smejo biti večja od  $\pm 0,4$  % absolutne vrednosti nagiba (skrajna mejna vrednost).

## 2.4 Mehanizacija (stroji) za stabiliziranje

Za stabiliziranje je potrebno izbrati takšne stroje, ki bodo zagotovili zahtevane lastnosti stabiliziranega materiala. Za pripravo materiala uporabljamo:

- buldozerje z rijači
- grederje
- klinaste brane

Za mešanje materiala v obratu se uporabljajo:

- silosi za vezivo
- posipalniki
- cisterne
- mešalniki

Za zgoščevanje materialov (komprimiranje) so primerni:

- statični in/ali vibracijski valjarji
- vibracijske plošče
- valjarji z gumijastimi kolesi

Mešalniki za izdelavo stabilizacijskih mešanic oziroma zmesi so lahko dveh vrst:

- potujoči stabilizacijski stroji, s katerimi se izvrši stabiliziranje po tako imenovanem »**mix in place**« postopku (na mestu vgrajevanja)
- stabilni mešalni stroji, s katerimi se izvrši stabiliziranje po »**mix in plant**« postopku (v obratu za mešanje)

Praviloma je potrebno za stabiliziranje uporabiti le namensko konstruirane stroje. V izjemnih primerih je na manjših površinah mogoče uporabiti za izdelavo zmesi tudi različne mešalnike oziroma priključke, namensko konstruirane za druga dela (brane, kultivatorji in podobno).

Mehanično stabiliziranje materiala je mogoče izvršiti z različnimi stroji, katere se sicer uporablja tudi pri zemeljskih delih (greder, buldozer, statični valjar, cisterna). Pri postopkih stabiliziranja, kjer se materialu dodaja vezivo, pa je potrebno uporabiti takšne stroje, ki bodo zagotovili ustrezno premešanje materiala z vezivom in dodano vodo.

#### **2.4.1 Potujoči stabilizacijski stroji**

Potujoči stabilizacijski mešalniki omogočajo mešanje in eventualno tudi vgraditev stabilizacijske zmesi na samem vozišču (mix in place postopek).

Glede na konstrukcijo razlikujemo stabilizacijske stroje, ki izvršijo mešanje stabilizacijske zmesi z :

- enim preходом
- več prehodi

Potujoči stabilizacijski stroji, s katerimi je potrebno za zagotovitev zahtevane homogenosti stabilizacijske zmesi izvršiti en sam prehod za zadovoljivo premešanje materiala, veziva in vode, imajo lahko vgrajeno

- eno mešalno os ali
- več mešalnih osi

Mešalniki z eno mešalno osjo so primernejši za koherentne materiale, kjer je za zagotovitev ustrezne stabilizacijske zmesi potrebno različno število prehodov (en ali več). Mešalniki z več mešalnimi osmi pa praviloma zagotovijo zahtevano homogenost stabilizacijske zmesi (nekoherentnega ali mešanega materiala in veziva ter vode) že z enim samim preходом.



Zahtevano stabilizacijsko zmes pa se lahko pripravi tudi s stroji, ki potrebujejo za zahtevano stabilizacijsko zmes več prehodov kot le enega:

- greder
- traktor z branami
  - ⊙ klinaste brane
  - ⊙ krožne brane
- priključni mešalniki
  - ⊙ kultivator
  - ⊙ rotovator
  - ⊙ rezkalnik (freza)
- samostojni mešalniki

Glede na material, ki se stabilizira, je potrebno uporabiti različne nože za razbijanje oziroma mešanje, ki so montirani na mešalni osi in sicer:

- ravne nože (za mešanje nekoherentnih materialov)
- zakrivljene nože (za mešanje koherentnih materialov)

#### **2.4.1.1 Izdelava stabilizacijskih zmesi s stroji z enim prehodom**

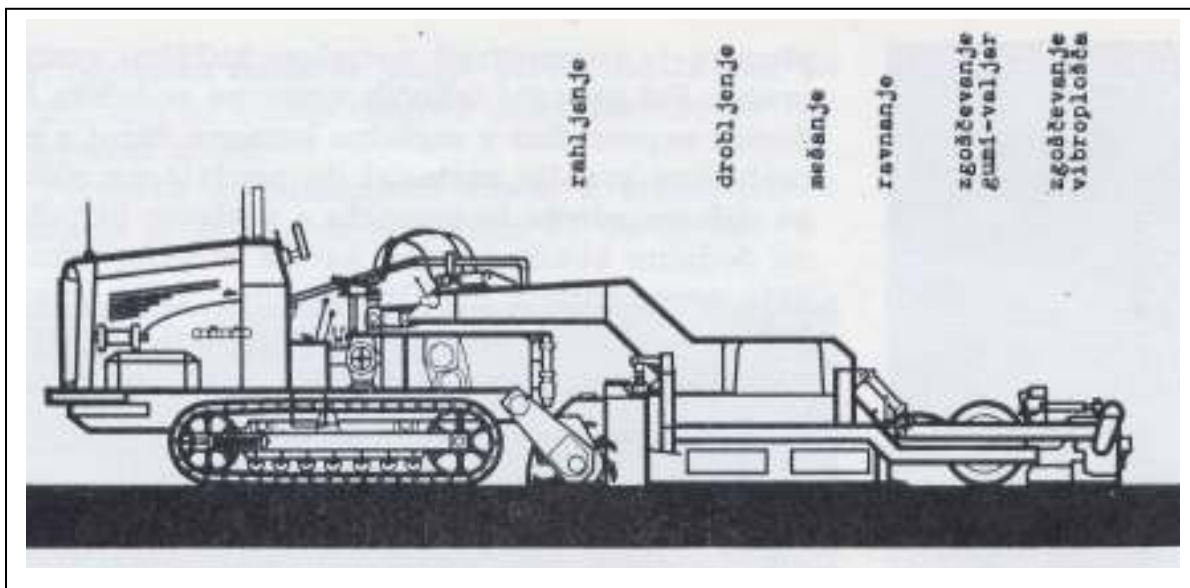
Stabilizacijski stroji z enim prehodom omogočajo izdelavo optimalno homogene stabilizacijske zmesi.

Postopek pri izdelavi oziroma mešanju je naslednji:

- na predhodno splanirani in deloma zgoščeni planum je potrebno razprostreti potrebno količino veziva v prahu, pri uporabi tekočih veziv pa se lahko le-ta dozira neposredno v mešalno komoro
- stroj z enim prehodom razrahlja material do predvidene globine, ga deloma zdrobi in premeša z vezivom in potrebno količino dodane vode, ki jo prav tako dodamo neposredno v mešalno komoro

- ▶ tako pripravljeno stabilizacijsko zmes ti stroji deloma ali popolnoma splanirajo v zahtevani profil in zgostijo

S stabilizacijskim strojem z enim prehodom je mogoče izdelati plasti stabiliziranega materiala do debeline 50 cm (slika 5).



Slika 5: Shematični prikaz stabilizacijskega stroja s tremi osmi Vögele in namenom posameznih sestavnih delov

#### 2.4.1.1.1 Wirtgen WR 2500 S

Dandanes je vzdrževanje oziroma obnova cest zelo aktualna tema. S tem pogledom v mislih je ameriško podjetje Wirtgen America Inc. na trg ponudilo visoko učinkovit stroj - inovativni reciklator WR 2500 S (slika 6) - "S" predstavlja oznako "Super".

Postopek hladne reciklaže na mestu (cold in-place recycling) predstavlja posebno tehniko, kjer je celotna voziščna konstrukcija zdrobljena in so tako vezane kot nevezane nosilne plasti ponovno izkoriščene oz. uporabljene.



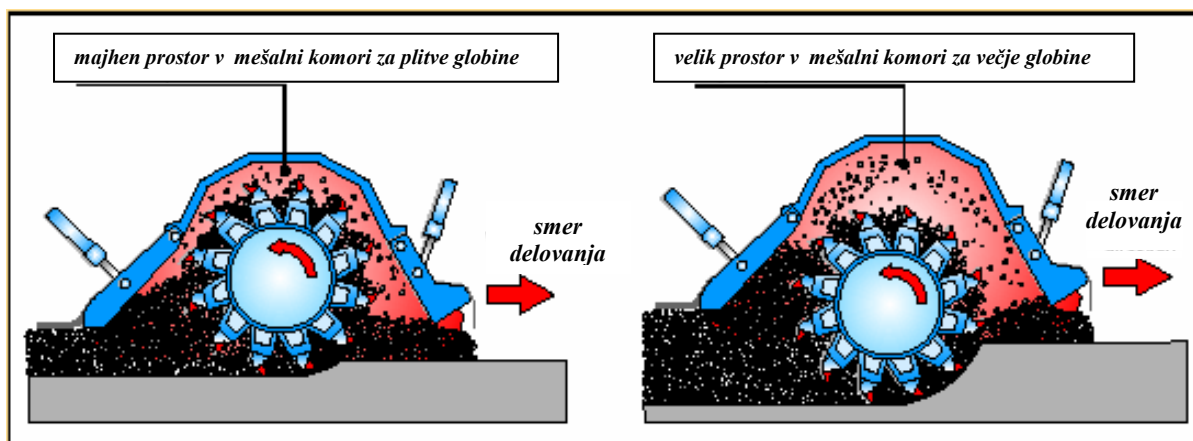
Slika 6: WIRTGEN WR 2500 S (reciklator)

Z dodatkom veziv je ustvarjena nova mešanica materialov, ki jih reciklator izboljšane položi in služijo kot nove vezane nosilne ali temeljne plasti. Kot vezivo lahko uporabimo različne vrste materialov. Najpogosteje so uporabljena cement in bitumenska veziva, poleg tega pa se uporablja še apno, elektrofiltrski pepel, kamena moka ter drugi kemični dodatki.

Wirtgen WR 2500 S se uporablja za obnovo dotrajanih voziščnih konstrukcij po postopku hladne reciklaže z uporabo penjenega bitumna, za izboljšanje glinenih zemljin z apnom (apnena stabilizacija) in stabiliziranje nekoherentnih zemljin s cementom (cementna stabilizacija).

Važnejše prednosti napredne uporabe tehnologije po postopku hladne reciklaže z socialnega, ekonomičnega in okoljevarstvenega vidika so naslednje:

- uporaba obstoječih materialov (odrezkane zmesi) in asfalta ter nosilnih plasti na samem licu mesta vgrajevanja
- nižje energijske zahteve in omejeni transporti (prihranek pri stroških)
- mehanizacija omogoča recikliranje materialov v večje globine (25-30 cm, teoretično maksimalno do 50 cm globoko)
- novi materiali, tehnologija, dodatki in procesi pripomorejo k večji strukturalni (gradbeni) vrednosti končnega produkta
- hitro napredovanje del z minimalnimi zamudami in težavami
- stroški so za 15-30 % nižji glede na uporabo drugih metod
- proces recikliranja je z okoljevarstvenega vidika povsem kompatibilen in sprejemljiv proces, saj je popolnoma brez vonja, brez vidnih emisij in izpostavljanja dimu (izpušne emisije so preusmerjene stran od delavcev, nizka poraba goriva, zmogljivi zvočno izolirani kontrolni sistem pa zagotavlja maksimalno učinkovitost)
- uporaba vsakodnevne gradbene opreme (zgoščevalnikov, vgrajevalnih strojev, grederjev, drobilnikov, vodnih cistern, kamionov prekucnikov, itd....)
- volumen mešalne komore se avtomatsko prilagaja glede na količino obdelovanega materiala (s tem prihranimo pri obrabi, zmanjša se možnost okvar, poveča se učinek in s tem profit) – slika 7
- lahkotno delovanje zanesljive tehnologije visokega standarda (vbrizgalni sistem je testiran in usposobljen za prakso za vsa standardna veziva)
- enostavna rešitev glede reciklatorjevega transporta z gradbišča na gradbišče (naložitev na polpriklopnik)

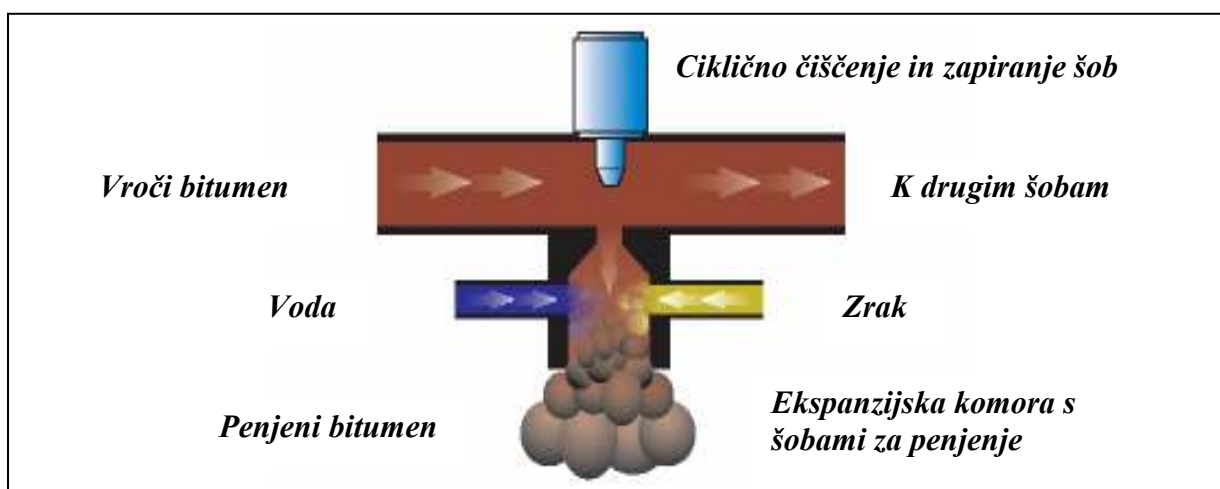


Slika 7: Variabilni prostor mešalne komore (velikost prostora se spreminja glede na delovno globino in zagotavlja optimalni učinek - tudi pri delu z velikimi debelinami plasti in neugodnimi zemljinami)

Wirtgen WS 2500 S granulira obstoječo (poškodovano) voziščno konstrukcijo, ki jo na ta način lahko ponovno uporabimo. Na ta način prihranimo pri transportu konstrukcijskih materialov. S tem pa se občutno zmanjšajo tako materialni kot transportni stroški. Med samim procesom hladne reciklaže materialov ni potrebno greti, s čimer prihranimo pri energijskih stroških (prihranek z ekonomskega vidika). Z namenom popraviti oz. izboljšati lastnosti plasti voziščne konstrukcije na gradbišču v tako pravkar zmleti material dodajamo različne vrste veziva. Zahtevano količino veziva (penjenega bitumna) in vode natančno vbrizgamo preko mikroprocesorsko nadzorovanih črpalk (slika 10), ki hkrati upravljajo sistem razprševanja. V reciklatorju se vroči bitumen preoblikuje v penjeni bitumen. Drobilno-mešalni boben potem to inovativno vezivo enakomerno premeša v novo nastalo zmes zrn. Reciklirana plast doseže visoko nosilnost s tako pripravljenim vezivom z vbrizganim penjenim bitumnom in vnaprej razprostrtim cementom. Takoj, ko je reciklirana mešanica položena in primerno zgoščena z valjarji, lahko nanjo vgradimo plast vroče asfaltne zmesi ali pa jo poškopimo z bitumensko emulzijo v primeru, da nadgraditev vezanih nosilnih plasti ni takojšnja.

➤ **penjeni bitumen** (slika 8) – je mešanica zraka, vode in vročega bitumna s tipičnim razmerjem

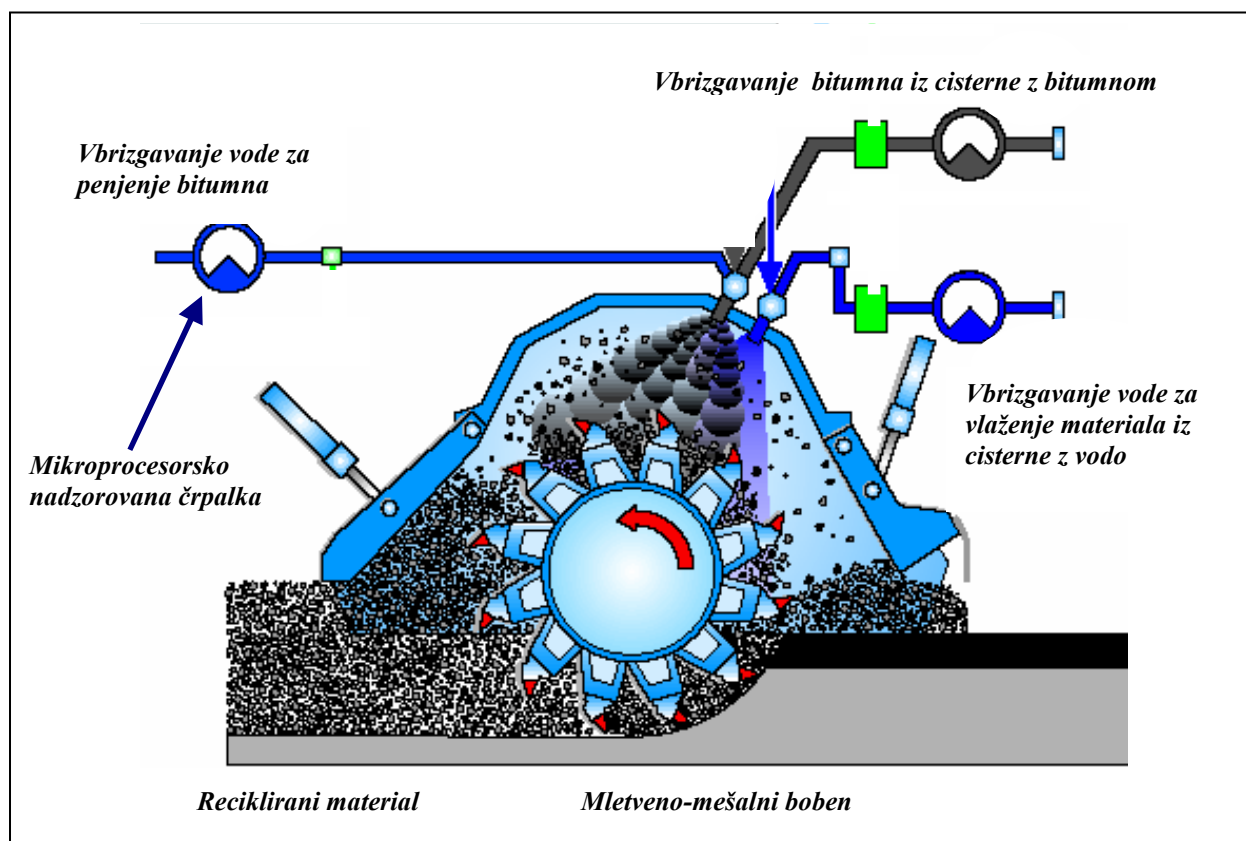
- 98 % m/m bitumna in 2 % m/m vode
- ob stiku vročega bitumna (segret na približno 160<sup>0</sup>-200<sup>0</sup> C) s hladno vodo (20<sup>0</sup> C) in stisnjnim zrakom se zmesi hitro za približno 20 x poveča volumen in tvori se pena



Slika 8: Nadzorovano penjenje bitumna (v ekspanzijsko komoro so vbrizgane majhne količine vode in zraka)



Slika 9: Med recikliranjem potiska reciklator pred seboj cisterni za vodo in bitumen



Slika 10: Odmerjanje (vbrizganje) določene količine vročega bitumna in vode v mletveno-mešalni boben preko mikropcesorsko nadzorovanih črpalk

#### 2.4.1.2 Izdelava stabilizacijskih zmesi s stroji z več prehodi

##### 2.4.1.2.1 Greder

Razpredelnica 1: Prednosti in slabosti izdelave stabilizacijske mešanice z grederjem

Izdelava stabilizacijske mešanice z grederjem	
PREDNOST	SLABOST
<ul style="list-style-type: none"> <li>• hiter postopek izdelave</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• slabo premešanje zmesi</li> </ul>

Postopki pri izdelavi oziroma mešanju stabilizacijske mešanice z grederjem (slika 11):

- vzdolž roba vozišča je potrebno enakomerno nasuti potrebno količino materiala za izdelavo stabilizirane plasti zahtevane debeline (to je lahko pripeljani material ali pa predhodno izkopani iz obstoječega vozišča)
- na tako pripravljen material je potrebno enakomerno razprostreti zahtevano količino veziva
- na predhodno dobro splaniranemu planumu nato s planirnim nožem grederja odrivamo material in vezivo enakomerno proti drugemu robu vozišča, tako da pri vsakem prehodu grederja plast na planumu postane debelejša
- ko sta ves material in vezivo odrinjena z roba, mora biti po sredini vozišča enakomerno debela plast, ki jo potem po enakem postopku odrinemo do drugega roba vozišča in nato še nazaj na mesto, kjer sta bila material in vezivo prvotno nasuta
- običajno zadostuje štirikratno takšno suho mešanje, da nastane homogena mešanica kateri potem dodamo potrebno količino vode in vse skupaj ponovno premešamo po že opisanem postopku z odrivanjem
- ko je dosežena homogena zmes, jo v enakomerni debelini razprostremo po vozišču in zgostimo



Slika 11: Izdelava stabilizacijske mešanice z grederjem



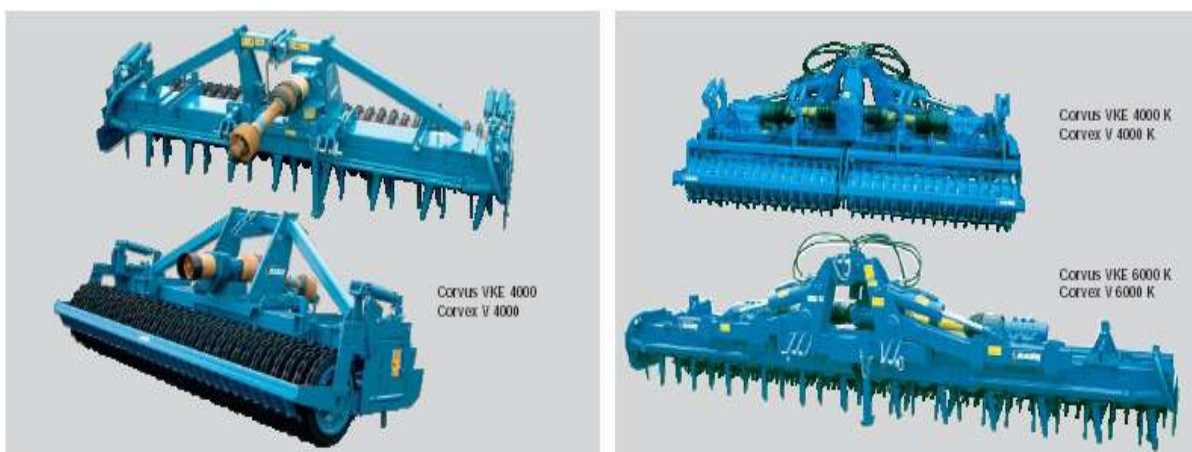
#### 2.4.1.2.2 Traktor z branami

Stabilizacijsko mešanico se pripravi po naslednjem postopku:

- na splanirani in do potrebne globine zrahljani material je potrebno razprostrti potrebno količino veziva
- z branami dobro premešamo material in vezivo najprej v suho, pri čemer dobro pazimo, da se posamezni prehodi med seboj prekrivajo
- ponovno premešamo po dodajanju potrebne količine vode, dokler ne dosežemo zahtevane homogenosti mešanice
- za mešanje v suho in mokro so potrebni od dva do štirje prehodi (odvisno od materiala, katerega želimo stabilizirati)

Razpredelnica 2: Prednosti in slabosti izdelave stabilizacijske mešanice s traktorjem z branami

Izdelava stabilizacijske mešanice s traktorjem z branami	
PREDNOST	SLABOST
<ul style="list-style-type: none"><li>• razmeroma hiter postopek izdelave</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• omogočeno mešanje tanjših plasti (do 10 cm)</li></ul>



Slika 12: Različne vrste rotacijskih bran



Slika 13: Traktor z rotacijskimi branami

#### 2.4.1.2.3 Priključni mešalniki

To so stroji namenjeni predvsem za razna poljska dela (kultivator, rotovator, rezkalnik), med drugim pa zadovoljivo pripravijo tudi stabilizacijske mešanice. S priključenimi mešalniki je zagotovljena zahtevana homogenost pri maksimalni debelini plasti 10-15 cm.

Postopek pri mešanju je sledeči:

- predhodno splanirani material in razprostrto vezivo se premeša najprej v suho, doda se potrebna količina vode in nato premeša v mokro stabilizirano mešanico
- prekrivanje pri posameznih prehodih mora znašati najmanj 15 cm

S *kultivatorjem* ali *rotovatorjem* se lahko pripravi stabilizacijska zmes pretežno samo iz pripeljanega materiala, medtem ko se z *rezkalnikom* lahko deloma koplje oziroma rahlja obstoječi material, katerega se istočasno ali z dodatnimi prehodi premeša z vezivom.



Slika 14: Kultivator



Slika 15: Rotovator

#### **2.4.1.2.4 Samostojni mešalniki**

Postopek pri izdelavi stabilizacijskih mešanic je v bistvu enak kot pri priključnih mešalnikih. Edina razlika je v tem, da je mogoče vezivo v tekočem stanju vmešati v mešalni komori med samim postopkom mešanja. S samostojnimi mešalniki je mogoče stabilizirati plasti materiala do globine 25 cm.

