

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*



Visokošolski program Gradbeništvo,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Marko Turel**

# **Določitev karakteristične tlačne trdnosti samozgoščevalnega in vibriranega betona.**

**Diplomska naloga št.: 233**

**Mentor:**  
prof. dr. Goran Turk

**Somentor:**  
izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 31. 5. 2006

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **MARKO TUREL** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»DOLOČITEV KARAKTERISTIČNE TLAČNE TRDNOSTI SAMOZGOŠČEVALNEGA IN VIBRIRANEGA BETONA«**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Renče, 27.3.2006

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

<b>UDK:</b>	<b>691.32 (043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Marko Turel</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Goran Turk</b>
<b>Somentor:</b>	<b>doc. dr. Violeta Bokan Bosiljkov</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Določitev karakteristične tlačne trdnosti samozgoščevalnega in vibriranega betona</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>48 str., 14 pregl., 9 sl., 22 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>samozgoščevalni beton, karakteristična vrednost</b>

### **Izvleček:**

Zaradi hitrejšega izvajanja del in izboljšanih delovnih pogojev je uporaba samozgoščevalnega betona v praksi vedno pogostejša. Pri tem prednjačijo evropske, predvsem skandinavske države. Tudi v Sloveniji samozgoščevalne betone vedno pogosteje uporabljamo predvsem tam, kjer je zgoščevanje z vibriranjem oteženo ali nemogoče. Namen naloge je določitev karakteristične vrednosti tlačne trdnosti samozgoščevalnih betonov z upoštevanjem določil standarda, po ustreznem statističnem postopku. Rezultate bom primerjal z rezultati istih karakteristik vibriranih betonov.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 691.32 (043.2)  
**Autor:** Marko Turel  
**Supervisor:** Associate Prof. Goran Turk, Ph.D.  
**Co-Supervisor:** Assist. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.  
**Title:** Determination of characteristic compressive strength of self-compacting and vibrated concrete  
**Notes:** 48 p., 14 tab., 9 fig., 22 eq.  
**Key words:** self-compacting concrete, characteristic value

### **Abstract:**

The use of self-compacting concrete is increasing due to the demand of faster work performance and better working conditions. The leadership countries in this field are European, and especially Scandinavian countries. Also Slovenian constructors are using self-compacting concrete where performing mechanical vibrations is difficult or impossible. The purpose of the present Graduation thesis is to determinate the characteristic compressive strength of self-compacting concrete taking in consideration the standards and adequate statistic procedure. The results will be compared with those of vibrated concrete.

## **ZAHVALA**

Za strokovno pomoč in vodenje pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Goranu Turku in somentorici doc. dr. Violeti Bokan Bosiljkov.

Del potrebnega materiala s pripadajočimi certifikati in standardi mi je posredovalo podjetje Primorje d.d. iz Ajdovščine. Zato se posebej zahvaljujem gospodu Zvonku Cotiču vodji kontrole kakovosti in gospe Karmen Koglot.

Za vso podporo in razumevanje se zahvaljujem moji Anji ter staršema Miranu in Sonji.

## KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	PREGLED TEORETIČNE VSEBINE	2
2.1	PREDNOSTI IN SLABOSTI SAMOZOŠČEVALNEGA BETONA	2
2.2	METODE PREVERJANJA LASTNOSTI SAMOZOŠČEVALNEGA BETONA	3
2.2.1	PREISKAVA RAZLEZ S POSEDOM	3
2.2.2	PREISKAVA Z LIJAKOM V	5
2.2.3	PREISKAVA Z ZABOJEM L	6
2.3	PREVERJANJE LASTNOSTI SAMOZOŠČEVALNEGA BETONA V STRJENEM STANJU	8
2.3.1	TLAČNA TRDNOST	8
2.3.1.1	PREISKAVA Z ULTRAZVOČNO METODO	9
2.3.2	CEPILNA NATEZNA TRDNOST	10
2.4	MATERIALI ZA IZDELAVO SAMOZOŠČEVALNEGA BETONA	11
2.4.1	CEMENT KOT NARAVNI GRADBENI MATERIAL	12
2.4.1.1	SILIKATNI CEMENTI	12
2.4.1.2	ALUMINATNI CEMENTI	14
2.4.1.3	SESTAVA IN OZNAČEVANJE CEMENTOV PO SIST EN 197-1	14
2.4.1.4	HIDRATACIJA CEMENTA	15
2.4.2	VODA	15
2.4.3	AGREGAT	16
2.4.4	DODATNI PRAŠKASTI MATERIALI	17
2.4.5	KEMIJSKI DODATKI BETONU	18
2.4.5.1	SUPERPLASTIFIKATORJI	19
2.4.5.2	DODATKI ZA KONTROLO VISKOZNOSTI	19
2.5	PROJEKTIRANJE SAMOZOŠČEVALNEGA BETONA	20
2.6	MEŠANJE, TRANSPORTIRANJE IN VGRAJEVANJE SAMOZOŠČEVALNEGA BETONA	21
3	STATISTIČNA ANALIZA	22
3.1	KORELACIJE, PREIZKUSI DOMNEV O ENAKOSTI VARIANC IN SREDNJIH VREDNOSTI	23
3.1.1	KORELACIJE	23
3.1.2	PREIZKUS ENAKOSTI VARIANC (test F)	25
3.1.3	PREIZKUS ENAKOSTI SREDNJIH VREDNOSTI (test T)	26
3.2	PREIZKUŠANJE DOMNEV O PORAZDELITVI TLAČNIH TRDNOSTI BETONOV	27
3.2.1	TESTIRANJE SKLADNOSTI PORAZDELITEV S TESTOM HI KVADRAT ( $X^2$ )	30
3.2.2	TESTIRANJE SKLADNOSTI PORAZDELITEV S TESTOM KOLMOGOROVA IN SMIRNOVA	35
3.2.3	PRIMERJAVA TESTOV	38
3.3	DOLOČITEV KARAKTERISTIČNE TLAČNE TRDNOSTI	39
4	ZAKLJUČEK	44
	VIRI	46

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Samozgoščevalni beton brez aeranta

Preglednica 2: Samozgoščevalni beton z aerantom

Preglednica 3: Vibrirani beton

Preglednica 4: Rezultati testa F

Preglednica 5: Rezultati testa T

Preglednica 4: Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev s prvo varianto določitve mej za vzorec s 27 podatki.

Preglednica 5: Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev z drugo varianto določitve mej za vzorec s 27 podatki.

Preglednica 6: Test  $\chi^2$  za normalno porazdelitev s prvo varianto določitve mej za vzorec s 134 podatki

Preglednica 7: Test  $\chi^2$  za normalno porazdelitev z drugo varianto določitve mej za vzorec s 134 podatki.

Preglednica 8: Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev nepristranskim načinom določitve mej za vzorec s 27 podatki.

Preglednica 9: Vrednosti dejanskega tveganja  $\alpha_{dej}$  za test  $\chi^2$ .

Preglednica 10: Test Kolmogorova in Smirnova za normalno porazdelitev vzorca s 27 podatki

Preglednica 11: Test Kolmogorova in Smirnova za logaritemsko normalno porazdelitev vzorca s 27 podatki.

Preglednica 12: Vrednosti dejanske stopnje tveganja ( $\alpha_{dej}$ ) za test  $\chi^2$  in test Kolmogorova in Smirnova

Preglednica 13: Vrednosti  $\lambda$  za različne velikosti vzorca  $n$

Preglednica 14: Prikaz karakterističnih vrednosti za različne metode določanja

## KAZALO SLIK

- Slika 1: Oprema za izvedbo preiskave razlez s posedom.
- Slika 2: Izvedba preiskave razlez s posedom.
- Slika 3: Lijak V za preiskavo viskoznosti samozgoščevalnega betona
- Slika 4: Karakteristike zaboja L
- Slika 5: Preiskava z zabojem L
- Slika 6: Preizkušaje tlačne trdnosti
- Slika 7: Prikaz raztrosa podatkov za korelacijo tlačna trdnost – prostorninska masa, za vibrirani beton (parameter korelacije je 0,14).
- Slika 8: Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev nepristranskim načinom določitve mej za vzorec s 27 podatki.
- Slika 9: Prikaz rezultatov testa Kolmogorova in Smirnova za normalno porazdelitev vzorca s 27 podatki.