#### **2.4.2 Stabilni mešalni stroji**

Stabilni mešalniki imajo v primerjavi s potujočimi znatno manjšo zmogljivost, zagotavljajo pa boljše homogenost stabilizacijske zmesi ali mešanice.

Razpredelnica 3: Prednosti in slabosti izdelave stabilizacijske mešanice s stabilnimi mešalnimi stroji

Izdelava stabilizacijske mešanice s stabilnimi mešalnimi stroji	
PREDNOSTI	SLABOSTI
<ul style="list-style-type: none"><li>• boljša homogenost mešanice</li><li>• uporaba v druge namene (priprava betona)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• znatno manjša zmogljivost</li></ul>

### 3 UPORABNI MATERIALI

#### 3.1 Osnove

Osnovni materiali, ki jih v velikih količinah uporabljamo v cestogradnji so:

- lomljeni kamen
- zmesi zrn
- veziva
  - bitumenska
  - hidravlična
- dodatki
  - za asfaltne zmesi
  - za cementnobetonse mešanice

Večino materialov je mogoče stabilizirati v naravnem sestavu, to je brez korekcij zrnivosti. Način stabiliziranja pa je odvisen od vrste materiala, ki ga bomo stabilizirali. V splošnem za stabiliziranje niso primerne (ker jih je težko zdrobiti in zadovoljivo premešati z dodanim vezivom) naslednje zemljine:

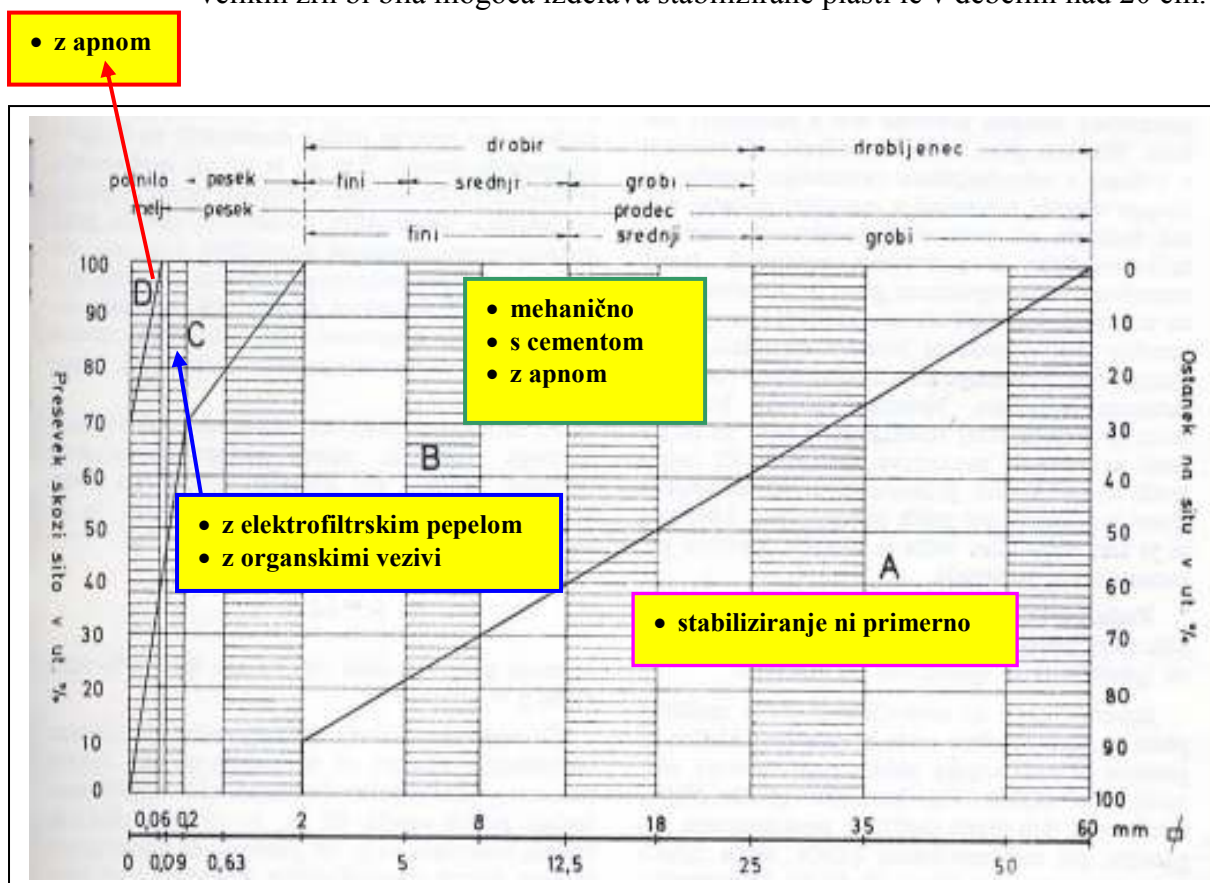
- šote
- ostale organske zemljine

- zemljine z visoko mejo tečenja (nad 40 %)
- zemljine z visoko plastičnostjo (nad 15 %)

Material za stabiliziranje ne sme vsebovati prevelikih zrn (pretežno le s premerom do 60 mm), ker bi poškodovala mešalne naprave.

V pogledu zrnivosti lahko razdelimo materiale v štiri osnovne skupine (slika 16):

- SKUPINA A: material vsebuje zrna večja od 60 mm – za stabiliziranje takega kamnitega materiala bi bila potrebna posebna mehanizacija (neekonomičnost), stabilizirana plast pa bi bila preveč porozna in luknjičava. Zaradi vsebnosti velikih zrn bi bila mogoča izdelava stabilizirane plasti le v debelini nad 20 cm.



Slika 16: Osnovne skupine materialov za stabiliziranje

- SKUPINA B: materiali te skupine (prodec, drobljenec, peščeni prodec, pesek, meljni pesek) imajo najprimernejše zrnivosti za stabiliziranje – po potrebi zrnivosti takih materialov izboljšamo z majhnimi dodatki (pogosto je dosežena željena zrnivost in gostota že z dodatkom veziva). Obstoječi za stabiliziranje predvideni material iz te skupine, ki je v zadostni debelini odporen proti zmrzovanju, je mogoče uspešno utrditi že z mehničnim stabiliziranjem.
- SKUPINA C: pri materialih te skupine (peščeni melj, peščena glina, melj, meljna glina) je prevladujoč vpliv mineralnih lastnosti frakcij manjših od 0,06 mm – sama zrnivost teh materialov ima manj pomembno vlogo. Za stabiliziranje materialov te skupine je običajno potrebna razmeroma velika količina veziva (organskega ali anorganskega).
- SKUPINA D: materiale te skupine (pretežno gline) je tudi strojno težko utrditi, tako da je stabiliziranje omejeno samo na izjemne primere lokalnega obsega, običajno pa se za stabilizacijo uporablja žgano ali hidratizirano apno.

Če vsebuje za stabiliziranje predvideni material določen odstotek kamnitih zrn, je to ugodno, saj ustvarijo nosilni skelet zmesi in se lahko občutno zmanjša količina potrebnega veziva. Grude koherentnega materiala pa je potrebno čimbolj razbiti in pri tem upoštevati naslednje ukrepe (zagotovitev večje homogenosti stabiliziranega materiala):

- vse grude naj bodo manjše od 20 mm
- 80 m.-% vsega materiala mora iti skozi sito 5 mm
- preostale grude naj bodo dobro navlažene, da pri možnosti dodatnega sprejemanja vode čim manj nabrekajo

Vsak material je sestavljen iz posameznih zrn različne oblike in velikosti, med posameznimi zrn pa je več ali manj praznih prostorov. Zaradi tega je potrebno pri stabiliziranju določenega materiala stremeti za tem, da je v zbiti stabilizirani plasti čim manj teh praznih prostorov, kar je mogoče doseči z raznimi dodatnimi materiali ali vezivi.

Zaradi reagiranja veziva oziroma vezanja veziva z osnovnim materialom se poleg povečane gostote zmesi poveča tudi notranje trenje in kohezija materiala, s tem pa strižna trdnost, od katere je v osnovi odvisna odpornost stabilizirane plasti proti statičnim in dinamičnim obremenitvam in klimatskim vplivom. Različni dodatki omogočajo spreminjanje in izboljšanje posameznih lastnosti osnovnih materialov.

### **3.2 Koherentni materiali**

Koherentni materiali so sestavljeni iz zelo drobnih zrn, pri katerih je razmerje med površino in prostornino zelo veliko. Zaradi tega je pomembna kemična sestava površine zrn ter specifična površina zrna. Materialu je tako potrebno preprečiti možnost povečanja vsebnosti vlage, da bi ohranil obstoječo kohezijo suhega ali rahlo vlažnega materiala.

Pri stabiliziranju koherentnih tal je treba upoštevati, da je pogosto potrebna razmeroma velika količina veziva za utrditev materiala. Čeprav so posamezna zrna med seboj sprijeta v kosme, je njihova poroznost razmeroma velika. Dodano vezivo poveže posamezne kosme, preostalo pa ponikne v pore in s tem deloma poveže tudi posamezna zrna.

### **3.3 Nekoherentni materiali**

Nekoherentni materiali so sestavljeni iz posameznih zrn, pogosto zelo velikega granulacijskega območja, vse od peska do gruščja in krogel.

### **3.4 Mešani materiali**

Mešani materiali so v naravi najpogostejši. Njihov indeks plastičnosti ima pomemben vpliv na trdnost oziroma obstojnost materiala. V primeru, da indeksa plastičnosti materiala ni mogoče mehanično zmanjšati na primerno stopnjo, je potrebno takšen material stabilizirati z ustreznimi vezivi. Potrebno je vedeti, da lahko drobne frakcije materiala kljub temu, da so zastopane v majhnem odstotku, predstavljajo nevarnost za porušitev celotne nadgrajene voziščne konstrukcije, če niso primerno zaščitene pred uničujočim učinkom vode ter njihovo zmožnostjo vpijanja.

### 3.5 Zmesi zrn

Zmes zrn je sestavljena iz enega ali več razredov zrn ali zrnivosti ali pa ima že v naravi ustrezno sestavo zrn za določen namen uporabe. Ustrezne lastnosti zmesi zrn pogojujejo mehanske in klimatske obremenitve voziščnih konstrukcij, ki jih v določenih pogojih pričakujemo in/ali druge specifične zahteve.

Obremenitev zmesi zrn je odvisna od mesta vgraditve za določen namen uporabe. Posamezno zrno v zmesi pa bo tem manj obremenjeno, čim bolj ustrezna je sestava zmesi zrn. V določeni sestavi bo posamezno zrno podprto z več zrn od različnih smeri: mehanska obremenitev zrna bo v takšnem primeru najmanjša, raznos obremenitve v vgrajeni zmesi pa največji.

#### 3.5.1 Vrste zmesi zrn

Glede na nastanek razlikujemo dve osnovni vrsti zmesi zrn:

- **naravne** : imajo bolj ali manj zaobljene robove in konice zrn
- **drobljene** : imajo ostre robove in konice zrn ter bolj ali manj hrapave prelomne ploskve, ker so proizvedene v drobilnicah z drobljenjem večjih ostrorobih kosov kamna (lomljenca, grušča) ali naravnih kamnitih zrn (krogel)

Z mešanjem obeh, naravnih in drobljenih zrn v določenih razmerjih, dobimo mešane zmesi kamnitih zrn.

Naravne zmesi zrn nastajajo pri razpadanju masivnih kamnin zaradi:

- sile vode
  - zmrzovanje
  - drobljenje pod ledeniki
  - raztapljanje v vodi
- sile temperature



- zmrzovanje
- vročina
- sile vetra
  - mehanska obraba

Med transportom, ki ga v naravi vršita voda in veter, se zdrobljena zrna postopoma odlagajo po velikosti in kakovosti. Preostanejo pa samo najkvalitetnejša zrna kamnine, ki so praviloma različnih velikosti.

V naravi nastale zmesi zrn z bolj ali manj zaobljenimi zrni (npr. gramoz, morenski grušč) imajo nekatere lastnosti bistveno različne od drobljenih zmesi zrn:

- večjo obstojnost (+)
- večjo čistost zmesi zrn (+)
- večji delež preperelih zrn (-)
- manjše notranje trenje v zmesi zrn (-)

S preddrobljenjem predvsem večjih naravnih zrn lahko pridobimo novo kakovost zmesi zrn (npr. prodčev drobir), ki pa praviloma ne dosega kakovosti z drobljenjem lomljenca pripravljene zmesi zrn.

Za proizvodnjo zmesi drobljenih zmesi zrn lahko poleg lomljenca naravnih kamnin kot pretežno uporabljene surovine uporabimo tudi umetne kamnine, med drugim različne žlindre, ki nastanejo pri proizvodnji kovin (železa, bakra) in različne vezane materiale (elektrofiltski pepel).

### **3.5.2 Geometrijske značilnosti zmesi zrn**

Med geometrijske značilnosti zmesi zrn upoštevamo :

- sestavo zmesi zrn
- površino zmesi zrn

- obliko zrn
- gostoto zmesi zrn
- notranje trenje

### 3.5.2.1 Gostota zmesi zrn

Gostoto zmesi zrn določa sestava in razporeditev zrn v zmesi, od nje pa so odvisne predvsem mehanske značilnosti zmesi zrn (npr. nosilnost, trajnost,...) in z njimi proizvedenih materialov.

Zmesi kamnitih zrn, zgoščene do največje možne koncentracije mase (največje dosegljive gostote), povečamo njeno prostornino za približno 20 V.- % z rahljanjem. Taki zrahljani zmesi dodamo kinetično energijo (npr. z vibriranjem), tako da je med zrnji vedno manj votlin (prostorov zapolnjenih z zrakom).

#### 3.5.2.1.1 Prostorninska gostota

Idealne prostorninske gostote pri samem vgrajevanju ni mogoče takoj doseči, lahko pa se ji približamo z določenimi postopki zgoščevanja in jo označimo kot maksimalno prostorninsko gostoto zmesi zrn  $\rho_{ZZ \max}$ . Pri tem je potrebno paziti, da ne nastopijo nezaželene težave kot sta *drobljenje zrn* ali *preoblikovanje zmesi*. Prostorninska gostota ima velik vpliv na stabilizirano zmes. Optimalno gostoto zmesi dosežemo, če vsebuje material pri vgrajevanju optimalno vlažnost. Osnovna enačba, po kateri določimo prostorninsko gostoto zmesi zrn  $\rho_{ZZ}$ , se glasi:

$$\rho_{ZZ} = \frac{m_{ZZ}}{V_{ZZ}} \quad [g/cm^3] \quad (1)$$

kjer pomeni:

$m_{ZZ}$  - masa zmesi zrn (g)

$V_{ZZ}$  - prostornina zmesi zrn (cm<sup>3</sup>)

### 3.5.2.1.2 Prostorninska gostota po Proctorju

Prostorninska gostota po Proctorju je tista gostota, ki se pri preizkusu po Proctorjevemu postopku doseže kot največja še dosegljiva gostota suhega materiala. Postopek po Proctorju temelji na zgoščevalnem delu, potrebnem za zgostitev določenih značilnih zmesi zrn. Potek določevanja prostorninske gostote  $\rho_{Pr}$  je naslednji:

vzorec zmesi zrn zgoščujemo po določenem postopku v jeklenem valju (kalupu z določenimi izmerami) z nabijalom (slika 17), da zagotovimo za določeno prostornino vzorca določeno zgoščevalno delo A, ki mora znašati:

$$A = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot n_p \cdot n_n}{V_p} \quad [MNm / m^3] \quad (2)$$

kjer pomeni:

$m$  - masa nabijala (kg)

$g$  - gravitacijski pospešek ( $g = 10m/s^2$ )

$h$  - višina nabijala (m)

$n_p$  - število plasti

$n_n$  - število udarcev na plast:

❖ SPP (standardni Proctorjev preizkus):  $3 \times 25$  udarcev

❖ MPP (modificirani Proctorjev preizkus):  $5 \times 59$  udarcev

$$V_p - \text{prostornina preizkušanca} \rightarrow V_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H \quad [m^3] \quad (3)$$

$d$  - premer jeklenega valja (m)

$H$  - višina preizkušanca (m)

Celotni postopek sestoji iz petih preizkusov, pri katerih ima vzorec zmesi zrn različno vsebnost vode. Kot rezultat preiskave dobimo funkcijsko odvisnost prostorninske gostote

suhe zmesi zrn  $\rho_{dzz}$  od vsebnosti vode v isti zmesi  $w$ . Na tej osnovi določimo za preiskano zmes optimalno vsebnost vode  $w_{o,Pr}$ , pri kateri je mogoče doseči največjo prostorninsko gostoto suhe zmesi zrn  $\rho_{dPr}$ .



Slika 17: Postopek zgoščevanja zmesi zrn v jeklenem valju (kalupu) z nabijalom (po Proctorju)

- ❖ Prostorninska gostota po Proctorju = prostorninska gostota po standardnem Proctorjevem preizkusu (tudi oznaka SPP)  $\rho_{dPr}$  je določena z zgoščevalnim delom  $A \approx 0,6 \text{ MNm/m}^3$  – za vezljive materiale
- ❖ Modificirana prostorninska gostota po Proctorju = prostorninska gostota po modificiranem, izboljšanem Proctorjevem preizkusu (tudi oznaka MPP)  $\rho_{dPr'}$  je določena z zgoščevalnim delom  $A \approx 2,65 \text{ MNm/m}^3$  – za zmesi kamnitih zrn

### 3.5.2.2 Notranje trenje

Poleg odpornosti proti preoblikovanju zmesi zrn je izredno pomembna strižna trdnost, ki se jo določi po Mohr-Coulomb-ovi enačbi:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad \left[ \text{kN} / \text{m}^2 \right] \quad (4)$$

kjer pomeni:

$c$  – kohezija ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$\sigma$  - vertikalna napetost ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$\varphi$  - kot notranjega trenja ( $^{\circ}$ )

Kohezija čiste zmesi zrn, pretežno uporabljane v cestogradnji, je minimalna. Zato je pod določeno obremenitvijo strižna trdnost zmesi odvisna predvsem od kota notranjega trenja, ki pa ga v pretežni meri določajo geometrijske značilnosti posameznih zrn in celotne zmesi zrn.

### 3.5.3 Mehanske značilnosti zmesi zrn

Mehanske značilnosti zmesi zrn so predvsem odpornost proti

- drobljenju
- zaglajevanju
- visokim in nizkim temperaturam ter ostalim vplivom vremena

#### 3.5.3.1 Odpornost proti drobljenju

Odpornost zmesi zrn proti drobljenju je posredno prikazana fizikalna značilnost, ki vključuje tlačno, upogibno-natezno in razkolno trdnost. Za določanje odpornosti zmesi zrn proti drobljenju je uveljavljenih več postopkov.

### 3.5.3.1.1 Postopek preiskave »Los Angeles« (LA)

Postopek za preiskavo zmesi zrn z napravo "Los Angeles" temelji na določanju njene odpornosti proti drobljenju zaradi udarcev in istočasni obrabi zrn zaradi medsebojnega trenja med postopkom preiskave.

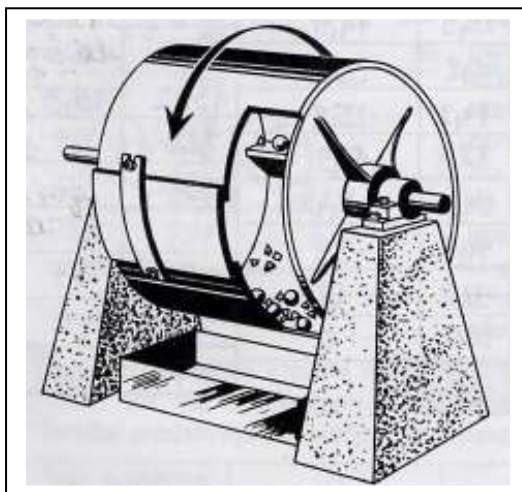
Pri postopku LA vstavimo skupaj z zmesjo zrn v boben (slika 18) več jeklenih krogel določene mase, ki med vrtenjem drobijo in meljejo zrna. Količnik LA kot merilo odpornosti zmesi zrn določimo z enačbo:

$$LA = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

kjer pomeni:

$m_0$  - masa vzorca zmesi zrn pred preiskavo

$m_1$  - masa vzorca zmesi zrn po preiskavi, ki je ostal na situ 2 mm po izpiranju drobnejših zrn



Slika 18: Votel jekleni boben pri postopku LA

### **3.5.3.2 Odpornost proti zaglajevanju**

Odpornost zmesi proti zaglajevanju je pomembna predvsem za obrabne plasti vozišč, ki jih vozila v večji meri obremenjujejo tudi z vodoravnimi silami. Za določanje odpornosti zmesi zrn sta sicer uveljavljena dva postopka: angleški postopek in postopek Wehner/Schulze.

### **3.5.3.3 Odpornost proti visokim in nizkim temperaturam**

Zmesi zrn, ki jih uporabljamo v cestogradnji, so lahko izpostavljene zelo visokim, a tudi zelo nizkim temperaturam. Zato je potrebno zmesi zrn ustrezno preveriti, da se izognemo težkim posledicam, ki bi lahko nastale v določenih pogojih.

#### **3.5.3.3.1 Visoke temperature**

Kritičnim visokim temperaturam so praktično izpostavljene samo zmesi zrn, ki jih uporabljamo pri sestavi asfaltnih zmesi po vročem postopku. Zmes zrn v takšnih pogojih izpostavimo "vročinskemu šoku", to je izpostavimo jo temperaturi približno 700<sup>0</sup> C v talilni peči za kratek čas (3-5 minut), tako da ugotovimo spremembe v takšnih pogojih (spremembo trdnosti kamnine, morebitne odkruške,...).

#### **3.5.3.3.2 Nizke temperature**

Merilo odpornosti zmesi zrn pri nizkih temperaturah je vpojnost vode. Točnejšo oceno odpornosti zmesi zrn proti nizkim temperaturam pa je mogoče dati na osnovi preiskave s kristalizacijskim preizkusom (z natrijevim ali magnezijevim sulfatom). Velike napetosti, ki jih pogojuje postopek, povzročijo krušenje in drobljenje slabo obstojnih zrn v zmesi.

#### **3.5.3.4 Odpornost proti vplivom vremena**

Vse kamnine se v večji ali manjši meri izpostavljene procesu preperevanja, ki povzroča bistvene spremembe v notranji zgradbi. S tem se slabša njihova odpornost proti drobljenju in zaglajevanju ter proti visokim in nizkim temperaturam.

Odpornost s hidravličnim vezivom stabilizirane zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij *proti škodljivim vplivom vremena*, tj. proti zmrzovanju in tajanju, je treba preveriti, če

- zmes kamnitega materiala vsebuje
  - več kot 15 m.-% zrn  $< 0,063$  mm in/ali
  - $> 10$  m.-% krhkih zrn ali
- je bilo s predhodno laboratorijsko sestavo stabilizacijske mešanice ugotovljeno, da je potrebna količina dodanega veziva  $< 2$  m.-%

Preskus odpornosti stabilizacijske mešanice proti zmrzovanju in tajanju je treba izvršiti z najmanj po tremi preskušanci v treh serijah z različnim deležem hidravličnega veziva. Preskušanci morajo biti pripravljene z optimalno količino vode in zgoščeni (v treh plasteh s po 75 udarci bata z določene višine) do najmanj 100 %-ne zgoščenosti.

Po 7-dnevem odležanju preskušancev v vlažni komori s 100 %-no vlago in na temperaturi približno  $20^0$  C, jih je treba potopiti v vodo s temperaturo približno  $20^0$  C. Po 24-urnem namakanju jih je treba vzeti iz vode, jih obrisati in nato izpostaviti 12 ciklom izmeničnega zmrzovanja in tajanja.

Po zadnjem 24-urnem tajanju preskušancev in dodatnem 4-urnem namakanju v vodi je treba določiti njihovo enosno tlačno trdnost. Po vsakem ciklu zamrznjenja in tajanja je treba izmeriti višino preskušancev, katerih razlika rezultatov med prvim in dvanajstim ciklom lahko znaša največ  $+ 1$  %.

Razmerje povprečnih vrednosti enosnih tlačnih trdnosti preskušancev, izpostavljenih zmrzovanju in tajanju ter preskušancev, hranjenih enak čas (7 dni) v vlažni komori s 100 % vlago in na temperaturi približno  $20^0$  C ter pred preskusom 4 ure potopljenih v vodi, je označeno kot količnik odpornosti stabilizacijske mešanice proti zmrzovanju. Ta količnik mora znašati najmanj 0,7.



### 3.6 Veziva

Obstaja pravilo, da lahko obremenimo verigo samo toliko, kolikor lahko prevzame njen najšibkejši člen. V vezanih zmesih in mešanicah ta šibki člen predstavlja prav vezivo.

Zrna v zmesi, ki so med seboj povezana z določenim vezivom, zagotovijo bistveno boljše lastnosti tako zgrajene voziščne konstrukcije.

V cestogradnji zato uporabljamo predvsem dve vrsti veziv:

- anorganska veziva
  - cement
  - apno
- organska veziva
  - bitumenska
  - naravni asfalt

Izbiro vrste veziva pri gradnji voziščnih konstrukcij pogojujejo predvsem nameni oziroma pogoji uporabe:

- za toge mešanice so primerna anorganska veziva
- za gibke zmesi zrn pa organska veziva

#### 3.6.1 Anorganska veziva

Anorganska veziva so prašnati materiali, ki po zmešanju z vodo kemično reagirajo. Pri tem in zaradi istočasnih fizikalnih procesov prehaja nastala pasta postopoma v otrdelo stanje in vrsto kamna.

Kohezijske in adhezijske lastnosti anorganskih veziv so tiste, ki omogočajo, da ta veziva lahko povežejo kamnita zrna v trdno mešanico.

Za stabiliziranje materialov so bila najprej uporabljena anorganska veziva. Osnovni namen stabiliziranja materialov z anorganskimi vezivi je povečati strižno trdnost oziroma nosilnost tako zgrajene plasti. Deloma se s tem načinom stabiliziranja materiala poveča tudi odpornost materiala proti uničujočim vplivom vode in temperaturnim spremembam. Z anorganskimi vezivi stabilizirani materiali imajo mnogo večje nosilnosti kot osnovni materiali, saj se poveča notranje trenje stabiliziranega materiala.

Pri stabiliziranju z anorganskimi vezivi je posebno pomembna pravilna vlažnost materiala, ki mora biti nekoliko nad optimalno vlago, da bi bila vezivu po vgraditvi zagotovljena še potrebna voda za vezanje. Ob predpostavki, da med samim delovnim postopkom precej vode izhlapi, stremimo torej k čimprejšnji vgradnji mešanice oziroma zgoščevanju ter kasneje tudi pravilni negi. Po končani vgradnji mešanico zaščitimo pred izhlapevanjem vode s pobrizgom z bitumensko emulzijo ali rezanim bitumnom.

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

- cement
- apno
- pucolane
- žlindro visokih peči

Izbira pravilnega veziva izmed zgoraj navedenih je odvisna predvsem od:

- namena stabilizirane plasti oziroma zahtevnih lastnosti
- lokalnih razmer
- zrnivosti razpoložljivega materiala
- ekonomičnosti

### 3.6.1.1 Cement

Izraz cement izhaja še iz zgodovine Rimljanov (2 st. pred n.š.). Večina zidov je bila narejenih z gradbeno-tehničnim postopkom opus caementicium in je bila prekrita z drugimi materiali z

namenom narediti površino bolj vzdržljivo in primernejšo za uporabo. Opus caementicium (slika 19) je jedro vsakega rimskega zidu in predstavlja tehniko gradnje, ki uporablja zmes zrn, vodo in vezivo. Zmes zrn opravlja dolžnost polnila in je iz gramoza, koščkov opeke ali kamna in lomljenca. Vezno sredstvo je navadno malta kot apno, sadra ali pucolan (dandanes je uporabljen portland cement).

### 3.6.1.1.1 Proizvodnja cementa

V cestogradnji uporabljamo več različnih vrst cementov:

- portland cement (najpogosteje uporabljen)
- metalurški cement
- pucolanski cement
- sulfatno odporni cement
- aluminatni (Lafarge) cement
- ekspanzivni (nabrekli) cement



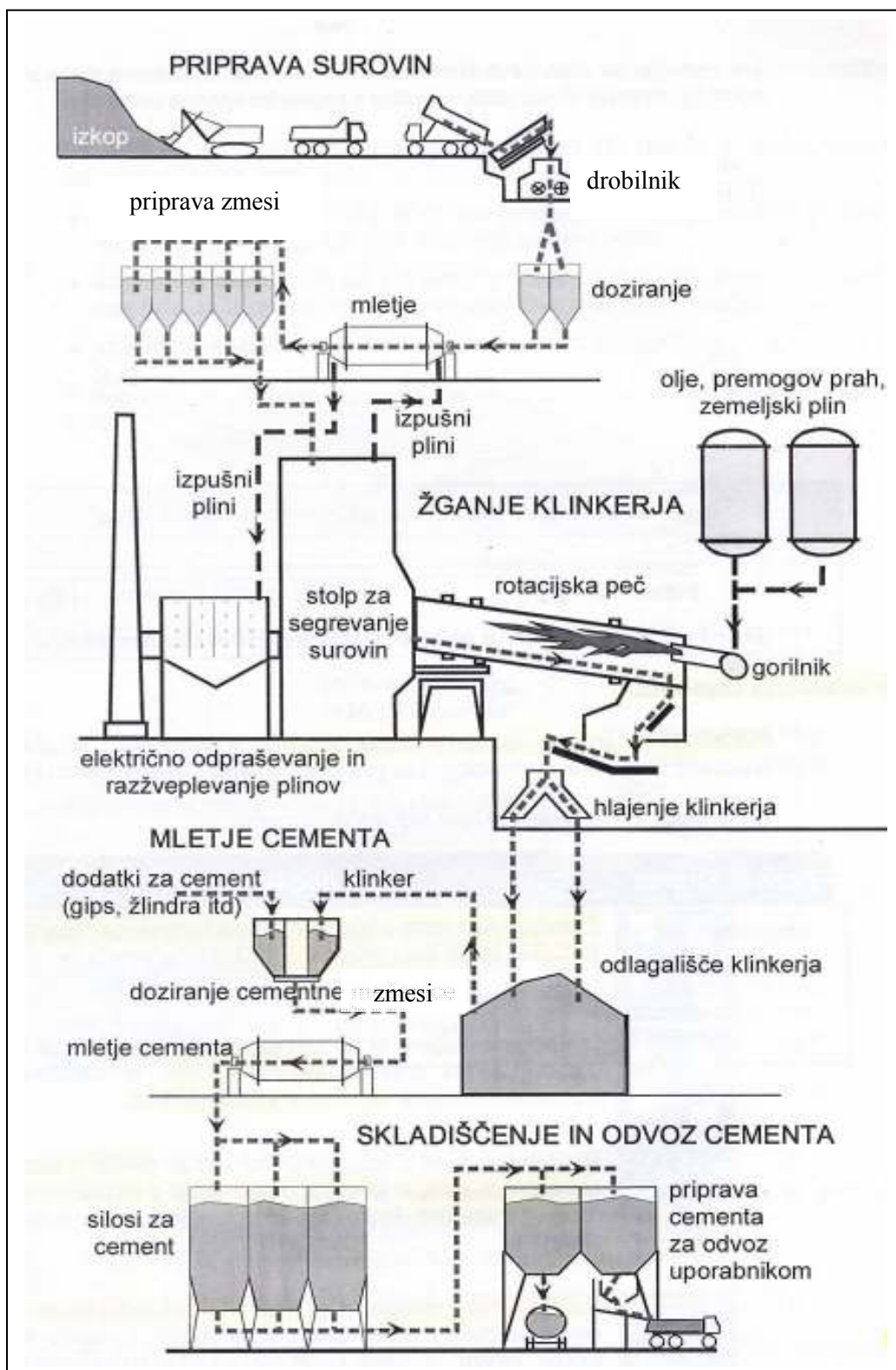
Slika 19: Opus caementicium (zmes zrn iz gramoza, koščkov opeke ali kamna, vode in veziva)

Portland cement je hidravlično vezivo, ki zaradi kemične reakcije z vodo otrdi tako na zraku kot tudi pod vodo ter tudi ostane obstojno v vodi.

Osnovne surovine za proizvodnjo portland cementa morajo vsebovati okside kalcija (Ca), silicija (Si), železa (Fe) in aluminija (Al). Naravna materiala, ki vsebujeta te okside sta predvsem apnenec in glina, primerna surovina pa je tudi lapor.

Postopek proizvodnje portland cementa je sestavljen iz več faz (slika 20):

- priprava surovin
  - Ⓢ pridobivanje surovin
  - Ⓢ drobljenje surovin
  - Ⓢ skladiščenje (homogeniziranje osnovnih surovin)
  - Ⓢ mletje z odpraševanjem
  - Ⓢ homogeniziranje surovega prahu ali pri mokrem postopku utekočinjenega mulja
- predelava surovin
  - Ⓢ izmenjalnik toplote : segrevanje do  $900^0$  C da izpari voda in se apnenec razgradi na apno (CaO) in ogljikov dioksid (CO<sub>2</sub>)
  - Ⓢ rotacijska peč: temperatura se proti koncu dviga do meje kapljevine pri  $1200^0$  C in dalje do  $1400^0$  C, kjer se s sintranjem pretvorijo surovine predvsem v kalcijeve silikate in aluminat, deloma pa v druge spojine → nastanejo minerali klinkerja (cementni klinker)
- predelava klinkerja
  - Ⓢ klinker je po izstopu iz rotacijske peči sestavljen iz okroglih zrn velikosti 3-25 mm in se prične ohlajati in skladiščiti
  - Ⓢ klinker se nato z dodanim mavcem (kalcijev sulfat) in dodatki (žindra, elektrofiltrski pepel) zmelje v cevni mlini
  - Ⓢ s finostjo mletja in dodatki za posamezno vrsto cementa določimo potrebne fizikalne in cementnotehnološke lastnosti
  - Ⓢ skladiščenje v silosih



Slika 20: Postopek proizvodnje portland cementa

### 3.6.1.1.2 Sestava cementa

Osnovne spojine portland cementnega klinkerja ( t.j. minerali cementa, ki so hkrati nosilci lastnosti cementa) nastanejo pri reagiranju osnovnih spojin v surovinah za proizvodnjo cementa (oksidi kalcija, silicija, železa, aluminija) med seboj na temperaturi sintranja okoli  $1400^{\circ}\text{C}$  in več.

Nastanejo sledeče spojine:

- trikalcijev silikat ( $\text{C}_3\text{S}$ ) – 46 %
  - dikalcijev silikat ( $\text{C}_2\text{S}$ ) – 28 %
  - trikalcijev aluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ) – 9 %
  - tetrakalcijev aluminatni ferit ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) – 7 %
  - alkalni oksidi ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )
  - prosto apno ( $\text{CaO}$ )
  - magnezijev oksid ( $\text{MgO}$ )
- } osnovne spojine =  
minerali klinkerja
- } manjša prisotnost količin teh spojin

### 3.6.1.1.3 Hidratacija cementa (proces vezanja vode in cementa)

Proces hidratacije cementa se prične takoj, ko smo cementu dodali vodo. Molekule vode obvijajo ione trdnih zrn cementa in s tem omogočijo njihovo boljše razporeditev v nastali gelni in kristalni strukturi. Zaradi velike specifične površine cementa je potrebna za hidratacijo velika količina vode. Pri tem nastanejo iz silikatov in aluminatov proizvodi hidratacije – hidrati.

V času hidratacije se razvija hidratacijska toplota, ki je odvisna od sestave cementa, sproščanje te toplote pa je v veliki meri odvisno od zunanje temperature.

Tekoča oz. plastična cementna pasta postopno prehaja v otrdelo, hidratizirano cementno pasto. Kristali apna in gel iz hidratov kalcijevih silikatov zapolnita prostor med zrn na površini zrn cementa prav s procesom hidratacije.

#### **3.6.1.1.4 Lastnosti cementa**

Hidratacija cementa prične na površini zrn, zato je hitrost reagiranja cementa poleg mineraloške sestave odvisna še od sestave zrnivosti cementa. Sestavo zrnivosti cementa označujemo tudi kot finost mletja cementa in jo določimo na dva načina:

- grobi postopek s sejanjem na situ 0,09 mm
- fini postopek s sedimentiranjem po Stokesu ali s permeabilimetrom po Blaineu

##### **3.6.1.1.4.1 Finost mletja**

Finost mletja vpliva na proces hidratacije cementa. Cementi z drobnejšimi zrnji imajo višje trdnosti. Taki cementi med hidratacijo razvijejo več toplote in se bolj krčijo. Hidratacija se razvija na površini zrn, zato se fina zrna popolneje hidratizirajo. Finost mletja definirata dva parametra:

- specifična površina zrn (vsota površin vseh zrn v enoti mase)
- granulometrijska sestava cementa

##### **3.6.1.1.4.2 Določanje začetka in konca strjevanja**

Za določitev časa vezanja cementa, t.j. začetka in konca strjevanja, uporabimo Vicatov aparat in pripravimo cementno pasto standardne normalne konsistence. Začetek vezanja imenujemo trenutek, ko se igla, prodirujoča skozi cementno pasto, zaustavi na višini 3-5 mm nad stekleno ploščo. Čas, ki je pri tem potekel od dodajanja vode cementu, pa do začetka vezanja, pa imenujemo čas začetka vezanja.

Kot konec vezanja cementa vzamemo trenutek, ko igla ne prodre več kot 1 mm v pasto obrnjenega vzorca. Čas, ki je potekel od trenutka dodajanja vode cementu do konca vezanja imenujemo čas konca vezanja. Praviloma cement ne sme pričeti vezati prej kot v 1 uri po zmešanju z vodo, mora se pa končati prej kot v 10 urah.

### 3.6.1.1.4.3 Stalnost (stabilnost) prostornine cementa

Cementna pasta spreminja svojo prostornino zaradi različnih zunanjih vplivov, kar povzroča nastanek razpok. Stalnost volumna določamo na vzorcih v obliki kolačkov ali pa z Le Chatelier-ovimi prstani. Cement ima stalni volumen, če se pri preizkusu ne pojavijo radialne ali mrežaste razpoke, upogibanje, drobljenje in razpadanje, ter zvijanje kolača.

### 3.6.1.1.5 Vrste cementa (portland cement, aluminatni [boksitni] cement)

Cementi, ki jim je osnova portland cementni klinker, lahko vsebujejo različne mineralne dodatke, ki ugodno vplivajo na fizikalne lastnosti svežega cementnega betona. Prav zaradi različnih vplivov dodatkov cementu, je potrebno njihovo vsebnost ustrezno označiti. Število poleg naziva vrste cementa predstavlja vrednost pričakovane tlačne trdnosti cementa po 28. dnevih (MN/m<sup>2</sup>).

Različni proizvajalci ponujajo različne proizvode cementov. Tako npr. Salonit Anhovo proizvaja naslednje vrste cementov, ki jim je osnova portland cementni klinker:

Razpredelnica 4: Pregled različnih vrst cementa – proizvodi Salonit Anhovo

Vrste cementa	Oznaka vrste cementa	Pričakovana tlačna trdnost po 28.dneh
Cement 42,5 – osnovni	CEM II/B-M (L-P)	42,5 N
Cement 42,5 – specialni	CEM II/A-S	42,5 R
Cement 52,5	CEM I	52,5 R
CEM I 42,5	CEM I	42,5 N
Salodur	CEM V/A (S-P)	32,5 N-LH
Sulfatnoodporni cement	CEM I	42,5 N SR

in visoko sulfatnoodporni cement za naftne vrtine GEODUR tipa G-HSR ter aeriran zidarski cement trdnostnega razreda 5 : MALTIT MC 5.



### **3.6.1.1.6 Evropski predstandard za hidravlična veziva, uporabljena pri stabilizaciji vozišč (prENV 13282, European Prestandard, Hydraulic Road Binders - Composition, Specifications and Conformity Criteria, CEN Brussels, 1998)**

#### **Predmet standarda**

Glede na uveljavljeno prakso in pridobljene izkušnje, pa tudi dostopnost različnih veziv, se za pripravo nosilnih slojev cestišč ter s stabilizacijo in izboljšanje tal v svetu uporabljajo zelo različna veziva. Med ta veziva spadajo cementi, skladni s standardom SIST EN 197-1, apno, skladno s standardom SIST ENV 459-1, in veziva za stabilizacijo voziščne konstrukcije, ki so bila v preteklosti definirana v državnih standardih in tehničnih soglasjih.

Hidravlična veziva za cestišča, kot so pojmovana v tem standardu, so gotova veziva, proizvedena v tovarni in pripravljena za uporabo na terenu. Standard ne obravnava materialov, ki jih pripravimo na samem gradbišču z mešanjem (npr. pepel, žindra, itd).

Prav tako ne obravnava običajnih cementov, ki so opredeljeni v SIST EN 197-1, apna, opredeljenega v SIST ENV 459-1 in zidarskih cementov, definiranih v SIST ENV 413-1. Za zidarske cemente pa je v tem standardu posebej navedeno, da so za uporabo primerni, v kolikor zadoščajo kriterijem tega standarda. Zidarske cemente sicer opredeljuje SIST ENV 413-1.

Hidravlično vezivo za cestišča (Hydraulic road binders) je pripravljeno vezivo, ki se v stiku z vodo strdi na zraku in v vodi ter ohrani stabilnost ter trdnost. Vezivo je v praškasti obliki sestavljeno iz različnih materialov, ki pa so statistično homogeno zmešani med seboj.

#### **Glavne komponente**

Vezivo smejo sestavljati nad 5 % naslednjih glavnih komponent:

- Komponente, ki ustrezajo zahtevam za glavne komponente običajnih cementov SIST EN 197-1:

- portland cementni klinker (K)
- granulirana plavžna žindra (S)
- pucolanski materiali (P)
- elektrofiltrski pepel (silicijski V; kalcijski W)
- žgani skrilavci (T)
- apnenec (L)

➤ Apno skladno z SIST ENV 459-1

Poleg glavnih komponent lahko vezivo vsebuje še do 5 % manjšinskih komponent, kalcijev sulfat ter do 1 % aditivov (aditivi za pospeševanje mletja, aeranti, itd.)

Standard deklarira 4 različne trdnostne razrede glede na standardno tlačno trdnost po 28 dneh (določena skladno z SIST EN 196-1) in sicer razrede 5, 12,5, 22,5 in 32,5. Razreda 22,5 in 32,5 imata še podrazred, označen z E, ki pomeni minimalno 20 % PC klinkerja in določeno trdnost po 7 dneh.

Razpredelnica 5: Pregled trdnostnih razredov in zahteve podane v prENV 13282

Trdnostni razred	Tlačna trdnost (MPa)	
	7 dni	28 dni
5	-	5-15
12,5	-	12,5 – 32,5
22,5	-	22,5 – 42,5
22,5 E	≥ 10	22,5 – 42,5
32,5	-	32,5 – 52,5
32,5 E	≥ 16	32,5 – 52,5

### Označevanje

Vezivo skladno s tem standardom označujemo z oznako HRB in trdnostnim razredom. Na kupčevo zahtevo se deklarira še glavne sestavine in njihove deleže.

## **Skladnost uporabljenih veziv s standardom prENV 13282**

Vsa uporabljena veziva ustrezajo zahtevam iz standarda, vendar pa glede na to, da so deklarirana bodisi kot običajni cementi ali zidarski cement, ni potrebe po preverjanju skladnosti s standardom prENV 13282 (certificiranje cementa po standardu). Tudi v uvodu standarda je izrecno navedeno, da je namenjen zgolj vezivom, ki jih ni mogoče deklarirati kot cemente ali zidarske cemente ali apno, pa so kljub temu uporabni za namene izgradnje voziščnih konstrukcij.

### **Primer Maltit**

Maltit bi po standardu prENV 13282 uvrstili v trdnostni razred 5 in bi ga označili kot HRB 5.

#### **3.6.1.2 Apno (zračno vezivo)**

Apno se je podobno kot cement uporabljalo kot vezivo že v starem veku, dandanes pa ga v cestogradnji uporabljamo predvsem za stabiliziranje vezljivih zemljin in v maltah, kjer skupaj s kamnitimi zrnji po strjevanju in sušenju tvori trdno gradivo.

##### **3.6.1.2.1 Proizvodnja apna**

Osnovna surovina za proizvodnjo apna je predvsem apnenec, sicer pa tudi dolomit ali apnenčev lapor. Apno vsebuje pretežno CaO, v manjši količini pa še MgO. Pridobiva se z segrevanjem (žganjem) kamnine (apnenca) v pečeh do temperature nekoliko pod točko sintranja (okoli 950<sup>0</sup> C), tako da se iz apnenca izloči CO<sub>2</sub> in nastane t.i. živo apno, ki sestoji v pretežni meri iz kalcijevega hidroksida (CaOH)<sub>2</sub>.



### 3.6.1.2.2 Lastnosti apna

Apna, ki se uporabljajo v cestogradnji morajo ustrezati določenim zahtevam, npr. dovoljeni količini oz. vsebnosti CO<sub>2</sub>, vsebnosti CaO in MgO, vsebnosti proste vode in finosti mletja.

#### 3.6.1.2.2.1 Finost mletja

Finost mletja ugotavljamo s sejalno analizo. Velikost delcev vpliva na lastnosti apna. Uporabljajo se sita z odprtinami 0,6 mm in 0,09 mm.

#### 3.6.1.2.2.2 Stabilnost prostornine

Stabilnost volumna se ugotavlja s preskusom 3 kolačkov, ki se pripravijo iz apnene malte (apno : standardizirani pesek = 1 :3) s količino vode, ki ustreza vodoapnenemu faktorju za preizkušano vrsto apna. Kolačke hranimo 28 dni v prostoru z relativno vlažnostjo RH 65 % na sobni temperaturi in pri tem ugotavljamo površinske spremembe (razpoke, drobljenje).

#### 3.6.1.2.3 Vrste apna

Apna razvrščamo glede na potek proizvodnje in njihovo strjevanje. Osnovna proizvoda sta živo in gašeno apno. Za uporabnost apna pa je merodajen potek strjevanja. Karbonatno strjevanje je značilno za apna, ki vsebujejo velik delež CaO in MgO, saj se strjujejo po zmešanju z vodo zaradi navzemanja CO<sub>2</sub> iz zraka. Hidravlično strjevanje je značilno za apna, ki vsebujejo poleg vodotopnega CaO še reakcijsko sposobne okside (okside Si, Fe, Al) in po zmešanju z vodo odležijo na zraku še nekaj dni ter na tak način hitreje dosežejo večje trdnosti.

##### ➤ Živo apno [CaO]

- je v kosih, ki se meljejo v fini prah, z dodajanjem vode pa ga gasimo



##### ➤ Gašeno apno

- po gašenju nastane apnena kaša = gašeno apno [Ca(OH)<sub>2</sub>]

➤ Hidratizirano apno

- je gašeno apno s teoretično določeno količino potrebne vode (ima približno 33 % mase živega apna [CaO]) – to vezivo je praškasto in se z dodatno količino vode spremeni v apneno kašo

➤ Hidravlično apno

- se pridobiva iz laporastih in glinastih apnencev, ki vsebujejo do 20 % gline in se veže tako na zraku kot v vodi

➤ Nehidravlično apno

- se strjuje s sušenjem, ko se ob vezanju CO<sub>2</sub> in hkratnem izločanju vode ponovno tvori kalcijev karbonat CaCO<sub>3</sub>



### 3.6.1.3 Pucolani

Pucolani so (kemično gledano) silikatni in alumosilikatni materiali, ki sami nimajo vezivnih sposobnosti, vendar pa z apnom ali vodo kemično reagirajo. Pri tem nastanejo spojine, ki imajo cementirajoče hidravlične lastnosti, ki so poznane pod imenom pucolanske lastnosti. Ločimo:

➤ naravne pucolane

- vulkanski pepel (tuf), diatomejska zemlja, opal, žgana glina

➤ umetne pucolane

- elektrofiltrski pepel (EFP), silikatni prah → odpadni produkti industrije

### 3.6.1.4 Žindra visokih peči

Granulirana žindra visokih peči vsebuje pretežno iste okside kot portland cementni klinker. Pridobiva se jo s hitrim hlajenjem z vodo, zrakom ali paro, ko razpade v zrna peska. Fino

granulirana žindra ima ima najboljše latentno hidravlične lastnosti. Apneno-silikatna žindra nastane pri metalurškem procesu kot odpadni produkt in je zelo homogen material, po kemični sestavi podoben prirodnemu kamnu.

### 3.6.2 Organska veziva

Organska veziva so težko hlapljive, temno obarvane, poltrdne do odbojne, topljive, visokomolekularne zmesi ogljikovodikov. S stabiliziranjem materiala z organskimi vezivi se predvsem poveča kohezija uporabnega materiala, notranje trenje pa ostane nespremenjeno. Osnovni namen uporabljenega oz. dodanega organskega veziva je trajno vezati skelet v optimalno zgoščenem stanju.

V kemiji nafte razlikujemo štiri vrste istovrstnih ogljikovodikov:

- parafini
- olefini
- nafteni
- aromati

Bitumenski materiali sodijo med polimerna gradiva, ki jih odlikuje velika trajnost in sprijemnost. Prevladujejo rafinirani bitumni, ki se pridobivajo iz naravnih ali kot stranski produkt v naftni industriji.

#### 3.6.2.1 Bitumenska veziva

Vsa ogljikovodikova veziva imajo nekaj skupnih lastnosti:

- so vodoodporna in vodoneprepustna
- so odporna na vremenske vplive
- so lepljiva
- ter na voljo v velikih količinah

Beseda bitumen verjetno izhaja iz latinščine: pix tumens = znoječa smola. Bitumen je osnova vseh bitumenskih veziv in je iz ustrezne nafte proizvedena zmes različnih organskih substanc, katerih elastoviskozno obnašanje se s temperaturo spreminja. Topljiv je v ogljikovem disulfidu, nehlapljiv in se zvezno mehča pri segrevanju. Ponavadi je rjave ali črne barve ter zelo lepljiv in vodoneprepusten.

### 3.6.2.1.1 Proizvodnja bitumna

Bitumne pridobivamo z destilacijo surove nafte, ki vsebujejo veliko naftenov in aromатов. Po kemični sestavi tako razlikujemo različne vrste naft:

- naftensko-bazične = asfaltno-bazične (25-70 m.-% bitumna)
- parafinsko-bazične (malo bitumna)
- mešano-bazične (25-70 m.-% bitumna)

Bitumni so po kemični sestavi podobni katranom in so odporni na večino atmosferskih vplivov. Oksidacija zaradi izpostavljenosti zraku, toploti in svetlobi je površinski proces in zato so bolj ogroženi tenki premazi bitumnov kot debelejšje plasti.