## 1 UVOD

Idejo za temo diplomske naloge sem dobil med opravljanjem praktičnega usposabljanja pri podjetju Primorje d.d. na hitrocestnem odseku Razdrto – Vipava. Zaradi razgibanosti in kompleksnosti terena se na tem odseku gradijo zanimivi objekti, od katerih predstavljajo nekateri pravi izziv za gradbeništvo. Pri tem je sodelovanje med izvajalci, projektanti in drugimi strokovnjaki neizogibno, saj se razmere na terenu nenehno spreminjajo. Geološka sestava tal je precej neugodna. Pogosto se pojavljajo zdrsi tal in plazovi, ki zahtevajo ponovno projektiranje objektov v gradnji, dodajanje novih konstrukcij in ojačitev ter iskanje rešitev za zaščito že zgrajenih odsekov.

Med praktičnim usposabljanjem sem sodeloval pri objektih, ki jih gradi Primorje d.d., še posebej pri izgradnji viadukta Boršt I in pokritega vkopa (8-1/1).

Pri gradnji slednjega smo naleteli na težavo. Nad pokritim vkopom je bil predviden obsežen nasip, ki bi močno obremenil armirano betonsko konstrukcijo samega vkopa. Projektant se je zaradi tega odločil dodatno ojačiti armaturo na področju, kjer je nasip najobsežnejši. Sistem gradnje je predvideval gradnjo objekta v treh fazah (betonažah) v vertikalni smeri. V prvi fazi naj bi se zgradila temeljna plošča, v drugi fazi stene (do višine približno 5 m) in v tretji fazi zgornji lok pokritega vkopa.

Problem se je pojavil pri gradnji sten. Tu je bilo zaradi geometrije opaža, naklona terena in gostote armature (armaturnih palic in stremen) v področju z ojačeno armaturo vibriranje betona nemogoče. Rešitev je bila uporaba samozgoščevalnega betona, ki lahko brez vibriranja zapolni opaž poljubne oblike, tesno oblije nameščeno armaturo ter se odzrači tudi na previsnih območjih opaža. Pomanjkljivost uporabljenega samozgoščevalnega betona pa je bila, da se je zniveliral. Ta lastnost je v splošnem dobrodošla, vendar je bil v našem primeru zgornji nivo opaža pod istim naklonom kot teren (5 %), zato tudi betona na vrhu opaža nismo želeli znivelirati, temveč zravnati z opažem.

Zaradi posebnih lastnosti samozgoščevalnega betona v svežem stanju sem se odločil, da ga bom podrobneje analiziral.

## **2 PREGLED TEORETIČNE VSEBINE**

### **2.1 PREDNOSTI IN SLABOSTI SAMOZOŠČEVALNEGA BETONA**

Zadnja leta se pojavlja trend uporabe večjega deleža armature v armiranobetonskih konstrukcijah, z namenom doseči višjo konstrukcijsko učinkovitost, in uporaba večjega števila palic manjšega premera, za omejitev širjenja razpok. Tako je učinkovito vgrajevanje betona in doseganje ustrezne homogenosti vgrajenega betona z vibriranjem oteženo in pogosto tudi nemogoče. Rešitev predstavljenih problemov je prišla z Japonske-. Razvoj superplastifikatorjev nove generacije je omogočil izdelavo betona, ki je zaradi visoke sposobnosti tečenja in zapolnjevanja samo zaradi delovanja lastne teže zmožen zapolniti opaž poljubne oblike, pri tem tesno zaliti armaturo, se odzračiti in znivelirati, ne da bi segregiral.