Z ustreznim vmešavanjem različnih dodatkov v destilirani bitumen dobimo različna bitumenska veziva:

- bitumenske raztopine
  - fluksirno olje → fluksirani bitumen (rezani bitumen = cutback)
  - lahkohlapljivo olje → bitumenska raztopina
- bitumenske emulzije
  - emulgator + voda → bitumenska emulzija
- s polimeri modificirani bitumni

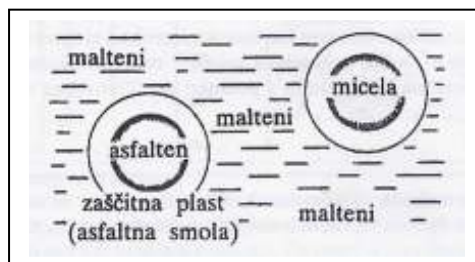
### 3.6.2.1.2 Sestava bitumna

Bitumen je sestavljen iz velikega števila različnih molekul ogljikovodikov in manjše količine drugih snovi (npr. žvepla, kisika, dušika,...). Ločimo tri različne skupine struktur bitumnov:

- aromatske spojine
- aliciklične spojine
- alifatske spojine

Kakovost bitumna določajo predvsem njegove fizikalne lastnosti (sprijemnost, viskoznost, specifična gostota, temperaturna občutljivost,...).

Po molekularni strukturi (slika 21) pa so bitumni vmesna stopnja med pravimi raztopinami in suspenzijami, t.j. koloidi. Molekularna struktura razpršenega koloida sestoji iz delcev z veliko molekularno maso. Delci z največjo molekularno maso (= asfaleni) tvorijo jedra. Okoli teh jeder se združujejo delci z manjšo molekularno maso v micela. Zunanjo fazo okoli micel, ki jo sestavljajo smole in olja, pa imenujemo malteni.



Slika 21: Molekularna zgradba bitumna

Odvisno od vsebnosti asfaltenov in kemične narave zavzame micelna struktura bitumnov različne vrste oblik:

- sol-tip bitumen (bolj tekoči)
  - dinamična viskoznost
- gel-tip bitumen (micela so povezane v verige, nizek delež aromatskih olj)



- elastična deformabilnost
- sol-gel-tip bitumen (vmesni cestogradbeni geli)
  - lahko ima za uporabo v cestogradnji idealne viskoelastične lastnosti
  - optimalna sestava sol-gel-tipa bitumna bi bila:
    - 22 % asfaltenov, 33 % smol in 45 % olj

### 3.6.2.1.3 Staranje bitumna

Staranje bitumna vpliva na spremembo sestave in lastnosti bitumna. Razlikujemo tri vrste staranja bitumna:

- zaradi izhlapevanja
- zaradi oksidacije
- strukturno staranje

Vpliv na staranje bitumna v različnih fazah "življenjske dobe bitumna" (poleg debeline filma bitumna):

- proizvodnja bitumna
  - oksidacija (vpihavanje segretega zraka)
  - destilacija
- predelava bitumna
  - skladiščenje v cisternah
  - proizvodnja asfaltnih zmesi
  - prevozi na mesto vgraditve
- po vgraditvi
  - kakovost uporabljene zmesi zrn
  - delež votlin v asfaltni zmesi
  - klimatski vplivi (temperatura)

Staranje bitumna se opazi na povečanju delcev, zmanjšanju specifične površine disperznih delcev in porastu strukturne viskoznosti.

#### 3.6.2.1.4 Željene značilnosti bitumenskega veziva

- ohranitev elastičnosti
  - pri prometnih obremenitvah
    - statičnih
    - dinamičnih
    - kratkotrajnih
    - dolgotrajnih
  - pri klimatskih spremembah
    - nizke temperature
    - visoke temperature
- odpornost proti staranju
  - oksidativno
  - zaradi izločanja in absorbcij olj
  - strukturno
- dobra lepljivost
  - kohezija
  - adhezija

#### 3.6.2.1.5 Reološke lastnosti bitumna

Reologija je veda, ki proučuje preoblikovanje in tečenje tistih snovi, ki se ne obnašajo običajno po klasičnih zakonih viskoznosti in elastičnosti (Newton, Hook). Reološke lastnosti bitumna so v glavnem odvisne od temperature. Spremembe fizikalno-reoloških lastnosti bitumna, ki nastanejo zaradi oksidacije, so naslednje:

- povišano zmečičšče
  - zmanjšana penetracija
  - višja točka loma (pretrgališča)
  - manjša duktilnost
  - večja viskoznost
- } vse skupaj vodi k povečanju nevarnosti nastanka razpok

### 3.6.2.1.6 Postopki preiskav bitumna

Osnovni postopki, ki nam določajo osnovne lastnosti cestogradbenih bitumnov so:

- penetracija
  - predstavlja globino vtiska ustrezne penetracijske igle, obremenjene s 100g v času 5 s → izražamo jo v 1/10 mm in je merilo trdote bitumna pri 25<sup>0</sup> C ter osnova za razvrstitev bitumnov v posamezne vrste (npr. B 50/70, B 70/100, B 100/150, B 160/220)
- točka zmehčišča (po postopku "prstan-kroglica" = PK)
  - predstavlja temperaturo začetka tečenja bitumna
  - bitumni s segrevanjem postanejo mehkejši in nimajo tališča
  - pri temperaturi zmehčišča se plast bitumna, vgrajena v prstan in enakomerno segrevana, pod kroglico z določeno maso preoblikuje iz trdega v tekoče stanje (v določenem obsegu)
  - ocena obnašanja bitumna pri temperaturah poleti
- indeks penetracije
  - pove temperaturno občutljivost bitumna oz. spremembo viskoznosti v odvisnosti od temperature
- duktilnost (raztegljivost)
  - določa območje oz. meje raztezanja bitumna, dokler se nastala nit ne pretrga pri raztezanju vzorca bitumna z določeno hitrostjo v nitko
- pretrgališče (točka loma po Fraasu)
  - predstavlja temperaturo izraženo v <sup>0</sup> C, pri kateri film bitumenskega veziva določene debeline počne, če se pod predpisanimi pogoji ohlaja in upogiba → služi kot orientacija obnašanja bitumenskega veziva pri nizkih temperaturah ter nam pove, kdaj bitumen doseže določeno krhkost in s tem prve razpoke na njegovi plasti
- viskoznost
  - je merilo notranjega trenja tekočine – bitumna v različnih fazah predelave

- merimo čas, ki ga potrebuje določena količina vzorca bitumna, da izteče iz normirne posode z določeno odprtino

### 3.6.2.1.6 Druge lastnosti bitumna

- gostota bitumna
  - uporabljamo pri načrtovanju sestav asfaltnih zmesi ( $\rho_B = 0,92 - 1,07 \text{ g/cm}^3$ )
- razteznost bitumna
  - upoštevamo pri vgrajevanju asfaltnih zmesi, ki jih je potrebno valjati do minimalne še primerne temperature ( $\approx 80^0 \text{ C}$ )
- prevodnost bitumna
  - prevodnost je majhna → bitumen in asfaltna zmes sta izolatorja
- termoviskozno obnašanje
  - pogojeno z viskoznostjo bitumna v odvisnosti od temperature → prehod bitumna iz trdnih snovi pri normalnih temperaturah v tekočino pri visokih temperaturah
- elastoviskozno obnašanje
  - analiza deformacije asfaltna zmesi zaradi obremenitve
    - kratkotrajna obremenitev: elastično deformiranje
    - dolgotrajna obremenitev: viskozno (trajno) deformiranje
- sposobnost relaksiranja bitumna
  - bitumen z viskoznim preoblikovanjem zmanjša vsiljene napetosti
- utrujanje bitumna
  - bitumen se zelo raztegne, vendar pa pri določenem raztežku počni
  - meje raztezanja so odvisne od vrste bitumna, temperature in deleža bitumna (debeline bitumenskega filma)
- oprijemljivost bitumna
  - potrebno je popolno obvitje kamnitih zrn z bitumnom → suha in čista površina kamnitih zrn
- obnašanje v vodi

- bitumen je v vodi netopljev
- obnašanje v kemikalijah
  - ogljikovodiki, ki sestavljajo bitumen, so zelo odporni na kemikalije
- obnašanje v olju in topilu
  - bitumen je topljiv v olju in topilu → proizvodnja bituminoznih raztopin (fluksiranega in raztopljenega bitumna)
- obnašanje na zraku in svetlobi
  - kisik, UV žarki in temperatura vplivajo na spremembe v otrditvi bitumna

### 3.6.2.1.7 Vrste bitumenskih veziv

Ločimo tri različne vrste bitumenskih veziv:

#### 3.6.2.1.7.1 Bitumen

Pri bitumnih razlikujemo različne vrste, kot so bile v posamezni fazi predelave nafte po vročem postopku proizvedene in sicer:

- destilirani bitumen
  - proizvaja se samo še najmehkejše vrste bitumna
- vakuumski bitumen
  - v fazi predelave nafte bolj ali manj znižamo tlak, da s tem zagotovimo hitrejše izparevanje olj iz ostanka, ki ga še predelujemo in s tem povečamo trdoto bitumna
- oksidirani bitumen (= pihani bitumen)
  - proizvedemo z vpihavanjem na 250<sup>0</sup>-300<sup>0</sup> C segretega zraka v destilirani bitumen
- modificirani bitumen
  - ◆ **Razlogi za uporabo modificiranih bitumnov**
    - visoke cene nafte (bitumna)
    - naraščanje prometnih obremenitev

- večja gostota vozil
- večje osne obremenitve
- večji naležni pritiski
- gospodarske razmere
  - čim tanjše plasti
  - recikliranje obstoječih materialov
  - večja trajnost ustreznih lastnosti vozišč

#### ◆ Vrste dodatkov za modificiranje bitumnov

- termoplasti (PVC)
- duroplasti
- elastomeri (naravni kavčuk)
- termoelastične umetne snovi

#### ◆ Značilnosti s polimeri modificiranega bitumna

- razširjeno območje plastičnosti
- povečana viskoznost
- povečana fleksibilnost in elastičnost
- izboljšana lepljivost
- večja termična stabilnost
- večja odpornost proti staranju

#### ◆ Uporaba modificiranih bitumenskih veziv

- nosilne asfaltne zmesi
  - visoka odpornost proti plastičnemu preoblikovanju (poleti)
  - visoka odpornost proti utrujanju-staranju (pozimi)
- obrabne asfaltne zmesi (plasti)
  - obdelava površine vozišča
    - površinske prevleke
    - tankoplastne prevleke
  - "odprte" asfaltne zmesi
    - drenažni asfalti
    - protihrupni asfalti
  - stabilne asfaltne zmesi

- bitumenski beton
- drobir z bitumenskim mastiksom
- membrane za absorbcijo napetosti
- hidroizolacije
  - premazi
  - lepilne zmesi
  - tesnilne zmesi
  - trakovi

#### ◆ Tehnološki postopki za proizvodnjo modificiranih bitumnov

- direktno mešanje standardnega bitumna in dodatka (polimera)
- vmešanje predhodno obdelanega dodatka v bitumen
- vmešanje monomera v bitumen
- dovoljeno predhodno pripravljenega večnamenskega dodatka v bitumen

Proces priprave modificiranega bitumna je sestavljen iz več faz: vskladiščenje standardnega bitumna → prečrpavanje → filtriranje → regulacija (doziranje) → dodatki bitumnu (polimeri, smole) → vmešavanje dodatkov → zorenje zmesi bitumna in dodatkov → homogeniziranje modificiranega bitumna → odprava → vskladiščenje

#### **3.6.2.1.7.2 Bitumenske raztopine**

Bitumenske raztopine pridobivamo z utekočinjenjem bitumna z vmešavanjem olj in/ali raztopitvijo bitumna s topili. S tem zmanjšamo viskoznost in potrebno temperaturo veziva za uporabo. Mehki do srednje trdi cestogradbeni bitumen (B 160/220 do B 100/150) je osnova za proizvodnjo fluksiranega (rezanega) in raztopljenega bitumna.

#### **3.6.2.1.7.3 Bitumenske emulzije**

Bitumenske emulzije so zmesi cestogradbenega bitumna in vode, pri čemer je bitumen v mikroskopsko majhnih delcih (premera 1-5 mikromov) razpršen v vodi, dodani emulgator pa

z zmanjšanjem napetosti na mejnih površinah zagotavlja ohranitev tako ločenih delcev. Pri bitumenskih emulzijah razlikujemo njihovo uporabnost:

- kationske emulzije
  - uporabne na vsaki (tudi vlažni) površini
- anionske emulzije
  - neprimerne na :
    - kislil kamnini
    - če je potrebno hitro vezanje
    - če je vreme vlažno

### 3.6.2.2 Naravni asfalti

Naravni asfalti nastajajo z destilacijo naft v naravi v daljših časovnih obdobjih (geoloških dobah) in mešanjem nastalega bitumna z drobnimi kamnitimi zrn (melj, drobni pesek) ali vulkanskim pepelom.

Razlikujemo tri različne vrste naravnega asfalta:

- srednje trdi
  - zmesi, ki vsebujejo od 40-80 m.-% vezljivih delcev bitumna
  - Selenica (Albanija), Trinidad
- zelo trdi
  - zelo majhna vsebnost primesi (kamnitih zrn)
  - velika trdota
  - gilsonit (Utah), sirski asfalt
- asfaltne kamnine
  - vsebnost bitumna do 40 m.-%
  - asfaltni apnenec in asfaltni pesek



### 3.7 Kemijski dodatki

Kemijski dodatki ali aditivi so snovi pretežno organskega izvora, ki jih v zelo majhnih količinah (%-%) dodajamo vezivom, zmesem in/ali mešanicom predvsem z namenom povečati homogenost in povezavo teh veziv (zlepljenosti) s kamnitimi zrn.

Ostalim pomembnim lastnostim organskih bitumenskih veziv zadostimo s pravilno izbiro vrste izbranega veziva in postopki uporabe. Pri tem je najpomembnejši dejavnik vpliv temperature.

Kemijski dodatki, ki jih dodajamo mešanicom z anorganskim vezivom (cementom), s svojim fizikalnim in kemičnim delovanjem v veliki meri spremenijo lastnosti cementne paste. Na grobo delimo po sestavi in načinu učinkovanja na lastnosti tri skupine snovi za proizvodnjo dodatkov cementnemu betonu:

- površinsko aktivne snovi
- topljive kemikalije
- netopljive dodatke

### 3.8 Sestava stabiliziranih zmesi

Izhodišče za predhodno sestavo z vezivom stabilizirane zmesi kamnitih zrn so značilne lastnosti zmesi zrn in veziva na eni strani ter zahtevane lastnosti stabilizirane zmesi oziroma mešanice na drugi strani.

V praksi so se uveljavili za sestavo z vezivi stabiliziranih zmesi predvsem empirični postopki. Pri tem ostane razpoložljiva sestava zmesi kamnitih zrn, ki bo z vezivom stabilizirana, praviloma nespremenjena, razen če jo spremeni dodano vezivo.

Za zagotovitev dovolj širokega območja preverjenih in pogojenih lastnosti stabilizirane zmesi oziroma mešanice od dodanega veziva je treba praviloma pripraviti vsaj 5 različnih sestav s podobno sestavo kamnitih zrn, ki se med seboj razlikujejo le v deležu dodanega veziva.

### 3.8.1 Sestava stabiliziranih zmesi z anorganskimi vezivi

Za pripravo preizkušancev za predhodno preiskavo z anorganskimi vezivi stabilizirane zmesi kamnitih zrn je treba zagotoviti optimalno vsebnost vode po Proctorju  $w_{o,Pr}$  za uporabljeno zmes kamnitih zrn. Taki zmesi kamnitih zrn je potrebno dodati izbrane količine anorganskega veziva za posamezne sestave mešanic. Informativne mejne količine cementa znašajo od 45-65 kg/m<sup>3</sup>. V mešalniku ustrezno homogenizirano sestavo mešanic strojno zgostimo po postopku za določitev modificirane prostorninske gostote po Proctorju. Pripravljene valjaste preizkušance ves čas preiskave hranimo pri ustrezni temperaturi in vlagi. Po 7 dneh preiskave ugotovimo na po treh preizkušancih za vsako izbrano vrsto količine veziva povprečno tlačno trdnost mešanice  $\sigma_{7SM}$ , po 28. dneh pa poleg tlačne trdnosti suhe mešanice tudi povprečno trdnost namočene mešanice  $\sigma_{28SMm}$  za določitev vremenske obstojnosti.

Vremenska obstojnost stabilizirane mešanice se določi z kvocientom tlačnih trdnosti mokre in suhe mešanice po 28. dneh in mora zadostiti pogoju:

$$\frac{\sigma_{28SMm}}{\sigma_{28SM}} \geq 0,7 \quad (9)$$

V običajno zahtevanem območju tlačnih trdnosti stabiliziranih mešanic po 28. dneh je odvisnost (od 2,5 – 4,5 MN/m<sup>2</sup>) tlačnih trdnosti od deleža anorganskega veziva praviloma bolj ali manj linearna. Z vnosom dobljenih odvisnosti med tlačno trdnostjo in količino deleža veziva v ustrezen diagram ni problem dobiti primerne ustrezne količine veziva za vmešavanje v razpoložljivo zmes kamnitih zrn, da bo zagotovljeno zahtevani tlačni trdnosti in vremenski obstojnosti z anorganskim vezivom stabilizirane zmesi kamnitih zrn.

### 3.8.2 Sestava stabiliziranih zmesi z organskimi vezivi

Za sestavo stabilizirane zmesi kamnitih zrn z organskimi (bituminoznimi) vezivi uporabljamo pri predhodnih preiskavah empirični postopek po Marshallu. Če je v določenih situacijah

sestava zmesi kamnitih zrn deloma pomanjkljiva, jo v postopku stabiliziranja z organskimi vezivi tudi deloma popravimo.

Na ustrezno temperaturo segretim najmanj petim vzorcem zmesi kamnitih zrn je treba dodati in enakomerno zamešati izbrane količine izbranega bitumenskega veziva za posamezne sestave stabilizirane zmesi.

Za vsako sestavo stabilizirane zmesi morajo biti po predpisanem postopku po Marshallu z ustreznim zgoščevanjem z nabijanjem pripravljene najmanj po trije preizkušanci. Na tako pripravljenih vzorcih (preizkušancih) z bitumenskimi vezivi stabiliziranih zmesi kamnitih zrn s prehodnimi preiskavami določamo:

- prostorninsko gostoto  $\rho_A$
- navidezno specifično gostoto  $\rho'_{sA}$
- prostorninski delež zmesi zrn v stabilizirani zmesi  $V\%_{ZZ/A}$
- prostorninski delež veziva v stabilizirani zmesi  $V\%_{B/A}$
- vsebnost votlin v stabilizirani zmesi  $V\%_{v/A}$
- vsebnost votlin v zmesi zrn  $V\%_{v/ZZ}$
- stopnjo zapolnjenosti votlin v zmesi kamnitih zrn z vezivom  $SVZ_{ZZ/B}$
- stabilnost pri  $60^0$  C
- tečenje pri  $60^0$  C
- togost pri  $60^0$  C

Ugotovljene osnovne lastnosti stabilizirane zmesi vnesemo v diagrame v odvisnosti od deleža bitumenskega veziva v zmesi. Glede na te rezultate določimo optimalno količino veziva za proizvodnjo stabilizirane zmesi. Pri tem je potrebno v praksi resno upoštevati določeno optimalno količino veziva, saj vsako odstopanje od tega deleža veziva vpliva na spremembo mehanskih lastnosti stabilizirane zmesi zrn. Sicer pa je prekomerni delež veziva praviloma bolj škodljiv kot premajhen delež istega veziva.

## 4 NAČRTOVANJE ZMESI IN MEŠANIC

### 4.1 Proizvodnja stabiliziranih zmesi in mešanic

Postopke za proizvodnjo stabiliziranih zmesi in mešanic lahko razvrstimo

- glede na mesto priprave
  - v stabilni (centralni) mešalni napravi = mix in plant
  - na mestu vgrajevanja = mix in place
- glede na način priprave
  - v šaržni (diskontinuirani) postopek
  - v neprekinjeni (kontinuirani) postopek (drum – mix)

V stabilni mešalni napravi (mix in plant) s klasičnim šaržnim postopkom zagotovimo najbolj kvalitetno proizvodnjo stabilizirane zmesi (za zahtevnejše asfaltne zmesi je pogojena proizvodnja prav s šaržnim postopkom). Bistveno slabša pa je kakovost stabilizirane zmesi s postopkom mešanja na mestu vgrajevanja (mix in place), ki pa je zaenkrat lahko samo kontinuiran.

#### 4.1.1 Proizvodnja stabiliziranih mešanic z anorganskimi vezivi

Izvedba s hidravličnim vezivom stabilizirane mešanice kamnitih zrn za nosilne plasti je sklop naslednjih osnovnih del:

- priprave podlage
- priprave mešanice zmesi kamnitih zrn z dodanim hidravlični vezivom in vodo
- vgrajevanja
- nego vgrajene mešanice

Navedenih del ni mogoče izvajati, če znaša temperatura zraka manj kot 2<sup>0</sup> C ali če je za stabiliziranje pripravljena zmes kamnitih zrn zmrznjena.

Rahel dež med izvajanjem del ni škodljiv, pri močnejšem je pa treba delo prekiniti.

Za pripravo z anorganskimi vezivi stabilizirane mešanice pretežno uporabljamo kontinuirani postopek mešanja, zato je ustrezna stabilna oprema za kontinuirno mešanje zamenjala razmeroma zmogljivo strojno opremo, ki je bila v začetku na razpolago za mešanje na mestu vgrajevanja.

Kakovost mešanice je lahko zadovoljiva, če je pri mešanju v stabilni opremi s kontinuiranim postopkom zagotovljeno doziranje obeh komponent po masi in je ustrezen tudi čas mešanja.

#### 4.1.1.1 Priprava podlage

Priprava podlage za izvedbo stabilizacije zmesi kamnitih zrn s hidravličnim vezivom in vodo je odvisna od postopkov mešanja:

- pri postopku mešanja v stabilnem centralnem obratu (**mix in plant**) je treba zagotoviti ustrezno nosilno in sprofilirano podlago, ki omogoča strojno vgrajevanje proizvedene stabilizacijske mešanice v zahtevani kakovosti
  - suho podlago je potrebno predhodno primerno navlažiti v primeru, če bi le-ta lahko odtegnila potrebno vodo iz stabilizacijske mešanice za vezanje z hidravličnim vezivom
- pri postopku mešanja na gradbišču (**mix in place**) pa priprava podlage predstavlja osnovno plast zmesi kamnitih zrn, ki bo z dodanim hidravličnim vezivom in vodo stabilizirana
  - planum te plasti mora biti raven in praviloma zgrajen v profilu, kot je načrtovan za vozišče
  - razprostrta zmes kamnitih zrn (v ustrezni debelini plasti) mora biti predhodno enakomerno zgoščena, tako da je tudi načrtovano količino hidravličnega veziva mogoče razprostreti enakomerno po njeni površini, da bo s strojem za mešanje mogoče pripraviti stabilizacijsko mešanico v enakomerni debeli plasti

#### 4.1.1.2 Priprava mešanice in vgrajevanje

Stabilizacijsko mešanico zmesi kamnitih zrn, hidravličnega veziva in vode je torej mogoče pripraviti z ustreznim tehnološkim postopkom mešanja:

- v centralnem obratu (mix in plant) ali
- na mestu vgrajevanja (mix in place)

Pri obeh tehnoloških postopkih mora biti mešanje strojno. Zmogljivost opreme za mešanje mora omogočiti enakomerno proizvodnjo potrebne količine homogene mešanice kamnitih zrn, hidravličnega veziva in vode, ki bo imela po strditvi zahtevane lastnosti.

##### 4.1.1.2.1 Postopek mešanja v centralnem obratu (mix in plant)

Stabilizacijsko mešanico za vezane nosilne plasti (VNP) v voziščnih konstrukcijah na avtocestah in glavnih državnih cestah je praviloma treba proizvesti po postopku mešanja v centralnem obratu.

Dozirne naprave v centralnem obratu za proizvodnjo stabilizacijskih mešanic morajo zagotoviti potrebno točnost dodajanja posameznih sestavin, kot je bilo opredeljeno z izbiro na osnovi rezultatov preizkusov predhodne sestave stabilizacijske mešanice. V okviru predhodnih preiskav mora izvajalec pred pričetkom izvajanja dela zagotoviti predhodno (laboratorijsko) sestavo stabilizacijske mešanice iz zmesi kamnitih zrn, hidravličnega veziva in vode za vezano nosilno plast. S predhodno sestavo stabilizacijske mešanice opredelimo:

- vrsto in sestavo zmesi kamnitih zrn
- laboratorijsko sestavo mešanice
- optimalno vlažnost in največjo prostorsko maso mešanice
- enoosno tlačno trdnost mešanice po 7.dneh
- odpornost mešanice proti zmrzovanju in tajanju
- optimalno količino in vrsto hidravličnega veziva

Izvajalec mora s tehnološkim elaboratom predložiti izjavo o skladnosti predhodne (laboratorijske) sestave stabilizacijske mešanice, ki jo namerava vgraditi v vezan nosilno plast, ki temelji na certifikatu kontrole proizvodnje.

V centralnem obratu za mešanje mora biti stabilizacijska mešanica proizvedena v šaržnem ali pretočnem mešalniku (za kontinuirano mešanje).