Samozgoščevalni betoni z apnenčevo moko kot dodatnim praškastim materialom dosegajo praviloma visoke enodnevne tlačne trdnosti, kar omogoča večjo frekvenco uporabe opažev in s tem tudi večjo produktivnost. Njihova uporaba lahko igra pomembno vlogo pri večanju konkurenčnosti armiranobetonskih konstrukcij, saj omogoča znižanje stroškov in izboljšanje karakteristik za uporabnike. Odlične sposobnosti tečenja poleg tega omogočajo uporabo in razvoj primernejših metod vgrajevanja (črpanja) svežega betona v opaže.

Bistvene so tudi izboljšave delovnega okolja pri izključitvi vibriranja iz delovnega procesa, tako na gradbišču kot tudi v obratih za izdelavo prefabriciranih elementov. Uporaba pervibratorjev namreč predstavlja veliko obremenitev za delavce, saj povzroča motnje krvnega obtoka, znane kot »beli prsti« (white fingers). Oprema za vibriranje poleg tega povzroča tudi močan hrup in zajetno fizično obremenitev za tiste, ki z njo delajo. Boljše delovno okolje pa pomeni večje možnosti za pridobivanje kvalificiranih delavcev, podjetjem omogoča, da zadržijo izkušene delavce dalj časa in da znižajo stroške za njihovo zdravstveno varstvo ter prispeva k boljšemu počutju delavcev.

Slabost samozgoščevalnih betonov predstavljajo višji stroški, ki nastanejo zaradi uporabe dodatkov (superplastifikatorjev). Tudi direkten prenos receptur iz držav, kjer je tehnologija izdelave samozgoščevalnih betonov najbolj razvita, ni možen. Zato je sestavo

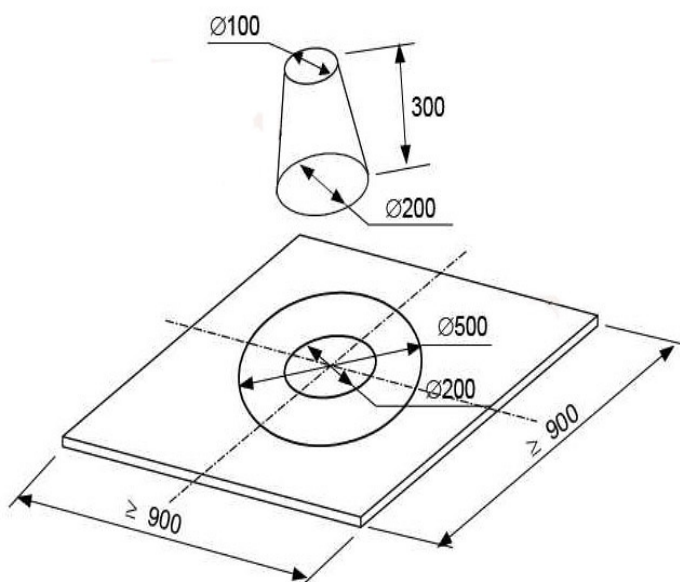
samozgoščevalnih mešanic iz razpoložljivih lokalnih materialov največkrat potrebno zasnovati na novo.

## 2.2 METODE PREVERJANJA LASTNOSTI SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA

### 2.2.1 PREISKAVA RAZLEZ S POSEDOM

Razlez s posedom oz. »Slump flow test« je metoda za določanje sposobnosti razleza samozgoščevalnega betona. Pri tem testu opazujemo dva parametra: premer razleza in čas razleza (neobvezno). Prvi nam pove prosto neomejeno deformabilnost, drugi nam poda razmerje deformacije v določenih mejah razleza.

Pri izvedbi preiskave uporabimo standardni prisekan stožec (Abramsov stožec predpisan v ISO 4019) in gladko, ravno, vodotesno ter dovolj togo ploščo dimenzij 900x900 mm. Na plošči morata biti narisana dva kroga premera 200 mm in 500 mm. Za pravilen potek preiskave so potrebni tudi štoparica za merjenje časa  $T_{50}$  (z natančnostjo 0,1 sekunde), meter za merjenje premera razleza, vedro za odvzem vzorca ter vlažna in suha krpa.