Postopek mešanja mora trajati toliko časa, da sta dodana hidravlično vezivo in za optimalno vlažnost potrebna količina vode enakomerno porazdeljena v zmesi kamnitih zrn.

Stabilizacijska mešanica mora biti praviloma vgrajena z ustreznim strojem (razdelilnikom), tako da je nevarnost segregiranja zmanjšana na najmanjšo mero, v največji meri pa zagotovljena zahtevana ravnost in debelina plasti ter enakomerna predzgoščenost mešanice. Vgrajevalni učinek stroja za razprostiranje stabilizacijske mešanice mora zagotoviti najmanj 80 %-no zgoščenost. Stabilizacijsko mešanico za spodnjo plast je mogoče vgraditi tudi z grederjem ali buldozerjem, če je načrtovana vgraditev s hidravličnim vezivom stabilizirane zmesi kamnitih zrn v dveh plasteh in ne v eni sami.

Če dopuščajo pogoji dela, je treba vgraditi stabilizacijsko mešanico naenkrat v vsej širini vozišča. Pri vgrajevanju z dvema razdelilnikoma z zamikom razlika v kakovosti zgrajene nosilne plasti na območju stika ne sme biti opazna.

Pri vgrajevanju stabilizacijske mešanice z razdelilnikom v več plasteh morajo biti vzdolžni stiki na plasteh med seboj zamaknjeni za najmanj 20 cm, prečni (delovni) stiki pa za najmanj 50 cm.

Vsako prekinitev vgrajevanja stabilizacijske mešanice je treba izvršiti v vsej širini vgrajevanja in praviloma pravokotno na os ceste ter navpično.

Za zgostitev plasti stabilizacijske mešanice je treba uporabiti ustrezne vibracijske valjarje, tako da bo zgoščenost v nosilno plast vgrajene mešanice v vsej širini vozišča čimbolj

enakomerna. Ustrezno zgoščena mora biti stabilizacijska mešanica tudi ob robu vgrajene plasti.

#### **4.1.1.2.2 Postopek mešanja na mestu vgrajevanja (mix in place)**

Stabilizacijska mešanica zmesi kamnitih zrn in hidravličnega veziva za nosilne plasti je lahko v malo obremenjenih voziščnih konstrukcijah proizvedena z mešanjem na mestu vgrajevanja predhodno razprostrte zmesi kamnitih zrn, hidravličnega veziva in dodane vode.

Postopek mešanja na mestu vgrajevanja je mogoče uporabiti tudi na avtocestah in glavnih državnih cestah, če to na osnovi predloženih dokazil o ustreznih lastnosti tako pripravljene stabilizacijske mešanice odobri inženir.

Namesto pripeljane in razprostrte zmesi kamnitih zrn je mogoče zagotoviti za stabiliziranje primerno homogeno zrnastost zdrobljenega materiala, vgrajenega v vrhnje plasti obstoječe voziščne konstrukcije, tudi z ustreznimi stroji – rezkalniki.

Za stabiliziranje potrebno količino hidravličnega veziva je treba enakomerno razprostreti, praviloma z ustreznimi stroji – posipalniki, samo izjemoma na manjših in/ali težko dostopnih površinah pa lahko tudi ročno.

S prvim prehodom stroja za mešanje je praviloma treba izvršiti mešanje zmesi kamnitih zrn in hidravličnega veziva brez dodajanja vode. To mešanje je treba izvršiti čimprej po tem, ko je bilo hidravlično vezivo razprostrto.

Za zagotovitev optimalnega deleža vode v stabilizacijski mešanici je treba še potrebno količino vode dodati z doziranjem neposredno v mešalno komoro stroja za mešanje na mestu vgrajevanja, samo izjemoma lahko tudi z brizganjem s cisterno.

Strojna oprema in postopki za razprostiranje veziva, dodajanje vode ter mešanje in zgostitev stabilizacijske mešanice morajo biti usklajeni, tako da je celoten tehnološki postopek izvršen v času, preden prične hidravlično vezivo vezati.



Če je mešanje izvajano v zaporednih pasovih, mora biti priključevanje novih na stare v še svežem stanju stabilizacijske mešanice s preklopi, širokimi najmanj 20 cm.

Zgoščevanje pripravljene stabilizacijske mešanice mora biti zaključeno najpozneje 3 ure po razprostiranju veziva.

Za zgostitev plasti stabilizacijske mešanice je treba uporabiti ustrezne vibracijske valjarje, tako da bo zgoščenost v nosilno plast vgrajene mešanice v vsej širini vozišča čimbolj enakomerna. Ustrezno zgoščena mora biti stabilizacijska mešanica tudi ob robu vgrajene plasti.

#### **4.1.1.3 Transport**

Pogoj za zagotovitev ustrezne kakovosti opravljenega dela je, da so vsi postopki med seboj usklajeni. Proizvedena stabilizirana zmes kamnitih zrn z vezivom je praviloma lahko samo specifično omejen čas uskladiščena na obratu, kjer je bila proizvedena.

Za prevoz stabilizirane mešanice na gradbišče predvidena tovorna vozila morajo biti dovolj zmogljiva in opremljena za ustrezno razkladanje. Kovinske kesone vozil je treba pred natovarjanjem stabilizirane mešanice pobrizgati s primernim sredstvom za preprečevanje zlepljenja.

Za zaščito stabilizirane mešanice pred izsuševanjem, hlajenjem in zunanjimi vplivi (padavinami, vročino, prahom in vetrom) morajo biti tovorna vozila ustrezno opremljena, praviloma vsaj s primerno plahto.

Transportna razdalja oziroma čas prevoza stabilizirane mešanice na gradbišče je omejen z značilnostmi uporabljenega veziva.

#### 4.1.1.4 Nega vgrajene mešanice

Vgrajeno plast stabilizacijske mešanice je praviloma treba ustrezno negovati najmanj 3 dni z vlaženjem ali pa z ustreznim postopkom zaščititi pred izsuševanjem. Zaščitimo jo lahko na enega izmed naslednjih načinov:

- s pobrizgom z ustrezno nestabilno bitumensko emulzijo, tako da je zagotovljen neprekinjen film bitumna
  - potrebna količina bitumenske emulzije za pobrizg je odvisna od strukture površine plasti, vendar ne sme biti manjša od  $0,8 \text{ kg/m}^2$
- s pobrizgom z ustrezno nestabilno bitumensko emulzijo in takojšnjim posipom z drobirjem zrnivosti 2/4 mm, če mora biti takoj zagotovljena poveznost zgrajene plasti
  - posuti drobir je treba z valjarjem delno vtisniti v pobrizgano podlago
- s prekritjem z materialom, ki zadržuje vodo (juta, polst)
- s prekritjem s folijo, ki preprečuje izhlapevanje vode

Nega vgrajene stabilizacijske mešanice pa **ni** potrebna, če je s hidravličnim vezivom stabilizirana zmes kamnitih zrn, vgrajena v nosilno plast, neposredno po izgradnji nadgrajena z naslednjo plastjo voziščne konstrukcije in sicer v primeru, da na stabilizirani nosilni plasti ne nastanejo prekomerna preoblikovanja (vtiski) ali pa, če stabilizacijski mešanici na vrhu vgrajene plasti ni bila odvzeta prekomerna količina za vezanje potrebne vode.

Vgrajena stabilizacijska mešanica mora doseči zahtevano enoosno tlačno trdnost pred zmrzovanjem, sicer jo je potrebno pred mrazom zaščititi z ustrezno nadgraditvijo.

*Gradbiščni promet* se na s hidravličnim vezivom stabilizirano nosilno plast lahko pripusti takoj po izvršeni zaščiti stabilizacijske mešanice pred izsuševanjem s pobrizgom z bitumensko emulzijo in njenem razpadu. *Javni promet* pa je praviloma mogoče pripustiti na vozišče z nosilno plastjo, stabilizirano z hidravličnim vezivom, šele, ko je ta plast nadgrajena z naslednjo vezano plastjo voziščne konstrukcije in je stabilizacijska mešanica dosegla zahtevano enoosno tlačno trdnost (praviloma najmanj 7 dni po njeni vgraditvi). Na cestah z

lahko prometno obremenitvijo je mogoče pripustiti javni promet na voziščno konstrukcijo z nosilno plastjo, stabilizirano s hidravličnim vezivom, takoj, ko je takšna nosilna plast nadgrajena z ustrezno plastjo asfaltne zmesi.

#### 4.1.2 Proizvodnja stabiliziranih zmesi z organskimi (bitumenskimi) vezivi

##### 4.1.2.1 Pridobivanje zmesi kamnitih zrn in veziv

Zmes kamnitih zrn za vezane spodnje nosilne plasti mora biti pridobljena na način, da je zagotovljena njena konstantna in sledljiva kakovost (zahteve za lastnosti kamene moke, zahteve za sestavo zmesi zrn peska, zahteve za lastnosti zmesi peska, zahteve za odpornost zmesi kamnitih zrn proti drobljenju in obrabi, zahteve za lastnosti zmesi kamnitih zrn drobirja in proda, zahtevane lastnosti zmesi naravnih zrn prodca, območja presejkov zmesi kamnitih zrn za različne vrste asfaltnih zmesi za vezane spodnje nosilne plasti ter zahteve za bitumensko vezivo).

##### 4.1.2.2. Bitumenska veziva

Kakovost cestogradbenih bitumnov mora ustrezati zahtevam standarda SIST EN 12951. Uporabnost posameznega tipa standardiziranega cestogradbenega bitumna je v odvisnosti od skupine prometne obremenitve in vrste bituminizirane zmesi določeni v razpredelnici 6.

Razpredelnica 6: Uporabnost vrst cestogradbenega bitumna v bituminiziranih zmesih za vezane spodnje nosilne plasti v odvisnosti od prometne obremenitve

Skupina prometne obremenitve	Tip veziva			
	B 50/70	B 70/100	B 100/150	B 160/220
izredno težka, zelo težka	+	-	-	-
težka, srednja	+	+	-	-
lahka, zelo lahka	-	+	+	+

#### 4.1.2.2.1 Skladiščenje veziva

Za skladiščenje bituminoznih veziv, ki jih uporabljamo v proizvodnji bituminiziranih zmesi, morajo biti izpolnjeni naslednji pogoji:

- za vsako vrsto veziva, ki je predvideno za uporabo, mora biti dovolj zmogljivosti za skladiščenje, ki bodo omogočile neprekinjeno proizvodnjo določene vrste bituminizirane zmesi
- vse cisterne za vezivo morajo biti opremljene z napravami za posredno segrevanje v času skladiščenja, ki morajo zagotoviti vrsti bitumna primerno temperaturo skladiščenja
- vse cisterne morajo biti opremljene s termometri
- vse dovodne in razvodne cevi za bitumen morajo biti ustrezno ogrevane

Cisterne za skladiščenje bitumenskega veziva morajo biti opremljene z napravami za posredno segrevanje in s termometrom. Najvišje dovoljene temperature cestogradbenega bitumna v cisterni so prikazane v spodnji razpredelnici (razpredelnica 7).

V primeru uporabe sestavljenega ali modificiranega bitumenskega veziva je treba upoštevati najvišjo dovoljeno temperaturo skladiščenja po navodilih proizvajalca.

Razpredelnica 7: Dovoljene temperature cestogradbenega bitumna v cisterni

Vrsta bitumna	Temperatura bitumna v cisterni
B 50/70	150 <sup>0</sup> C do največ 170 <sup>0</sup> C
B 70/100	140 <sup>0</sup> C do največ 160 <sup>0</sup> C
B 100/150	135 <sup>0</sup> C do največ 155 <sup>0</sup> C
B 160/220	130 <sup>0</sup> C do največ 150 <sup>0</sup> C

Bituminizirane zmesi za vezane spodnje nosilne plasti morajo biti proizvedene praviloma po vročem postopku. Temperatura mešanja zmesi zavisi od vrste uporabljenega veziva.

Priporočene in mejne temperature asfaltne zmesi pri proizvodnji v odvisnosti od vrste uporabljenega bituminiziranega veziva so navedene v razpredelnici 8.

Razpredelnica 8: Temperatura proizvedene bituminizirane zmesi v odvisnosti od vrste uporabljenega bitumenskega veziva

Vrsta bitumna	Temperatura proizvedene bituminizirane zmesi (° C)	
	priporočena	največ
B 50/70	160 ± 10	180
B 70/100	150 ± 10	175
B 100/150	145 ± 10	170
B 160/220	140 ± 10	165

#### 4.1.2.3 Proizvodnja bituminiziranih zmesi

Za proizvodnjo bituminizirane zmesi je treba praviloma uporabiti mešalne naprave s šaržnim postopkom, pri katerem mora biti s tehtanjem zagotovljena točna odmera količine frakcij kamene moke, vročih frakcij kamnitih zrn in bitumenskega veziva. Bitumensko vezivo je dovoljeno odmerjati tudi po prostornini, pri čemer je potrebno upoštevati spremembo prostornine (in s tem prostorske mase) s temperaturo.

Mešalne naprave s kontinuiranim načinom mešanja (bobenske mešalnike) je dovoljeno uporabiti za proizvodnjo bituminiziranih zmesi za vezane spodnje nosilne plasti, če se pri dokazni proizvodnji doseže skladnost kakovosti proizvedene zmesi z zahtevano.

Čas mešanja in drugi vplivi na kakovost obvijanja zrn oz. razdelitev veziva v zmesi morajo biti tako naravnani, da je zagotovljena homogena bituminizirana zmes.

Proizvodne zmogljivosti mešalne naprave, transportnih sredstev ter vgrajevalne mehanizacije morajo biti medsebojno usklajene.

#### 4.1.2.4 Navoz bituminiziranih zmesi

Bituminizirano zmes se na ustrezno pripravljen planum podlage (ne sme biti prašen ali vlažen) lahko prične nanašati le z odobritvijo inženirja. V ta namen je potrebno za prevoz uporabljati ustrezna vozila – prekucnike, opremljene za zvrčanje nazaj (v razdelilnik) ter s primerno zaščito bituminizirane zmesi pred padavinami, ohlajevanjem in onesnaženjem. Notranjo površino (stranice in dno) kovinskih kesonov tovornih vozil je treba praviloma pred natovarjanjem asfaltne zmesi pobrizgati s sredstvom za preprečitev zlepljenja, ki ne deluje škodljivo na asfaltno zmes.

Število vozil za prevoz bituminizirane zmesi na gradbišče mora biti prilagojeno pogojem enakomernega vgrajevanja glede na razdaljo prevoza.

#### 4.1.2.5 Vgrajevanje bituminiziranih zmesi

Vgrajevanje bituminiziranih zmesi za vezane spodnje nosilne plasti mora biti praviloma s finišejem, ki poleg razprostiranja izvrši tudi delno zgostitev zmesi. Stopnja zgostitve, ki jo finišeer (razdelilnik zmesi) mora doseči, je najmanj 85 % referenčne gostote laboratorijskega preizkušanca.

Bituminizirano zmes je dovoljeno vgrajevati samo v ustreznih vremenskih razmerah. Temperatura zraka in podlage mora biti najmanj 0<sup>0</sup> C. Izjemoma je dovoljena vgradnja zmesi na suho in nezamrznjeno podlago v nevetrovnem vremenu pri temperaturah do – 3<sup>0</sup> C. Najnižja in optimalna temperatura bituminizirane zmesi na mestu vgrajevanja sta glede na vrsto uporabljenega veziva opredeljeni v razpredelnici 9.

Če dopuščajo pogoji dela, je treba vgrajevati bituminizirano zmes za vezane spodnje nosilne plasti naenkrat v vsej širini vozišča. Če se uporablja za vgraditev več finišejev z zamikom, razlika v kakovosti vgrajene asfaltne zmesi na območju stika ne sme biti opazna.

Pri vgrajevanju bituminizirane zmesi v več slojih morajo biti vzdolžni stiki med seboj zamaknjeni najmanj za 10 cm, prečni (delovni) stiki pa najmanj za 50 cm.

Razpredelnica 9: Optimalna in najnižja temperatura bituminizirane zmesi pri vgradnji

<b>Vrsta bitumna</b>	<b>Priporočena temperatura bituminizirane zmesi pri vgradnji (<sup>0</sup> C)</b>	<b>Najnižja temperatura bituminizirane zmesi za vgrajevalnim strojem (<sup>0</sup> C)</b>
B 50/70	150 ± 10	130
B 70/100	140 ± 10	120
B 100/150	135 ± 10	115
B 160/220	130 ± 10	110

Na avtocestah in cestah s težkim prometom je potrebno vgrajevane pasove v vzdolžni smeri stikovati praviloma po vročem postopku. Pri izdelavi vzdolžnih in prečnih stikov je potrebno površine ohlajene plasti premazati z bitumensko emulzijo ali drugo ustrezno bitumensko zmesjo v količini najmanj 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Premazati je potrebno tudi območje stika v širini 15 cm.

Za zgostitev bituminizirane zmesi je mogoče uporabljati valjarje različnih tipov (statične, vibracijske, valjarje z gumijasti kolesi, kombinirane) in različnih mas. Valjarji morajo imeti vgrajen sistem za močenje koles z vodo ali drugim ustreznim sredstvom za preprečitev lepljenja zmesi na kolesa. Uporaba naftnih derivatov za močenje koles ni dovoljena.

Izbrana vrsta valjarjev in način zgoščevanja morata zagotoviti čimbolj enakomerno zahtevano gostoto oziroma zgoščenost zmesi v vsej projektirani širini vozišča.

Bituminizirano zmes je treba zgoščevati od roba proti sredini plasti in od nižjega proti višjemu robu plasti. Posamezni prehodi valjarjev se morajo prekrivati za 15-20 cm. Vsako zadrževanje valjarjev na vroči plasti je treba preprečiti, enako tudi sunkovito zaviranje in pospeševanje valjarja ter spremembo smeri valjarja na še nezgoščeni plasti.

Na vgrajeno plast bituminizirane zmesi za vezano spodnjo nosilno plast je mogoče pripustiti promet šele, ko se je zmes ohladila na približno 20<sup>0</sup> – 30<sup>0</sup> C.

## 5 OPTIMIRANJE SESTAVE

### 5.1 Uvod

Družba za AC v RS je 25.07.2002 sklenila pogodbo za začetek gradnje na odseku HC Razdrto-Vipava (Rebrnice) za pogodbeno vrednost 4,4 milijarde tolarjev. Gradili bosta podjetji Primorje d.d. (vodilni partner) in SCT d.d. Pogodbeni rok za izvedbo gradbenih del je 20 mesecev od uvedbe izvajalca v dela. Na odseku HC Razdrto-Vipava (Rebrnice), dolgem 10,6 km, bo promet predvidoma stekel v letu 2007.

Pri gradnji takih prometno bolj obremenjenih voziščnih konstrukcij je predvidena izvedba spodnje vezane nosilne plasti stabilizirane s hidravličnimi vezivi. Glavni problem je navadno *dovolj natančno doziranje in zadostna homogenizacija majhnih količin veziv*. Posledice se namreč odražajo v velikih nihanjih rezultatov tlačnih trdnosti in posledično poškodb voziščne konstrukcije, ki se pri previsokih trdnostih odražajo kot razpoke v voziščni konstrukciji, pri prenizkih tlačnih trdnostih pa vezana nosilna plast ne more v celoti izpolniti svoje funkcije. Rešitev problema naj bi bila v ustrežnejšem hidravličnem vezivu nižjega trdnostnega razreda, ki bi omogočalo večje dozacije in posledično boljšo homogenizacijo mešanice.

Preskusi cementne stabilizacije so zaradi specifičnosti materiala dokaj zahtevna. Že manjše razlike pri pripravah preskušancev ter pri izvedbi preskusov lahko bistveno vplivajo na rezultate preskusov. Primerljivost rezultatov na tem področju pa še dodatno zmanjša pomanjkljiva tehnična regulativa, zato je uvedba tehničnih specifikacij v RS dobra osnova za poenotenje postopkov. V veliko pomoč mi je bila najnovejša tehnična specifikacija TSC 06.320: 2004 – Vezane spodnje nosilne plasti s hidravličnimi vezivi.

Za izdelavo poskusnih mešanic smo uporabili hidravlična veziva proizvajalca Salonit Anhovo d.d in zmesi zrn iz kamnoloma Laže.

### 5.2 Cilji

Glavni cilj je bil določiti oziroma poiskati ustrežnejše hidravlično vezivo za izvedbo spodnje



vezane nosilne plasti, kot je trenutno v uporabi. Pri izvedbi s cementom stabiliziranih spodnjih nosilnih plasti voziščne konstrukcije se v praksi srečujemo z sledečimi problemi:

- prej uporabljeni tehnološki postopki ne omogočajo natančnega doziranja veziva, kar je ob uporabi visokoaktivnega cementa vzrok velikim raztrosom rezultatov
- v veljavnih predpisih ni natančno definiran način izdelave recepture ter način izdelave preskušancev
- v strokovni javnosti ni enotnega mnenja, pri kateri starosti se cementno stabilizacijo lahko nadgradi z vročo asfaltno plastjo
- v praksi opazamo, da se na vgrajeni cementni stabilizaciji pojavljajo razpoke, ki so posledica krčenja (včasih se razpoke kažejo tudi na asfaltnih plasteh)

### 5.3 Metode dela

Pri izdelavi preskušancev, izvedbi preskusov in vrednotenju dobljenih rezultatov smo se opirali predvsem oziroma izključno na regulativo TSC 06.320 : 2004.

Preskušance za določitev tlačnih trdnosti smo izdelali po postopku opisanem v tej regulativi. Imeli so obliko valja s premerom in višino 15 cm in so bili izdelani v kalupih v treh plasteh s po 75 udarci bata mase 45 kg, ki je padal z višine 450 mm. Pripravljeni so bili z optimalno količino vode ter zgoščeni do povprečno 100 %-ne in najmanj 97 %-ne zgoščenosti. Po razkalupljenju so bili do preskusa 7 dni hranjeni v vlažni komori (s 100 %-no vlago) in na temperaturi približno 20<sup>0</sup> C.

Tlačna trdnost vseh preskušancev je bila določena na precizni vretenski stiskalnici s konstantno hitrostjo pomika 1,27 mm/min ter kontinuiranim beleženjem sile in pomika glave stiskalnice. Povprečna enoosna tlačna trdnost treh preskušancev, pripravljenih z enako količino hidravličnega veziva za določitev predhodne sestave stabilizacijskih mešanic, mora praviloma po 7. dneh znašati 3,5 MN/m<sup>2</sup>, najmanjša posamična vrednost 2,5 MN/m<sup>2</sup>, priporočena največja vrednost pa ne več kot 4,5 MN/m<sup>2</sup>.

## **5.4 Analize in rezultati**

### **5.4.1 Izbira optimalnega hidravličnega veziva za stabiliziranje nosilnih plasti VK**

#### **5.4.1.1 Veziva**

##### **5.4.1.1.1 Splošno**

Pri izvedbi cementne stabilizacije je zaželeno, da je delež veziva v mešanici sorazmerno velik. To omogoča dobro homogenost stabiliziranih plasti tako glede mehanskih, kakor tudi materialnih in kemijskih karakteristik. Po drugi strani pa mora vezivo zagotavljati tudi primerno obstojnost cementne stabilizacije in posledično dovolj dolgo uporabnost in primerno kakovost vozišča. Glede na to smo izbrali za preizkus dvoje različnih vrst veziv nižjih trdnostnih razredov, ki nam omogočata relativno velik delež v mešanici.

V dosedanji praksi proizvodnje cementne stabilizacije je najpogosteje uporabljeno vezivo cement trdnostnega razreda 32,5, ki ima v svoji sestavi poleg klinkerja še večje količine pucolanskih materialov (Salodur). Zato smo za izhodišče primerjav vzeli cement Salodur, s katerim imamo izkušnje pri stabilizaciji in veliko število podatkov iz preteklih aplikacij.

Za primerjavo smo uporabili še zidarski cement Maltit, ki je zanimiv prav zaradi svoje nizke marke 5 MPa, saj je logično, da omogoča najvišji delež veziva in posledično najbolj homogeno porazdelitev veziva v mešanici.

Sicer Maltit ne spada med klasične cemente definirane v standardu SIST EN 197-1, temveč spada med zidarske cemente, ki so opredeljeni s standardom SIST EN 413-1. Maltit se od drugih veziv razlikuje po tem, da vsebuje aerant, kar omogoča pripravo zmrzlinso odpornih malt in hkrati zniža gostoto malt. Glavna prednost pred ostalimi vezivi je možnost večjega vnosa veziva, ne da bi pri tem dosegli pretirano visoke trdnosti. Poleg tega je bistvena razlika v tem, da je velik del maltita praktično hidravlično neaktiven in ima bolj funkcijo polnila. S tem pa omogočimo več finih delcev v sestavi, kar ugodno vpliva na vgradljivost ter mehanske karakteristike cementne stabilizacije.

Ob primerjavi Maltita s Salodurjem, ki se sicer trenutno najpogosteje uporablja za proizvodnjo cementne stabilizacije, lahko rečemo, da se vezivi razlikujeta tudi v samem razvoju trdnosti, in sicer je Salodur počasnejši, saj gre za cement z nizko toploto hidratacije. Po drugi strani pa to pomeni, da lahko pri Salodurju pričakujemo kljub nizkim zgodnjim trdnostim relativno visoke končne trdnosti.

Poleg mehanskih karakteristik vgrajene cementne stabilizacije je zelo pomembna tudi obstojnost. Ni namreč dovolj, da izdelamo mehansko ustrezno konstrukcijo z izpolnjenimi zahtevami za trdnost. Seveda je pogosto težko z laboratorijskimi testi pravilno oceniti, kakšne bodo spremembe mešanice med uporabo, saj je to pogojeno tako s samim vezivom, kakovostjo uporabljenih zmesi zrn, načinom izvedbe cementne stabilizacije, kakor tudi z razmerami, ki jim je material med uporabo izpostavljen.

Na tem mestu velja izpostaviti tudi, da je za trajnost konstrukcije vezivo sicer pomembno, da pa je funkcija veziva odvisna od številnih dejavnikov. Gre namreč za interakcije med vezivom in kamnitimi zrnji ter pogoji vgradnje in nenazadnje za interakcije veziva s pogoji med uporabo.

#### 5.4.1.1.2 Lastnosti uporabljenih veziv

Vsi preskusi uporabljenih veziv so bili opravljeni v laboratoriju Salonit Anhovo d.d. V razpredelnici 10 podajamo nekaj mehanskih karakteristik uporabljenih veziv.

Razpredelnica 10: Mehanske karakteristike veziv

Vrste veziva	Ostanek na situ 90 µm	Standardna konsistenca	Vezanje (minut)		Upogibna trdnost (MPa)		Tlačna trdnost (MPa)	
	(m.-%)	(m.-%)	pričetek	konec	7 dni	28 dni	7 dni	28 dni
Salodur	6,5	29,8	200	240	4,4	7	22,4	39,9
Maltit	3,35	29,8	165	260	1,7	2,4	5,8	12,4

#### 5.4.1.1.2.1 Salodur

Salodur<sup>®</sup> je mešani cement (CEM V) z dodatkom žindre in drugega mineralnega dodatka trdnostnega razreda 32,5 z nizko toploto hidratacije (LH – low heat). Skladen je s standardom SIST 1022 Cement z nizko toploto hidratacije – Sestava, zahteve in merila skladnosti.

#### Sestava cementa Salodur:

- minimalno 40 % portlandskega cementnega klinkerja
- maksimalno 30 % granulirane plavžne žindre
- maksimalno 30 % naravnega pucolana
- regulator vezanja – sadra

#### Lastnosti (karakteristike) cementa Salodur:

Cement Salodur<sup>®</sup> ustreza zahtevam standarda SIST 1022. Vse ostale zahteve, ki jih ta standard ne določa, pa so navedene v standardu SIST EN 197-1.

Razpredelnica 11: Karakteristike cementa Salodur<sup>®</sup>

	Zahteve standarda	Dosežene povprečne vrednosti
<b>Kemijske zahteve</b>		
Vsebnost sulfata (kot SO <sub>3</sub> )	≤ 3,5 %	< 2,5 %
Vsebnost klorida	≤ 0,1 %	< 0,07 %
<b>Mehanske in fizikalne zahteve</b>		
Zgodnja trdnost, 7 dni	≥ 12,0 MPa	> 18,0 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	32,5 – 52,5 MPa	> 39,0 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 75 min	> 200 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 mm	< 1 mm
Toplota hidratacije po 7 dneh	≤ 250 J/g	< 240 J/g

Dosežene vrednosti podajajo mejo, nad oziroma pod katero ležijo povprečne vrednosti posameznih karakteristik tega cementa in so podane na osnovi vrednotenja rezultatov notranjega kontrolnega preskušanja.

### **Področja uporabe**

Zaradi svoje lastnosti, da pri hidrataciji sprošča manj toplote, je primeren:

- za izdelavo masivnih betonov za konstrukcije z debelimi stenami (pregrade, temelji, drugi objekti, kjer se pojavlja masivni beton (uveljavljen je predvsem v hidrogradnji) in
- za vse namene v gradbeništvu, kjer je priporočljiva uporaba cementov nižjega trdnostnega razreda

#### **5.4.1.1.2.2 Maltit**

Maltit<sup>®</sup> je hidravlično vezivo (aeriran zidarski cement trdnostnega razreda 5 z dodanim sredstvom za aeriranje), pripravljeno z izborom najboljših surovin, kateremu je potrebno dodati le še pesek in vodo. Vezivo je skladno s standardom za zidarske cemente SIST EN 413-1.

#### **Sestava Maltita:**

- minimalno 25 % portlandskega cementnega klinkerja
- maksimalno 70 % mešanega mineralnega dodatka
- regulator vezanja - sadra
- kemični dodatki za aeriranje

#### **Področja uporabe:**

Maltit je primeren za hitro in enostavno pripravo zmrzlinško odpornih malt za zidanje in ometavanje zaradi odličnih mehanskih lastnosti. Še posebej je primeren za izdelavo zunanjih in notranjih grobih in finih ometov.

### Lastnosti (karakteristike) Maltita:

Razpredelnica 12: Karakteristike Maltita<sup>®</sup>

	Zahteve standarda	Dosežene povprečne vrednosti
<b>Kemijske in fizikalne zahteve</b>		
Vsebnost sulfata (kot SO <sub>3</sub> )	< 2,0 %	1,7 %
Vsebnost zraka	≥ 8 % ≤ 22 %	12 % - 14 %
Tlačna trdnost 28 dni	5 MPa – 15 MPa	8 MPa

Dosežene povprečne vrednosti za posamezne karakteristike so podane na osnovi povprečnih letnih rezultatov notranjega kontrolnega preskušanja.

#### 5.4.1.1.3 Skladnost veziv s TSC 06.320 : 2004

Obe uporabljeni vezivi zadoščata zahtevam za vezivo iz razpredelnice 2: Zahtevane lastnosti cementa za stabiliziranje zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti v TSC 06.320 : 2004. Glede sestave veziv TSC 06.320 : 2004 v točki 4.2.2 Hidravlična veziva sicer poda predvideno najprimernejše vezivo (predvsem cementi, čisti portlandski cement, portlandski cement z dodatkom pucolana in metalurški cement), dopušča pa tudi možnost uporabe sestavljenih veziv (npr. 2/3 osnovni cement in 1/3 EFP (elektrofiltrski pepel) ali 1/3 osnovni cement in 2/3 EFP).

#### 5.4.1.2 Uporabljene zmesi zrn

Cementna stabilizacija se običajno proizvaja iz zmesi zrn, ki vsebujejo bistveno več neugodnih drobnih zrn in ostalih nečistoč, kot jih vsebujejo zmesi zrn za proizvodnjo klasičnih betonov. Predvsem pa je teh nečistoč relativno veliko glede na majhne deleže veziva v mešanicah in zato lahko pomembno vplivajo tako na strukturo samega cementnega veziva,

kakor tudi na stik veziva in agregata. Zato je pri nečistih zmesih zrn pomembno predvideti, da bo funkcija veziva zelo odvisna tako od vrste, kakor tudi od količine nečistoč.

Onesnaženost zmesi zrn lahko vpliva na doseganje mehanskih lastnosti cementne stabilizacije, zelo pa je verjeten tudi vpliv na obstojnost konstrukcije. Zato se je potrebno zavedati, da je pri vezivih, ki se uporabljajo za proizvodnjo cementne stabilizacije, delovanje veziva odvisno od prisotnosti nečistoč in tudi od drugih faktorjev.

Za izdelavo laboratorijske mešanice smo uporabili:

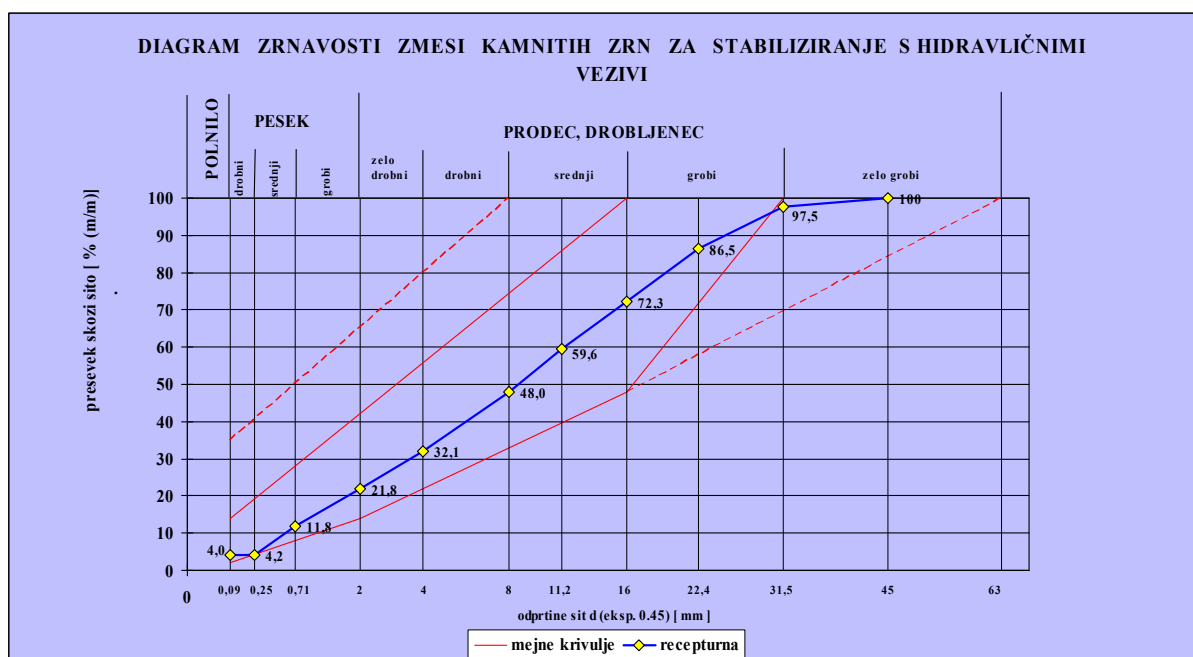
- dolomitni tamponski drobljenec 0/32 mm, proizveden v kamolomu Laže, Primorje d.d.
- mešani cement Salodur, proizvajalec Salonit Anhovo d.d.
- zidarski cement Maltit, proizvajalec Salonit Anhovo d.d.

#### **5.4.1.2.1 Zrnastostne karakteristike zmesi zrn**

Uporabljeni tamponski drobljenec iz kamnoloma Laže je dobro zrnata zmes zrn, ki v celoti izpolnjuje vse zrnastostne parametre za nevezane kakor tudi za spodnje vezane nosilne plasti, predpisane v PTP SCS (posebnih tehničnih predpisih). Zrnastostna sestava zmesi zrn je razvidna iz grafikona 1.

V grafikonu 1 so prikazane mejne zrnastostne linije, ki jih za zmesi za proizvodnjo cementne stabilizacije predpisuje TSC 06.320 : 2004 in zrnastostna sestava uporabljene zmesi zrn. V praksi se za nevezane in spodnje vezane nosilne plasti voziščnih konstrukcij uporablja enaka zmes zrn.

Delež nadmernih zrn je 2,5 %, največja korigirana prostorninska gostota suhega materiala znaša  $\rho_{d,max} = 2233 \text{ kg/m}^3$  in optimalni korigirani delež vode v materialu  $w_{opt} = 4,9 \%$ .



Grafikon 1: Zrnavostna sestava uporabljene zmesi zrn iz kamnoloma Laže in območje sestave zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti, stabilizirane s hidravličnimi vezivi

#### 5.4.1.3 Določitev optimalnega veziva na osnovi tlačnih trdnosti cementne stabilizacije

Z izbranimi hidravličnima vezivoma Salodur in Maltit smo pripravili preskušance za določitev tlačnih trdnosti pri starosti 7 dni. S posameznim vezivom smo izdelali po predpisih zahtevane minimalno tri mešanice z različnimi deleži veziva, vendar smo jih zaradi večje natančnosti in primerljivosti rezultatov pripravili po pet za obe vrsti veziva. Iz vsake mešanice smo izdelali po tri preskušance, od katerih smo pri vrednotenju upoštevali povprečne vrednosti.

Z vezivom Salodur smo preskušali tlačne trdnosti vzorcev dvakrat in sicer zaradi pomanjkanja števila kalupov v časovnem razmaku 11 dni, tako da je bila mešanica z petimi različnimi deleži veziva pod oznako Salodur A pripravljena med 05.05.2005 in 09.05.2005, mešanice z oznako Salodur B pa 11 dni kasneje, to je med 16.05.2005. in 18.05.2005. Mešanica z vezivom Maltit pa je bila pripravljena samo enkrat in sicer med 28.6.2005. in 30.06.2005.

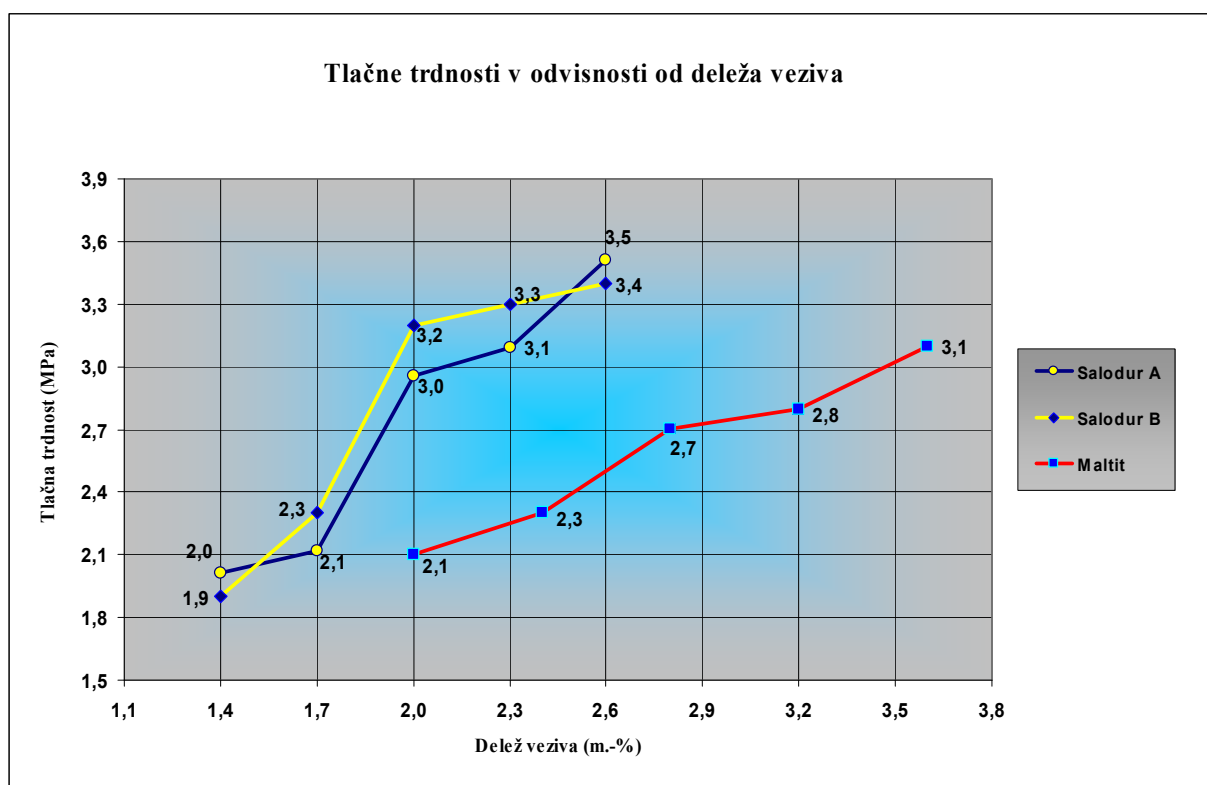


Vsega skupaj imamo torej dvoje različnih vrst veziv, dvakrat Salodur (Salodur A in Salodur B) in enkrat Maltit s po petimi različnimi deleži veziva.

Razpredelnica 13: Tlačne trdnosti preskušancev pri starosti 7 dni

Vrsta veziva	Delež veziva (m.-m.-%)	Tlačna trdnost (MPa) – povprečne vrednosti treh preskušancev
Salodur A	1,4	1,9
	1,7	2,3
	2,0	3,2
	2,3	3,3
	2,6	3,4
Salodur B	1,4	2,0
	1,7	2,1
	2,0	3,0
	2,3	3,1
	2,6	3,5
Maltit	2,0	2,1
	2,4	2,3
	2,8	2,7
	3,2	2,8
	3,6	3,1

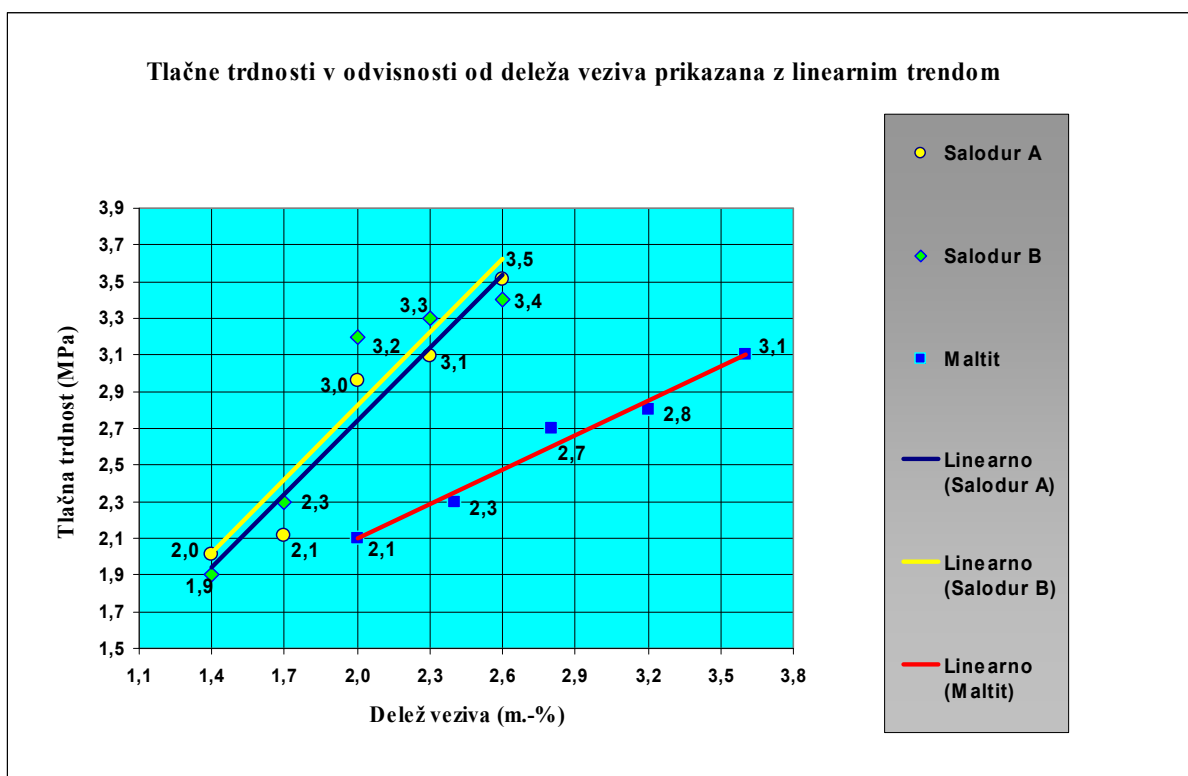
Tlačne trdnosti preskušancev smo v prvi fazi določali samo pri starosti 7 dni in po postopkih predvidenih v TSC 06.320 : 2004. Valje, hranjene v vlažni komori, smo štiri ure pred preskusom potopili v vodo. Preskus tlačne trdnosti smo vršili s precizno vretensko stiskalnico pri enakomerni hitrosti deformacije 1,27 mm/min. Rezultate tlačnih trdnosti preskušancev pri starosti 7 dni so prikazani v razpredelnici 13, grafični prikaz odvisnosti tlačne trdnosti cementne stabilizacije od deleža veziva pa so prikazani v grafikonu 2. Prikazani rezultati tlačnih trdnosti so povprečne vrednosti tlačne trdnosti treh preskušancev.



Grafikon 2: Odvisnost tlačne trdnosti cementne stabilizacije od deleža veziva pri starosti 7 dni  
(uporabljen tamponski drobljenec 0/32 mm iz kamnoloma Laže)

Vezivo Maltit je bilo uporabljeno kot testno vezivo šele naknadno, ker smo že od vsega začetka vedeli, da bomo za stabiliziranje kamnitih zrn uporabili hidravlično vezivo CEM V/A (S-P) 32,5 N – LH z dodatno oznako Salodur. Problem je bil samo določiti optimalno količino veziva na osnovi tlačnih trdnosti. Glede na dobljene rezultate in zahteve po TSC 06.320 : 2004, da mora povprečna tlačna trdnost treh preskušancev oblike valja po 7. dneh znašati praviloma 3,5 MPa, najmanjša posamična vrednost 2,5 MPa in priporočena največja vrednost ne sme presegati 4,5 MPa, smo se odločili za uporabo mešanice drobljenca 0/32 mm z deležem cementa Salodurja 2,0 %. Pri 2,0 % veziva je raztros rezultatov tudi najmanjši.

Na sliki 22 vidimo tri preskušance z dne 05.05.2005 z istim deležem veziva Salodur A mešanice.



Grafikon 3: Odvisnost tlačne trdnosti cementne stabilizacije od deleža veziva pri starosti 7 dni  
(linearni trend)



Slika 22: Preskušanci za določanje tlačnih trdnosti mešanice

Razpredelnica 14: Primer računanja tlačnih trdnosti

SALODUR B (predhodna mešanica) Delež veziva (%)	Valj = G <sub>V</sub> (g)	Valj + vzorec = G <sub>1</sub> (g)	Mokra masa vzorca = G <sub>w</sub> (g)	Volumen valja = V (cm <sup>3</sup> )	Mokra prost. masa = ρ <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Suha prost. masa = ρ <sub>d</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Porušitvena sila = F (kN)	Tlačne trdnosti p (MPa) - 7 dni
2,0 %	4026	10281	6255	2760	2266	2162	58,7	3,2

PODATKI:

- ❖ valj + vzorec (vlažen material): G<sub>1</sub> = 10281 g
- ❖ valj: G<sub>V</sub> = 4026 g
- ❖ porušitvena sila: F = 58,7 kN
- ❖ delež vode v materialu: w = 4,8 %

OP.: valj naj bi imel sicer premer in višino 15 cm, vendar smo z kljunastim merilom dobili rezultat 15,2 cm, zato sta vrednosti prostornine V in osnovne ploskve valja S izračunani po sledečih enačbah:

$$V = o \cdot v = \pi \cdot r^2 \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad [cm^3] \quad (10)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad [cm^2] \quad (11)$$

- najprej izračunamo mokro maso vzorca (maso vlažnega materiala) G<sub>w</sub>:

$$G_w = G_1 - G_V = 10281 \text{ g} - 4026 \text{ g} = 6255 \text{ g}$$

- volumen valja V in osnovna ploskev S:

$$V = \frac{\pi \cdot 15,2^3}{4} = 2758,17 \text{ cm}^3 \approx 2760 \text{ cm}^3 \quad \text{in} \quad S = \frac{\pi \cdot 15,2^2}{4} = 181,4 \text{ cm}^2$$

- prostorninska gostota vlažnega materiala ρ<sub>w</sub> se izračuna po naslednji formuli:

$$\rho_w = \frac{G_w}{V} \quad [kg / m^3] \quad (12)$$

$$\rho_w = \frac{6255g}{2760cm^3} = 2,266 \frac{g}{cm^3} = 2266 \frac{kg}{m^3}$$

- suho prostorninsko maso  $\rho_d$  pa določimo po enačbi :

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + \frac{w}{100}} \quad [kg / m^3] \quad (13)$$

$$\rho_d = \left( \frac{2266}{1 + \frac{4,8}{100}} \right) \frac{kg}{m^3} = 2162 \frac{kg}{m^3}$$

- glede na odčitano porušitveno silo  $F$  določimo tlačno trdnost  $p$  vzorca po enačbi:

$$p = \frac{F}{S} \quad [N / mm^2 = MPa] \quad (14)$$

$$p = \frac{58,7kN}{181,4 \cdot 10^{-4} m^2} = 3236kPa = 3,2MPa$$

---

Razpredelnica 15: Izbrani optimalni delež veziva

Vrsta veziva	Delež veziva
Salodur	2,0 % (45 kg/m <sup>3</sup> )
Maltit	2,8 % (63 kg/m <sup>3</sup> )

Kriterij za izbiro optimalnega deleža posameznega veziva je bila pričakovana tlačna trdnost 3,5 MPa pri starosti 28 dni. Najmanjša priporočena količina dodanega hidravličnega veziva za pripravo stabilizacijske mešanice je sicer 50 kg/m<sup>3</sup>, vendar, če je predhodno dokazano enakomerno vmešavanje veziva v zmes kamnitih zrn in je zagotovljena minimalna enoosna tlačna trdnost (2,5 MPa), potem je dopustna tudi uporaba manjše količine hidravličnega veziva (v našem primeru 45 kg/m<sup>3</sup>).