*Slika 1: Oprema za izvedbo preiskave razlez s posedom.*

Pred začetkom preiskave postavimo čisto bazno ploščo na stabilno, vodoravno podlago. V vedro odzamemo reprezentativni vzorec samozgoščevalnega betona in ga pustimo, da se umiri (prbl. 1 minuto  $\pm 10$  sekund). Med tem časom navlažimo notranjost prisekanega stožca

in površino plošče tako, da na površju ni proste vode. Stožec postavimo na bazno ploščo, v center 200 mm kroga. Napolnimo ga z vzorcem betona, ki ga dodatno ne zgoščujemo z jekleno palico ali vibratorjem. Odvečen beton nad vrhom stožca mora biti odstranjen in bazna plošča očiščena. Po kratkem premoru (ne daljšem od 30 sekund, potrebnih za čiščenje in preverjanje podlage) stožec dvignemo v vertikalni smeri, tako da se beton prosto razleze. V trenutku, ko stožec zgubi stik s ploščo, vklopimo štoparico in jo ustavimo, ko se beton prvič dotakne kroga s premerom 500 mm. Odčitek na štoparici je čas  $T_{50}$ . Izmerimo najširši premer razleza betona ( $d_{max}$ ) ter premer, pravokoten na prejšnji odčitek ( $d_{perp}$ ).



*Slika 2: Izvedba preiskave razlez s posedom.*

Ovrednotenje rezultatov:

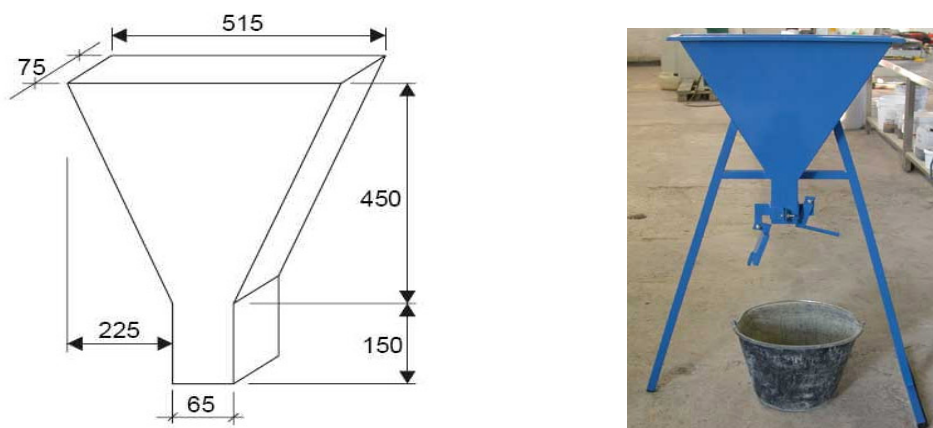
- Razlez betona  $S$  je povprečna vrednost razlezov  $d_{max}$  in  $d_{perp}$ , zaokrožena na 5 mm.
- $T_{50}$  je časovni interval merjen od dviga stožca do časa, ko beton doseže krog premera 500 mm. Izražen je v sekundah, z natančnostjo 0,1 sekunde.

Vrednosti razleza betona  $S$  naj bi se gibale v mejah 650 – 800 mm..

## 2.2.2 PREISKAVA Z LIJAKOM V

Preiskava omogoča oceno viskoznosti in sposobnosti prehajanja betona skozi ozke predele. Čas, ki ga potrebuje vzorec betona, da izteče iz lijaka samo zaradi lastne teže, je pokazatelj sposobnosti zapolnjevanja betonske mešanice, vendar le v primeru, da ne pride do blokiranja in/ali segregiranja betona. Rezultati testa so do določene mere povezani tudi s plastično viskoznostjo betona.

Lijak V je izdelan iz jeklene pločevine, ima raven, horizontalen vrh in je postavljen na vertikalno stojalo. Na dnu lijaka je vodotesna zapora, ki se odpre v trenutku. Za pravilen potek preiskave potrebujemo štoparico (z natančnostjo 0,1 sekunde) za merjenje časa iztekanja betona, ravnilo za poravnavo betona, vedro za odvzem vzorca in vlažno krpo za navlažitev notranjosti lijaka.



*Slika 3: Lijak V za preiskavo viskoznosti samozgoščevalnega betona*

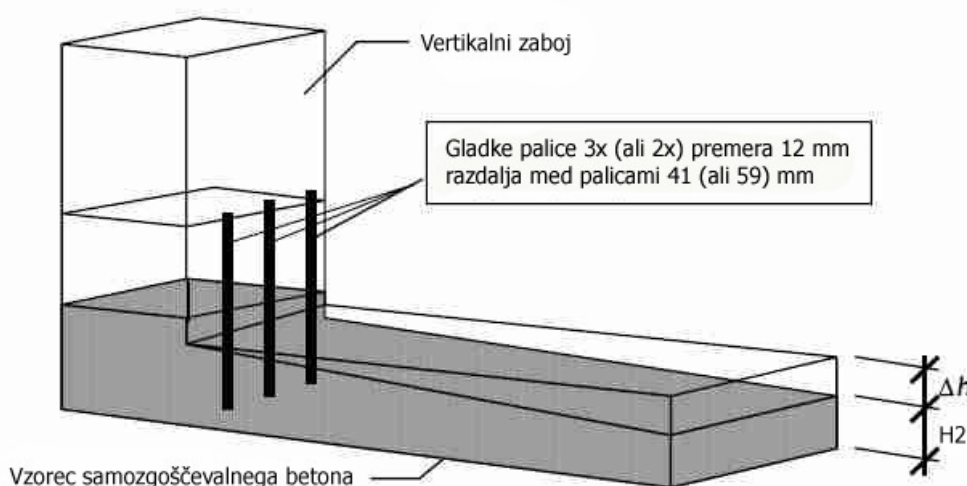
Kako poteka preiskava? Lijak V postavimo na stabilno ravno podlago tako, da je zgornja odprtina postavljena horizontalno. Nato navlažimo notranjost lijaka in pri tem pazimo, da na površini ni proste vode ter zapremo zaporo na dnu lijaka. Sveži beton vlijemo v lijak tako, da se vzorec poravna z vrhom lijaka, ne da bi pri tem beton vibrirali. Odvečni beton odstranimo z ravnilom. Pod odprtino za iztekanje postavimo posodo za prestrezanje. Odpremo zaporo in začnemo meriti čas. Čas merimo od odstranitve zapore do trenutka, ko z vrha lijaka V zagledamo svetlobo na izpustu.

Betonska mešanica ima ustrezno sposobnost zapolnjevanja, če izteče iz lijaka V v 5-ih do 14-ih sekundah. V kolikor je čas iztekanja daljši od 14-ih sekund, pomeni, da je betonska mešanica preveč viskozna za ustrezno vgrajevanje. Daljši čas lahko pomeni tudi, da je mešanica nestabilna. V tem primeru zrna agregata oblikujejo oviro, kar preprečuje tečenje. Če je čas iztekanja betona krajši od 5-ih sekund, pa je viskoznost mešanice praviloma premajhna za ustrezno odpornost na segregacijo.

### 2.2.3 PREISKAVA Z ZABOJEM L

S to preiskavo za mešanico samozgoščevalnega betona prvenstveno ovrednotimo sposobnost prehajanja med ovirami, dobimo pa tudi oceno sposobnosti samoniveliranja, zapolnjevanja in odpornosti na segregacijo. Merimo doseženo višino svežega betona po prehodu skozi odprtine v oviri iz jeklenih palic in razlez v horizontalni smeri.

Za ta preizkus uporabljamo tako imenovani zaboje L iz vezane plošče, debeline 12mm, z gladko površino in vsaj eno prosojno stranico. Na tej stranici sta označeni mesti 200 in 400, ki sta 20 in 40 cm oddaljeni od drsne zapore na horizontalnem delu zaboja. V zaboju L je nameščena ovira iz treh ali dveh gladkih palic  $\varnothing 12$ . Odprtina je v primeru treh palic  $3 \times 41$ mm, v primeru dveh palic pa  $2 \times 59$  mm. Prehod betona iz vertikalnega dela v horizontalni preprečuje drsna zapora, ki se mora gladko odpirati.