Razpredelnica 16: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Salodur A (7 dni)

SALODUR A (predhodna mešanica) Delež veziva (%)	Valj (g)	Valj + vzorec (g)	Mokra masa vzorca (g)	Volumen valja (cm <sup>3</sup> )	Mokra prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Suha prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Porušitvena sila (kN)	Tlačne trdnosti <i>p</i> (MPa) - 7 dni	$\bar{p}$ (MPa)
1,4 %	4026	10431	6405	2760	2321	2196	32,1	1,8	1,9
1,4 %	3983	10445	6462	2760	2341	2215	39,0	2,1	
1,4 %	4024	10506	6482	2760	2349	2222	34,6	1,9	
1,7 %	4026	10397	6371	2760	2308	2188	45,4	2,5	2,3
1,7 %	3983	10481	6498	2760	2354	2232	38,9	2,1	
1,7 %	4024	10440	6416	2760	2325	2204	43,5	2,4	
2,0 %	4026	10463	6437	2760	2332	2208	55,8	3,1	3,2
2,0 %	3983	10446	6463	2760	2342	2218	61,1	3,4	
2,0 %	4024	10494	6470	2760	2344	2220	56,3	3,1	
2,3 %	4030	10463	6433	2760	2331	2210	57,6	3,2	3,3
2,3 %	3983	10457	6432	2760	2330	2209	59,4	3,3	
2,3 %	4024	10502	6476	2760	2346	2224	59,6	3,3	
2,6 %	4030	10470	6440	2760	2333	2207	60,4	3,3	3,4
2,6 %	4025	10588	6563	2760	2378	2250	59,1	3,3	
2,6 %	4026	10596	6570	2760	2380	2252	66,7	3,7	

Opomba: Vzorci hranjeni v vlagi in pred preiskavo namakani v vodi 4 ure ( $A = 181,4 \text{ cm}^2$ )

Razpredelnica 17: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Salodur B (7dni)

<b>SALODUR B</b> (predhodna mešanica) Delež veziva (%)	Valj (g)	Valj + vzorec (g)	Mokra masa vzorca (g)	Volumen valja (cm <sup>3</sup> )	Mokra prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Suha prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Porušitvena sila (kN)	Tlačne trdnosti <i>p</i> (MPa) - 7 dni	$\bar{p}$ (MPa)
1,4 %	4030	10444	6414	2760	2324	2211	35,6	2,0	2,0
1,4 %	4025	10353	6328	2760	2293	2182	40,0	2,2	
1,4 %	4026	10319	6293	2760	2280	2170	33,9	1,9	
1,7 %	4030	10277	6247	2760	2263	2157	37,1	2,0	2,1
1,7 %	4025	10210	6185	2760	2241	2136	41,7	2,3	
1,7 %	4026	10250	6224	2760	2255	2150	36,4	2,0	
2,0 %	4026	10281	6255	2760	2266	2162	58,7	3,2	3,0
2,0 %	3983	10249	6266	2760	2270	2166	52,3	2,9	
2,0 %	4024	10265	6241	2760	2261	2157	49,9	2,8	
2,3 %	4026	10350	6324	2760	2291	2182	55,4	3,1	3,1
2,3 %	3983	10343	6360	2760	2304	2194	60,3	3,3	
2,3 %	4024	10351	6327	2760	2292	2183	52,7	2,9	
2,6 %	4026	10528	6502	2760	2356	2248	70,8	3,9	3,5
2,6 %	3983	10485	6502	2760	2356	2248	62,8	3,5	
2,6 %	4024	10529	6505	2760	2357	2249	57,5	3,2	

Opomba: Vzorci hranjeni v vlagi in pred preiskavo namakani v vodi 4 ure ( $A = 181,4 \text{ cm}^2$ )

Razpredelnica 18: Izbrani optimalni delež veziva

Vrsta veziva	Delež veziva	Tlačna trdnost (MPa)	
		7 dni	28 dni
Salodur	2,0 %	3,1	3,7
Maltit	2,8 %	2,7	3,3

**Komentar rezultatov:**

Na osnovi dobljenih rezultatov tlačnih trdnosti lahko zaključimo:

- razlike med potrebnimi deleži veziv za primerljivo tlačno trdnost mešanice so znatne
- časovni prirastek tlačne trdnosti med obravnavanimi vezivi je primerljiv

Razpredelnica 19: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Salodur (28 dni)

SALODUR (predhodna mešanica) Delež veziva (%)	Valj (g)	Valj + vzorec (g)	Mokra masa vzorca (g)	Volumen valja (cm <sup>3</sup> )	Mokra prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Suha prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Porušitvena sila (kN)	Tlačne trdnosti <i>p</i> (MPa) - 28 dni	$\bar{p}_{28}$ (MPa)
1,4 %	4025	10431	6406	2760	2321	2205	52,9	2,9	2,9
1,4 %	3983	10445	6462	2760	2341	2224	56,3	3,1	
1,4 %	4024	10480	6456	2760	2339	2222	48,5	2,7	
1,7 %	4026	10449	6423	2760	2327	2215	55,1	3,0	3,2
1,7 %	4025	10481	6456	2760	2339	2227	56,2	3,1	
1,7 %	4024	10440	6416	2760	2325	2213	63,4	3,5	
2,0 %	4030	10501	6471	2760	2345	2230	70,2	3,9	3,7
2,0 %	3983	10466	6483	2760	2349	2234	67,0	3,7	
2,0 %	4026	10528	6502	2760	2356	2241	62,6	3,5	
2,3 %	4030	10463	6433	2760	2331	2227	75,6	4,2	4,1
2,3 %	4025	10462	6437	2760	2332	2227	77,5	4,3	
2,3 %	4026	10502	6476	2760	2346	2240	68,6	3,8	
2,6 %	4030	10492	6462	2760	2341	2229	89,4	4,9	4,7
2,6 %	4025	10588	6563	2760	2378	2264	77,8	4,3	
2,6 %	4026	10575	6549	2760	2373	2260	86,6	4,8	

Opomba: Vzorci hranjeni v vlagi in pred preiskavo namakani v vodi 4 ure ( $A = 181,4 \text{ cm}^2$ )



Razpredelnica 20: Rezultati določanja tlačnih trdnosti za Maltit (7 in 28 dni)

<b>MALTIT</b> (predhodna mešanica) <b>Delež veziva</b> (%)	<b>Valj</b> (g)	<b>Valj</b> + <b>vzorec</b> (g)	<b>Mokra</b> <b>masa</b> <b>vzorca</b> (g)	<b>Volumen</b> <b>valja</b> (cm <sup>3</sup> )	<b>Mokra</b> <b>prost.</b> <b>masa</b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Suha</b> <b>prost.</b> <b>masa</b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Porušitvena</b> <b>sila</b> (kN)	<b>Tlačne</b> <b>trdnosti</b> $p_7$ (MPa) - 7 dni	<b>Tlačne</b> <b>trdnosti</b> $p_{28}$ (MPa) - 28 dni
<b>2,0 %</b>	4338	11032	6694	2760	2425	2319	35,9	2,0	-
<b>2,0 %</b>	4369	11020	6651	2760	2410	2305	40,7	<b>2,1</b>	-
<b>2,0 %</b>	4335	11009	6674	2760	2418	2313	45,7	-	<b>2,5</b>
<b>2,4 %</b>	4369	11048	6679	2760	2420	2314	41,2	<b>2,3</b>	-
<b>2,4 %</b>	4389	11068	6679	2760	2420	2314	42,3	2,3	-
<b>2,4 %</b>	4343	11145	6802	2760	2464	2357	57,4	-	<b>3,2</b>
<b>2,8 %</b>	4369	10490	6121	2760	2218	2162	48,4	<b>2,7</b>	-
<b>2,8 %</b>	4389	10565	6176	2760	2238	2182	50,9	2,8	-
<b>2,8 %</b>	4343	10497	6154	2760	2230	2174	48,4	2,7	-
<b>2,8 %</b>	4338	10505	6167	2760	2234	2178	60,2	-	<b>3,3</b>
<b>2,8 %</b>	4369	10607	6238	2760	2260	2203	58,6	-	3,2
<b>2,8 %</b>	4335	10525	6190	2760	2243	2187	61,1	-	3,4
<b>3,2 %</b>	4369	10936	6567	2760	2379	2275	51,5	<b>2,8</b>	-
<b>3,2 %</b>	4389	10987	6598	2760	2391	2287	50,6	2,8	-
<b>3,2 %</b>	4343	10959	6616	2760	2397	2292	63,2	-	<b>3,5</b>
<b>3,6 %</b>	4338	11141	6803	2760	2465	2357	50,4	2,8	-
<b>3,6 %</b>	4369	11060	6691	2760	2424	2318	60,1	3,3	-
<b>3,6 %</b>	4335	11110	6775	2760	2455	2348	70,7	-	<b>3,9</b>

Opomba: Vzorci hranjeni v vlagi in pred preiskavo namakani v vodi 4 ure ( $A = 181,4 \text{ cm}^2$ )

V zadnjih dveh stolpcih so povprečne vrednosti meritev za 7 in 28 dni močnejše poudarjene.

#### 5.4.1.4 Receptura

Na podlagi rezultatov je bila stabilizacijska mešanica pripravljena iz drobljenca 0/32 Laže z dodatkom 2,0 m.-% cementa Salodur. Maksimalna suha prostorninska masa  $\gamma_{d,max}$  drobljenca je znašala po Proctorju 2233 kg/m<sup>3</sup>, optimalna vsebnost vode pa 4,9 %. Za pripravo 1 m<sup>3</sup> mešanice je potrebno uporabiti:

$$m_c = 2m. \div \% \cdot 2233kg = 44,66kg \quad \text{in} \quad m_v = 4,9m. \div \% \cdot 2233kg = 111,65kg$$

Razpredelnica 21: Sestava 1 m<sup>3</sup> stabilizacijske mešanice

Material	Količina
Drobljenec Laže	2233 kg/m <sup>3</sup>
Cement CEM V/A (S-P) 32,5 N – LH – SALODUR Anhovo	45 kg/m <sup>3</sup>
Voda (skupaj z naravno vlago tampona)	112 kg/m <sup>3</sup>

Ob začetku del je bilo izvedeno poskusno polje, kjer je bila zasledovana kakovost vgrajevanja ter dosežene vrednosti tlačnih trdnosti cementne stabilizacije.

#### 5.4.1.5 Kontrola odpornosti mešanice proti vplivom zmrzovanja in tajanja

TSC 06.320 : 2004 ne predpisuje več vremenske obstojnosti. Tlačna trdnost se določa pri starosti 7 dni, vsi preiskušanci pa se pred preskusom potopijo v vodo. TSC pa predpisuje odpornost s hidravličnim vezivom stabilizirane zmesi kamnitih zrn za nosilne plasti voziščnih konstrukcij proti škodljivim vplivom vremena, t.j. proti zmrzovanju in tajanju, vendar samo v primeru:

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

Po zgornjih kriterijih za nobeno od izbranih mešanic cementne stabilizacije ni bilo potrebno preveriti odpornost mešanice proti zmrzovanju in tajanju.

## 5.4.2 Izvedba preskusnega polja cementne stabilizacije

### 5.4.2.1 Splošno

Dne 09.07.05. in 11.07.05. sta bili izdelani preskusni polji za spodnjo vezano nosilno plast cementne stabilizacije na dveh različno velikih poljih (dolžine dveh oz. treh prečnih profilov) trase HC Razdrto – Vipava. Cementna stabilizacija, sestavljena iz tamponskega drobljenca 0/32 mm iz kamnoloma Laže in dodanima 2 m.-% cementa Salodur proizvajalca Salonit Anhovo d.d., je bila proizvedena na pretočni betonarni v obratu Laže, last Primorje d.d.

### 5.4.2.2 Določitev deformacijskega modula $E_v$ s krožno obremenilno ploščo na podlagi

Pojem »nosilnost« nam lahko predstavlja odpornost proti preoblikovanju (notranje trenje in kohezijo materiala), obremenitev, pri kateri zaznamo prve poškodbe ali pa sposobnost raznosa obremenitve. V praksi sta se v cestogradnji uveljavila dva postopka za presojo nosilnosti nevezanih materialov:

- meritve po postopku CBR (California bearing ratio) in
- meritve po postopku s krožno obremenilno ploščo

Slednji postopek se v cestogradbeniški praksi uporablja za določanje modula stisljivosti  $M_E$  po švicarskem postopku in deformacijskih modulov  $E_{v1}$  in  $E_{v2}$  po nemškem postopku. Na trasi HC Razdrto – Vipava smo uporabili postopek s krožno obremenilno ploščo in z njo obremenjevali tamponski drobljenec s stopnjami po 0,05 N/mm<sup>2</sup>. Po 1 minuti smo ploščo razbremenili in posedke skrbno zabeležili. Pri vsaki stopnji obremenitve smo odčitali posedek takoj po obremenitvi in po 1 minuti. Sproti evidentirani podatki nam omogočajo izvrednotenje deformacijskega modula  $E_{v1}$  in  $E_{v2}$  po naslednjih enačbah:

$$E_{v1} = 0,75 \cdot \frac{\Delta p'}{\Delta s'} \cdot D \quad [MN / m^2 = MPa] \quad (15)$$

$$E_{v2} = 0,75 \cdot \frac{\Delta p''}{\Delta s''} \cdot D \quad [MN/m^2 = MPa] \quad (16)$$

Razpredelnica 22: Rezultati meritev posedkov na P 198 vozni pas desno

Obremenitev plošče p (N/mm <sup>2</sup> )	Čas (po min.)	Izmerjeni posedki (mm/100)			Povprečje (mm)
		A	B	C	
1.st. 0,07	1'	6	11	12	0,09
2.st. 0,14	1'	22	30	30	0,27
3.st. 0,21	1'	33	50	48	0,44
4.st. 0,28	1'	47	69	65	0,60
5.st. 0,35	1'	55	81	75	0,70
6.st. 0,42	1'	63	96	86	0,82
7.st. 0,49	1'	69	106	94	0,90
1.st. 0,24	1'	65	102	91	0,86
2.st. 0,12	1'	57	91	80	0,76
3.st. 0,00	1'	40	61	54	0,52
1.st. 0,07	1'	48	73	66	0,62
2.st. 0,14	1'	54	81	73	0,69
3.st. 0,21	1'	58	88	80	0,75
4.st. 0,28	1'	63	94	85	0,81
5.st. 0,35	1'	66	100	90	0,85
6.st. 0,42	1'	70	106	95	0,90

Razpredelnica 23: Račun deformacijskih modulov E<sub>v1</sub> in E<sub>v2</sub> za P 198

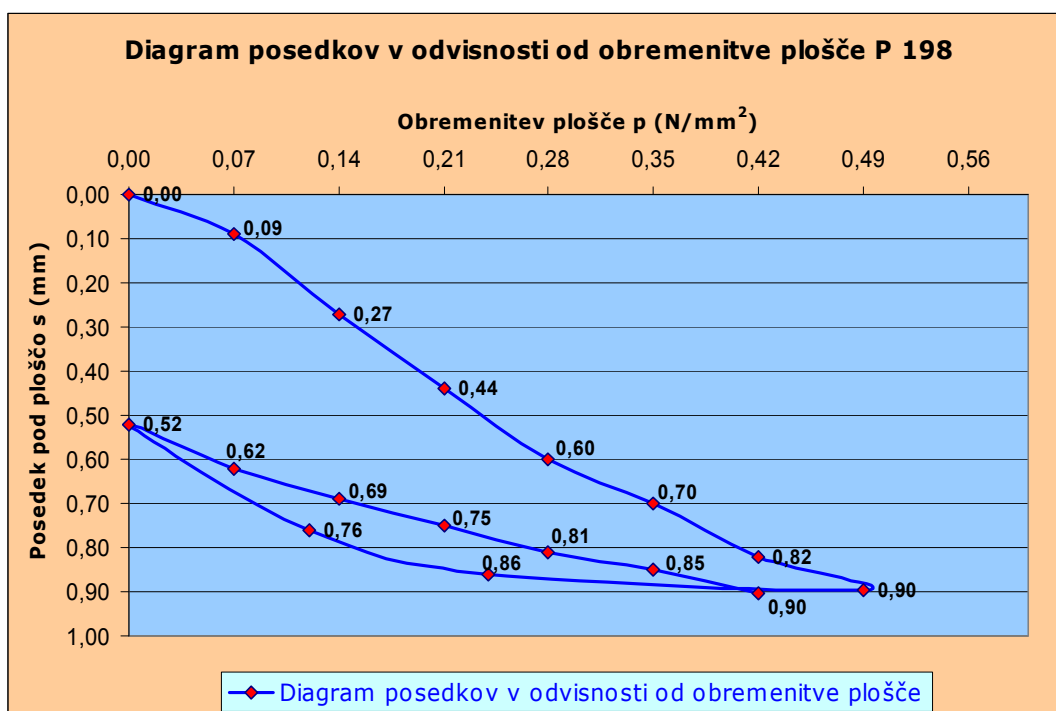
Modul	Krivulja	1.obremenitev			2.obremenitev			Δp = p''- p'	Δs = s''- s'
		merodajna	p'	s'	merodajna	p''	s''		
E <sub>v1</sub>	1	30 % ≈ 2.st.	0,14	0,27	70 % ≈ 5.st.	0,35	0,70	0,21	0,43
E <sub>v2</sub>	2	2.st.	0,14	0,69	6.st.	0,42	0,90	0,28	0,21

Razpredelnica 24: Rezultati meritev posedkov na P 202 vozni pas levo

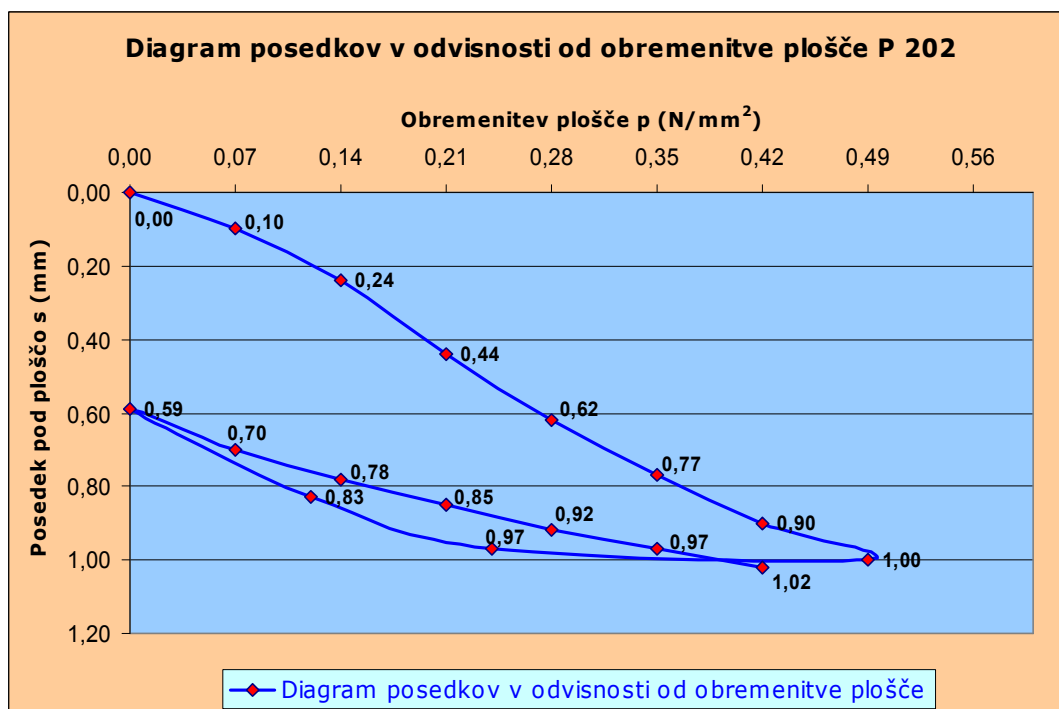
Obremenitev plošče p (N/mm <sup>2</sup> )	Čas (po min.)	Izmerjeni posedki (mm/100)			Povprečje (mm)
		A	B	C	
1.st. 0,07	1'	9	11	11	0,10
2.st. 0,14	1'	23	26	24	0,24
3.st. 0,21	1'	40	47	45	0,44
4.st. 0,28	1'	57	66	63	0,62
5.st. 0,35	1'	69	82	80	0,77
6.st. 0,42	1'	81	96	93	0,90
7.st. 0,49	1'	91	108	102	1,00
1.st. 0,24	1'	88	104	98	0,97
2.st. 0,12	1'	76	92	81	0,83
3.st. 0,00	1'	58	62	57	0,59
1.st. 0,07	1'	67	74	68	0,70
2.st. 0,14	1'	74	84	75	0,78
3.st. 0,21	1'	80	92	84	0,85
4.st. 0,28	1'	85	99	92	0,92
5.st. 0,35	1'	90	104	98	0,97
6.st. 0,42	1'	94	109	104	1,02

Razpredelnica 25: Račun deformacijskih modulov  $E_{v1}$  in  $E_{v2}$  za P 202

Modul	Krivulja	1.obremenitev			2.obremenitev			$\Delta p = p'' - p'$	$\Delta s = s'' - s'$
		merodajna	$p'$	$s'$	merodajna	$p''$	$s''$		
$E_{v1}$	1	30 % $\approx$ 2.st.	0,14	0,24	70 % $\approx$ 5.st.	0,35	0,77	0,21	0,53
$E_{v2}$	2	2.st.	0,14	0,78	6.st.	0,42	1,02	0,28	0,24



Grafikon 4: Diagram posedkov v odvisnosti od obremenitve plošče (P 198)



Grafikon 5: Diagram posedkov v odvisnosti od obremenitve plošče (P 202)

$\Delta p'$  predstavlja diferenco med posedkoma po 5. in po 2. obremenitveni stopnji. Za določitev nosilnosti pa je merodajnejša vrednost deformacijskega modula  $E_{v2}$  in razmerje deformacijskih modulov  $E_{v2}/E_{v1}$ . Po 1. obremenitvi (sestavljeno iz 7 stopenj obremenjevanja), ko določimo deformacijski modul  $E_{v1}$ , ploščo najprej popolnoma razbremenimo v 3. stopnjah in potem še 2. obremenimo, tokrat v 6. stopnjah. Tu predstavlja  $\Delta p''$  razliko posedkov med 7. in 2. stopnjo 2. obremenjevanja.

P 198:

$$\left. \begin{aligned} E_{v1} &= 0,75 \cdot \frac{0,21}{0,43} \cdot 300 = 110 \text{ N/mm}^2 = 110 \text{ MPa} \\ E_{v2} &= 0,75 \cdot \frac{0,28}{0,21} \cdot 300 = 300 \text{ N/mm}^2 = 300 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \frac{E_{v2}}{E_{v1}} = 2,7$$

P 202:

$$\left. \begin{aligned} E_{v1} &= 0,75 \cdot \frac{0,21}{0,53} \cdot 300 = 89,2 \text{ N/mm}^2 = 89,2 \text{ MPa} \\ E_{v2} &= 0,75 \cdot \frac{0,28}{0,24} \cdot 300 = 263 \text{ N/mm}^2 = 263 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \frac{E_{v2}}{E_{v1}} = 2,9$$

Na osnovi izvedenih deformacijskih modulov  $E_{v1}$  in  $E_{v2}$  ter razmerja  $\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$  je mogoče oceniti stanje podlage in njeno nosilnost glede na zahteve v razpredelnici 26. Če je vrednost deformacijskega modula  $E_{v1}$  večja kot 60 % zahtevane vrednosti deformacijskega modula  $E_{v2}$ , razmerje  $\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$  ni merodajno za oceno.

Razpredelnica 26: Zahtevane vrednosti deformacijskih modulov na nevezanih nosilnih plasteh

Vrste zmesi kamnitih zrn	Prometna obremenitev					
	težka			srednja ali lahka		
	Zahtevane vrednosti					
	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vd}$ (MPa)	$E_{v2}$ (MPa)	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vd}$ (MPa)
- naravna	$\geq 100$	$\leq 2,2$	$\geq 45$	$\geq 90$	$\leq 2,4$	$\geq 40$
- drobljena ali mešana	$\geq 120$	$\leq 2,0$	$\geq 55$	$\geq 100$	$\leq 2,2$	$\geq 45$

Razpredelnica 27: Osnove za oceno stanja podlage na osnovi deformacijskih modulov

$E_{v1}$	$E_{v2}$	$E_{v2} : E_{v1}$	Ocena stanja
Zelo nizek	manjši od zahteve	večji od zahteve	slabo utrjeno
Zelo nizek	manjši od zahteve	manjši od zahteve	slabo utrjeno
$\leq 0,6 E_{v2}$	večji od zahteve	večji od zahteve	premalo utrjeno
$\geq 0,6 E_{v2}$	večji od zahteve	večji od zahteve	zadovoljivo utrjeno
<b><math>\geq 0,6 E_{v2}</math></b>	<b>večji od zahteve</b>	<b>manjši od zahteve</b>	<b>dobro utrjeno</b>
$\geq E_{v2}$	večji od zahteve	večji od zahteve	dobro utrjeno
$\geq E_{v2}$	večji od zahteve	manjši od zahteve	zelo dobro utrjeno

Vrednosti deformacijskih modulov  $E_{v1}$  naših dveh poizkusnih polj sta enaki vrednosti 110 MPa in 89, 2 MPa (glej razred  $\geq 0,6 E_{v2} = 120$  MPa), deformacijskih modulov  $E_{v2}$  pa 300 MPa in 263 MPa (glej kolono večji od zahteve = 120 MPa), razmerji  $E_{v2}/E_{v1}$  pa sta enaki 2,7 oz. 2,9 (glej stolpec manjši od zahteve = 2,2 MPa). Iz tega sledi, da je stanja podlage ocenjeno kot *dobro utrjeno*.



### 5.4.2.3 Tlačne trdnosti

Za preizkus tlačnih trdnosti je bilo izdelanih 6 preizkušancev (valjev) premera in višine 15 cm za obe preskusni polji, zbitih v treh plasteh po 75 udarcev, hranjenih 7 dni v vlagi in pred tlačnim preskusom 4 ure namakanih v vodi.