*Slika 4: Karakteristike zaboja L*

Pred preiskavo postavimo zabojo na fiksno horizontalno površino in notranjost zaboja navlažimo tako, da ni proste vode. Vertikalni del zaboja napolnimo z 12,7 litri reprezentativne sveže betonske mešanice. Beton pustimo približno 1 minuto ( $\pm 10$  sekund), da se umiri. V tem času ugotavljamo, če je beton stabilen (ne segregira). Zatem dvignemo drsno zaporo, da beton steče v horizontalni del zaboja L skozi oviro iz armaturnih palic.

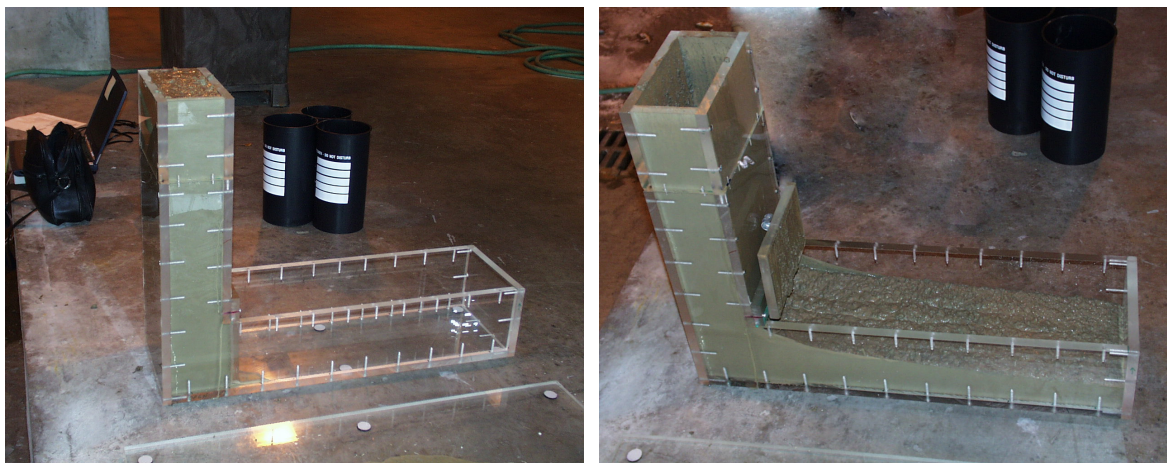
Ob dvigu drsne zapore začnemo meriti časa  $T_{20}$  in  $T_{40}$ ; to sta časa, ki ju čelo betona potrebuje, da doseže oznaki 200 in 400. Ko se beton umiri, izmerimo povprečno razdaljo  $\Delta h$  med zgornjim robom zaboja in višino betona. Na podlagi meritev izračunamo prehodno razmerje  $P_L$  oz.. blokirno razmerje  $B_L$ .

$$P_L = \frac{H}{H_{\max}}, \quad B_L = 1 - \frac{H}{H_{\max}} \quad (1)$$

kjer je  $H_{\max} = 91$  mm in  $H = 150 - \Delta h$

Vrednost prehodnega razmerja ( $P_L$ ) se mora nahajati v mejah od 0,8 do 1,0, kar kaže na zadostno sposobnost prehajanja sveže betonske mešanice.

S to preiskavo ocenjujemo tudi stabilnost betonske mešanice. Če se beton nakopiči za oviro iz armaturnih palic in oblikuje plato, pomeni, da je prišlo do blokiranja ali segregiranja. Če pa je grobozrnat agregat na površini betona razporejen vse do konca horizontalnega dela zaboja, betonsko mešanico ocenimo kot stabilno.