Razpredelnica 28: Tlačne trdnosti vzorcev na preskusnih poljih

SALODUR - Delež veziva: 2,0 %	Valj (g)	Valj + vzorec (g)	Mokra masa vzorca (g)	Volumen valja (cm <sup>3</sup> )	Mokra prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Suha prost. masa (kg/m <sup>3</sup> )	Porušitvena sila (kN)	Tlačne	Tlačne
								trdnosti <i>p</i> (MPa) - 7 dni	trdnosti <i>p</i> (MPa) - 28 dni
P 198 desno	4369	11168	6799	2760	2463	2315	57,5	3,2	-
	4389	11254	6865	2760	2487	2338	56,0	3,1	-
	4343	11163	6820	2760	2471	2323	61,4	3,4	-
	4369	11123	6754	2760	2447	2300	86,0	-	4,7
	4389	11156	6767	2760	2452	2305	90,2	-	4,9
	4343	11145	6802	2760	2464	2316	78,5	-	4,3
P 202 levo	4369	10826	6457	2760	2339	2224	66,4	3,7	-
	4389	10823	6434	2760	2331	2217	74,0	4,1	-
	4343	10866	6523	2760	2363	2247	69,5	3,8	-
	4369	10847	6478	2760	2347	2231	81,1	-	4,5
	4389	10824	6435	2760	2332	2217	93,5	-	5,1
	4343	10866	6523	2760	2363	2246	86,3	-	4,7
<b>P 198 – povprečna tlačna trdnost (MPa)</b>					<b>P 202 - povprečna tlačna trdnost (MPa)</b>				
7 dni		28 dni			7 dni		28 dni		
<b>3,2 MPa</b>		<b>4,6 MPa</b>			<b>3,9 MPa</b>		<b>4,8 MPa</b>		
Opomba: Vzorci hranjeni v vlagi in pred preiskavo namakani v vodi 4 ure (A = 181,4 cm <sup>2</sup> )									

#### 5.4.2.4 Določitev maksimalne prostorninske gostote in optimalne vlažnosti zmesi po Proctorju na preskusnih poljih

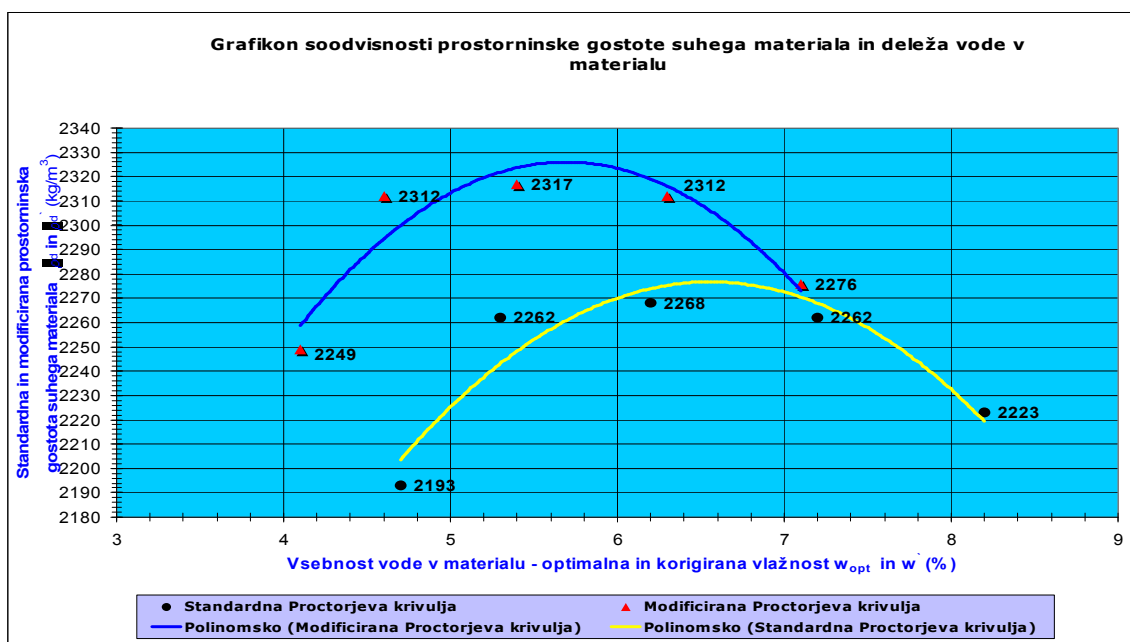
Opis materiala: tamponski drobljenec 0/32 mm + Salodur Anhovo 2 m.-%

Specifična gostota  $\rho_{zz}$  kamnine Laže:  $2710 \text{ kg/m}^3 = 2,71 \text{ t/m}^3$

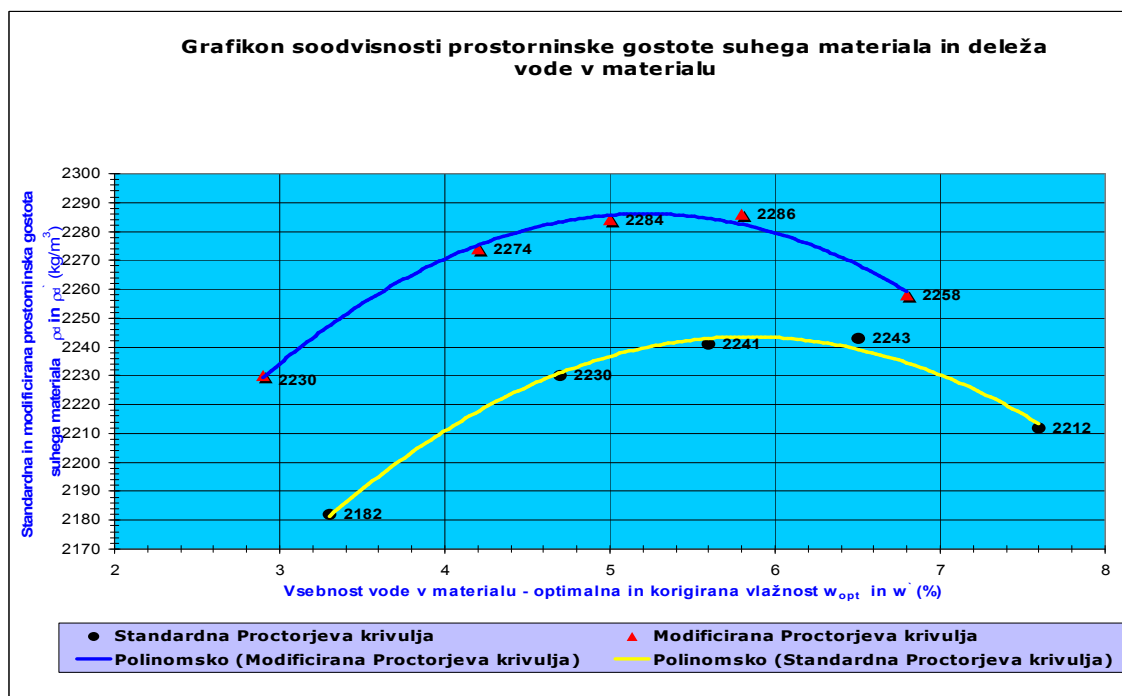
Delež nadmernih zrn pz: 13 m.-%

Razpredelnica 29: Določitev maksimalne prostorninske gostote in optimalne vlažnosti za P 198

P 198 vozni pas desno – pz = 13 %	Enota mere	Številka vzorca materiala (preiskušanca)				
		1	2	3	4	5
<b>Določitev prostor. gostote vlažnega materiala <math>\rho_w</math></b>		$\rho_d'_{\max} = 2326 \text{ kg/m}^3$			$w_{\text{opt}}' = 5,7 \%$	
Valj z vzorcem (vlažni material) $G_1$	g	10420	10618	10680	10718	10672
Masa valja $G_v$	g	5 1 4 0				
Masa vlažnega materiala $G_w = G_1 - G_v$	g	5280	5478	5540	5578	5532
Prostornina valja $V_v$	cm <sup>3</sup>	2 3 0 0				
Prostorninska gostota vlažnega materiala $\rho_w = \frac{G_w}{V_v}$	kg/m <sup>3</sup>	2296	2382	2409	2425	2405
<b>Določitev vsebnosti vode v materialu w</b>						
Posoda $G_p$	g	933	952	963	947	927
Posoda + mokri vzorec = (vlažen mat. s posodo) $G_2$	g	6221	6433	6497	6498	6432
Posoda + suhi vzorec (suhi material s posodo) $G_3$	g	5982	6158	6174	6127	6013
Masa vode $G_w' = G_2 - G_3$	g	239	275	323	371	419
Masa suhega materiala $G_d = G_3 - G_p$	g	5049	5206	5211	5180	5086
Delež vode v materialu $w_r = \frac{G_w'}{G_d} \cdot 100\%$	m.-%	4,7	5,3	6,2	7,2	8,2
Prostorninska gostota suhega materiala $\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + \frac{w}{100}}$	kg/m <sup>3</sup>	2193	2262	2268	2262	2223
<b>Popravek zaradi vsebnosti nadmernih zrn</b>						
Popravek vsebnosti vode $\Delta w = (pz/100) w$	m.-%	0,6	0,7	0,8	0,91	1,1
Popravljen delež vode $w' = w - \Delta w$	m.-%	4,1	4,6	5,4	6,3	7,1
Popravljen prostorninska gostota suhega materiala: $\rho_d' = \frac{100 \cdot \rho_d \cdot \rho_{zz}}{100 \cdot \rho_{zz} - pz \cdot (\rho_{zz} - \rho_d)}$	kg/m <sup>3</sup>	2249	2312	2317	2312	2276



Grafikon 6: Preskus po standardnem in modificiranem postopku po Proctorju  
 (P 198 vozni pas desno)



Grafikon 7: Preskus po standardnem in modificiranem postopku po Proctorju  
 (P 202 vozni pas levo)

Opis materiala: tamponski drobljenec 0/32 mm + Salodur Anhovo 2 m.-%

Specifična gostota  $\rho_{zz}$  kamnine Laže:  $2710 \text{ kg/m}^3 = 2,71 \text{ t/m}^3$

Delež nadmernih zrn pz: 11 m.-%

Razpredelnica 30: Določitev maksimalne prostorninske gostote in optimalne vlažnosti za P 202

P 202 vozni pas levo – pz = 11 %	Enota mere	Številka vzorca materiala (preiskušanca)				
		1	2	3	4	5
<b>Določitev prostor. gostote vlažnega materiala <math>\rho_w</math></b>		<b><math>\rho_d'_{\max} = 2286 \text{ kg/m}^3</math></b>			<b><math>w_{\text{opt}}' = 5,3 \%</math></b>	
Valj z vzorcem (vlažni material) $G_1$	g	10325	10510	10585	10635	10615
Masa valja $G_v$	g	5 1 4 0				
Masa vlažnega materiala $G_w = G_1 - G_v$	g	5185	5370	5445	5495	5475
Prostornina valja $V_v$	cm <sup>3</sup>	2 3 0 0				
Prostorninska gostota vlažnega materiala $\rho_w = \frac{G_w}{V_v}$	kg/m <sup>3</sup>	2254	2335	2367	2389	2380
<b>Določitev vsebnosti vode v materialu w</b>						
Posoda $G_p$	g	952	949	933	963	951
Posoda + mokri vzorec = (vlažen mat. s posodo) $G_2$	g	6138	6322	6376	6446	6415
Posoda + suhi vzorec (suhi material s posodo) $G_3$	g	5972	6081	6086	6109	6031
Masa vode $G_w' = G_2 - G_3$	g	166	241	290	337	384
Masa suhega materiala $G_d = G_3 - G_p$	g	5020	5132	5153	5146	5080
Delež vode v materialu $w_r = \frac{G_w'}{G_d} \cdot 100\%$	m.-%	3,3	4,7	5,6	6,5	7,6
Prostorninska gostota suhega materiala $\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + \frac{w}{100}}$	kg/m <sup>3</sup>	2182	2230	2241	2243	2212
<b>Popravek zaradi vsebnosti nadmernih zrn</b>						
Popravek vsebnosti vode $\Delta w = (pz/100) w$	m.-%	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Popravljen delež vode $w' = w - \Delta w$	m.-%	2,9	4,2	5,0	5,8	6,8
Popravljen prostorninska gostota suhega materiala: $\rho_d' = \frac{100 \cdot \rho_d \cdot \rho_{zz}}{100 \cdot \rho_{zz} - pz \cdot (\rho_{zz} - \rho_d)}$	kg/m <sup>3</sup>	2230	2274	2284	2286	2258

#### 5.4.2.5 Rezultati meritev zgoščenosti in vlažnosti

Spremljanje rezultatov meritev zgoščenosti in vlažnosti smo izvajali z izotopsko sondo Troxler 3440. Rezultati meritev s sondo so podani v razpredelnici 31. Med notranjo kontrolo kakovosti izvedbe plasti cementne stabilizacije so bile izvedene :

- meritve zgoščenosti in vlažnosti pred začetkom in po koncu vgrajevanja z izotopsko sondo
- odvzem vzorcev cementne stabilizacije za določitev tlačnih trdnosti v laboratoriju
- meritve višin ter
- meritve količine posipa cementa

Razpredelnica 31: Meritev zgoščenosti in vlažnosti na P 198 – P 200 (vozni pas desno)

STACIONARNI PROFIL	ZGOŠČEVANJE-ŠTEVILO PREHODOV :	FINIŠER	1.PREHOD-VIBRACIJA	2.PREHOD-VIBRACIJA	3.PREHOD-VIBRACIJA	2X PREHOD-STATIČNO
<b>P 198</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1756	2139	2183	2285	2331
	voda (%)	4,6	4,7	5,6	5,3	4,1
	zgoščenost (%)	76,7	93,4	95,3	99,8	101,8
<b>P 199</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1837	2153	2192	2274	2261
	voda (%)	5,2	4,2	4,4	4,4	5,0
	zgoščenost (%)	80,2	94,0	95,5	99,3	98,7
<b>P 200</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1828	2159	2104	2184	2227
	voda (%)	4,7	5,0	4,7	4,4	4,7
	zgoščenost (%)	79,8	94,3	91,9	95,4	97,3
<b>POVPREČNE VREDNOSTI</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1807	2150	2160	2248	2273
	voda (%)	4,8	4,6	4,9	4,7	4,6
	zgoščenost (%)	78,9	93,9	94,3	98,2	99,3
Maximalna gostota po Proctorju: <b>2326 kg/m<sup>3</sup></b>				Optimalna vlažnost: <b>5,7 %</b>		

Razpredelnica 32: Meritev zgoščenosti in vlažnosti na P 200 – P 203 (vozni pas levo)

STACIONARNI PROFIL	ZGOŠČEVANJE-ŠTEVILO PREHODOV :	FINIŠER	1.PREHOD-VIBRACIJA	2.PREHOD-VIBRACIJA	3.PREHOD-VIBRACIJA	2X PREHOD-STATIČNO
<b>P 200</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1788	2071	2233	2239	2290
	voda (%)	3,4	3,7	3,8	4,3	3,9
	zgoščenost (%)	79,1	91,6	98,8	99,1	101,3
<b>P 201</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1734	2003	2156	2150	2221
	voda (%)	4,4	4,0	4,2	4,2	4,0
	zgoščenost (%)	76,7	88,6	95,4	95,1	98,3
<b>P 202</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1704	2026	2118	2224	2240
	voda (%)	4,2	3,9	4,9	4,2	4,3
	zgoščenost (%)	75,4	89,6	93,7	98,4	99,1
<b>P 203</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1716	2027	2126	2216	2275
	voda (%)	4,1	3,6	4,0	4,2	4,4
	zgoščenost (%)	75,9	89,7	94,1	98,1	100,7
<b>POVPREČNE VREDNOSTI</b>	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	1736	2032	2158	2207	2257
	voda (%)	4,0	3,8	4,2	4,2	2,8
	zgoščenost (%)	76,8	89,9	95,5	97,7	99,8
Maximalna gostota po Proctorju: <b>2286 kg/m<sup>3</sup></b>				Optimalna vlažnost: <b>5,3 %</b>		



Slika 23: Zgoščevanje z valjarjem BOMAG

#### 5.4.2.6 Mnenje

Glede na opravljene prehode valjarja in meritve zbitosti dosežemo potrebno zbitost po treh prehodih z vibracijo ter dveh statičnih prehodih z valjarjem BW 202 AD.

### 5.5 Komentar rezultatov

Izmed obeh obravnavanih veziv v največji meri izpolnjuje zahtevane oz. iskane lastnosti zahtev cement Salodur – vezivo, ki se ga trenutno največ uporablja pri proizvodnji cementne stabilizacije. V starih TSC so bile veljavne zahteve, da naj tlačna trdnost cementne stabilizacije pri 28. dnevih znaša od 2,5 MPa do 4,5 MPa, povprečno pa 3,5 MPa. Z uveljavitvijo TSC 06.320 : 2004 pa je potrebno navedene tlačne trdnosti doseči pri starosti 7 dni, kar pomeni povečanje deleža veziva. Za običajne zmesi zrn bi bilo tako potrebno uporabiti med 3 in 4 m.-% veziv nižjega trdnostnega razreda (v našem primeru Maltita), za izrazito zaglinjene zmesi zrn pa bi bilo potrebno delež veziva povečati še znatneje ali pa se ozirati po vezivu višjega trdnostnega razreda, kot je na primer prav Salodur.

V našem primeru bi za dosego enakih oziroma primerljivih rezultatov predpisane tlačne trdnosti namreč morali uporabiti najmanj 3,2 m.-% veziva Maltita v primerjavi z 2,0 m.-% cementa Salodur (glej str.92, razpredelnico 18). To pa pomeni kar 60 m.-% povečanje veziva Maltit pri doziranju. Sicer pa domneva, da je hidravlično vezivo nizkega trdnostnega razreda, med katere spada tudi Maltit, primernejše za proizvodnjo cementne stabilizacije kot običajni cementi visokega trdnostnega razreda, popolnoma drži, saj lahko na osnovi številnih izvedenih preskusov trdimo, da je kakovost mešanice cementne stabilizacije, pripravljene z Maltitom, v vseh predpisanih merilih povsem primerljiva z mešanicami, izdelanimi s Salodurjem. Temu v prid govorijo tudi prednosti uporabe veziva nizkega trdnostnega razreda:

- večja količina veziva se bolj enakomerno razporedi v mešanici
- potrebna je manjša natančnost pri doziranju veziva (prirastek tlačne trdnosti z večanjem deleža veziva je majhen)
- pričakovan raztros rezultatov tlačnih trdnosti cementne stabilizacije je manjši kot sicer

## 6 ZAKLJUČEK

Dandanes si je ob vse večjih prometnih obremenitvah težko predstavljati solidno voziščno konstrukcijo brez stabilizirane nosilne plasti, posebej ob vedenju, da je stanje voziščne konstrukcije odvisno ne le od kvalitete krovne plasti, temveč in predvsem pa tudi od kvalitete in načina vgraditve nosilnih plasti in utrditve temeljnih tal.

Odkvisno od večje ali manjše prilagojenosti materialov specifičnim pogojem uporabe je vezana nosilna plast lahko zgrajena iz

- zgornje vezane plasti (uporaba bolj kakovostnih vezanih bituminiziranih zmesi, proizvedenih po vročem postopku)
  - bituminizirani prodec
  - bituminizirani prodec z dodatkom drobirja ali drobljenca
  - bituminizirani drobljenec
  - bituminizirani makadam
- spodnje vezane plasti (uporaba manj kakovostnih – stabiliziranih – zmesi zrn oz. mešanic)

Postopek stabiliziranja materialov je mogoče uporabiti za izboljšavo temeljnih tal, izdelavo nosilnih plasti ali pa za samostojno utrditev vozišča. V tehničnem pogledu postopek stabiliziranja ne pomeni skoraj ničesar novega. Utrditev je v bistvu podobna klasičnim metodam vezanja materialov, le z manjšimi količinami veziv in z bistveno drugačnimi materiali. Bistvena prednost in pomen stabiliziranja je torej v praktičnem izvajanju del.

Pri stabiliziranju materiala s kakršnim koli vezivom se je potrebno zavedati, da je končni rezultat prav toliko kot od izbrane vrste in količine veziva odvisen tudi od načina izvajanja del.

V mejah danih možnosti je pri izbiri velikosti zrn v stabilizirani mešanici in/ali zmesi treba upoštevati:



- da je za stabiliziranje zmesi zrn, ki vsebujejo večja zrna, potrebna manjša količina veziva (praviloma ugodnejše)
- da manjša zrna pogojujejo za stabiliziranje večjo količino veziva, ki pa zagotavlja tudi nezaželjene značilnosti:
  - pri stabilizaciji z organskim (bituminoznim) vezivom **večje preoblikovanje**
  - pri stabilizaciji z anorganskim (cementnim) vezivom **prekomerno trdnost**, ki ima za posledico namesto zaželenih lasastih škodljive **širše razpoke**

Čim manjša količina hidravličnega veziva v stabilizacijski mešanici zagotavlja ustrezno počasnejše naraščanje trdnosti. Osnovni pogoj za primerno izvedbo stabilizirane nosilne plasti je tudi pravočasna predhodna sestava in celovito preverjanje stabilizirane zmesi oz. mešanice, vključno s poskusnim vgrajevanjem in potrebnimi preiskavami.

Ker je lahko vzrok za nastanek razpok v s cementom stabilizirani mešanici tudi v načinu zgoščevanja in deležu vode v mešanici, je potrebno pri vgrajevanju zagotoviti:

- vsebnost vode v mešanici, ki sme biti največ 1,5 m.-% večja od optimalne vsebnosti po Proctorju (stabiliziranje se običajno izvaja na prostem, kjer obstoji možnost večjega izhlapevanja, zato je priporočljivo dodati materialu nekaj več vode, kot pa znaša optimalna vlažnost, da mu je s tem zagotovljena potrebna vlažnost med mešanjem in zgoščevanjem)
- pretežno zgostitev z ustreznimi vibracijskimi stroji

Z bitumenskim vezivom stabilizirana zmes zrn mora biti vgrajena najmanj v debelini 8 m, s cementom stabilizirana plast pa v najmanj 15 cm debeli plasti.

Z anorganskim vezivom stabilizirano mešanico je treba zaščititi z ustrezno nadgraditvijo, če obstoji nevarnost, da pred zamrznitvijo ne bo dosežena zahtevana tlačna trdnost.

V pogledu zahtevane nosilnosti posamezne plasti voziščne konstrukcije je treba upoštevati, da mora biti nosilnost plasti tem večja, čim bližje površini leži vgrajena plast. Pritisk, ki ga na posamezno plast voziščne konstrukcije izvaja prometna obremenitev, je odvisen od globine, v

kateri plast leži in z večanjem globine zelo hitro upada. Zaradi tega bi bilo negospodarno graditi vse plasti z enako nosilnostjo oziroma trdnostjo. Potrebno nosilnost voziščne konstrukcije kot celote je potrebno zagotoviti z ustreznim dimenzioniranjem posameznih plasti, ne pa z visoko trdnostjo stabilizirane plasti.

Današnje sorazmerno drage in bolj kvalitetne obrabno-zaporne plasti voziščnih konstrukcij bodo služile svojemu dejanskemu namenu le takrat, če bodo položene na ustrezno kvalitetne nosilne plasti. Zato varčevanje pri pravilnem dimenzioniranju nosilnih plasti ni priporočljivo niti zaželeno.

## VIRI

Černe, S., Hitra cesta Razdrto-Vipava prek Rebernic. Tehnični informator SCT. 6, 58-60: 54-55, 68-69 in 84-85.

TSC 06.200 : 2003. Tehnična specifikacija za javne ceste. Nevezane nosilne in obrabne plasti. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 18 str.

TSC 06.320 : 2004. Tehnična specifikacija za javne ceste. Vezane spodnje nosilne plasti s hidravličnimi vezivi. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 16 str.

TSC 06.330 : 2004. Tehnična specifikacija za javne ceste. Vezane spodnje nosilne plasti z bitumenski vezivi (po vročem postopku). Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 21 str.

Žarnić, R., 1998. Osnovne lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 312 str.

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan – Bosiljkov, V., 1998. Gradiva vaje 1998/99. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 100 str.

Žmavc, J., 1970. Navodila za stabiliziranje materialov. Ljubljana, Društvo za ceste SRS, Komisija za tehnično regulativo in publikacije: 52 str.

Žmavc, J., 1970. Priročnik za stabiliziranje materialov. Ljubljana, ZRMK - Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij: 76 str.

Žmavc, J., 1997. Gradnja cest - voziščne konstrukcije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 360 str.

Žmavc, J., Bebar, M., 2004. Optimalne rešitve pri izbiri veziv za stabiliziranje nosilnih plasti voziščne konstrukcije. Razvojno-raziskovalna naloga. Končno poročilo. Ljubljana, IGMAT d.d., Inštitut za gradbene materiale, DARS d.d., Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji, 41 f.

<http://www.cs.uu.nl/people/wilke/aquasite/hulp/tekopusbreed.htm> (01.12.2005).

[http://sights.seindal.dk/sight/325\\_Opus\\_Caementicium.html](http://sights.seindal.dk/sight/325_Opus_Caementicium.html) (01.12.2005).

[http://www.salonit.si/proizvodi\\_in\\_storitve/cementi/](http://www.salonit.si/proizvodi_in_storitve/cementi/) (03.01.2006).

<http://www.wirtgen.de/eng/eprod/ewr2500s.html> (10.12.2005).

<http://www.wirtgenamerica.com/> (10.12.2005).