Slika 5: Preiskava z zabojem L

## 2.3 PREVERJANJE LASTNOSTI SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA V STRJENEM STANJU

### 2.3.1 TLAČNA TRDNOST

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost na osno tlačno obremenitev. Preizkusna metoda je predpisana s standardom SIST EN 12390-3:2002. Ta predpisuje način določanja tlačne trdnosti betonskih preizkušancev (kock ali valjev), ki so pripravljani v skladu s standardom SIST EN 12390-2:2001.

Preizkušanci se v hidravlični stiskalnici, ki izpolnjuje zahteve standarda SIST EN 12390-4, obremenjujejo do porušitve. Največjo tlačno silo, ki jo prenese preizkušanec si zapišemo, in na njeni podlagi izračunamo tlačno trdnost.

#### **Potek preiskave**

Na stiskalnici očistimo naležne površine, s preizkušanca očistimo odvečno vlago in ga postavimo v stiskalnico na sredino spodnje tlačne ploskve tako, da bo obremenjen pravokotno na smer vgrajevanja. V primeru, da so betonski preskušanci standardne kocke, naležna površina ni nikoli tista, ki se jo po vgrajevanju zgladi.

Silo nanašamo enakomerno, s hitrostjo obremenjevanja med 0,2 MPa/s in 1,0 MPa/s. Nanašanje sile do porušitve mora biti nesunkovito in enakomerno. Izbrana hitrost obremenjevanja pa se lahko spreminja za največ 10%.

Po koncu preiskave zapišemo porušno silo in preverimo vrsto porušitve, ki je lahko pravilna ali nepravilna. Če je porušitev nepravilna, to zabeležimo skupaj s številko oz. črko s slike, ki v standardu označuje, kateri izmed podanih situacij je porušitev najbolj podobna.

Tlačno trdnost preizkušanca izračunamo po spodaj navedeni enačbi in jo zaokrožimo na 0,5 MPa natančno.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

kjer je:

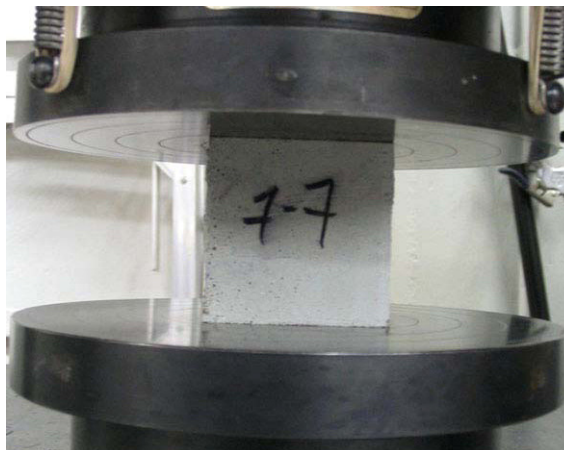
$f_c$  – tlačna trdnost (v MPa)



$F$  – porušna sila (v N)

$A_c$  – prerez, na katerega je delovala tlačna sila (v mm<sup>2</sup>)

Tlačna trdnost je odvisna predvsem od vodocementnega razmerja in stopnje hidratacije cementnega kamna, ki je v običajnih razmerah proporcionalna starosti betona. Z večanjem vodocementnega razmerja trdnost pada, s starostjo pa raste.



*Slika 6: Preizkušanje tlačne trdnosti*

### 2.3.1.1 PREISKAVA Z ULTRAZVOČNO METODO

Ultrazvočna metoda omogoča oceno kvalitete betona v obstoječih konstrukcijah. Temelji na hitrosti potovanja ultrazvoka, ki je odvisna od gostote betona, dinamičnega modula elastičnosti in dinamičnega Poissonovega koeficienta. Zato lahko pri znanem dinamičnem Poissonovem koeficientu betona določimo dinamični modul elastičnosti betona  $E_D$ . Metoda je zelo primerna za oceno homogenosti in kvalitete vgrajenega betona.

Ultrazvočna naprava meri čas potovanja ultrazvočnih valov skozi betonski sklop. Sestavljena je iz merilnega instrumenta, dveh sond (oddajnik in sprejemnik ultrazvočnih valov) in kalibratorja za preverjanje točnosti merilca.

Vzorec, katerega trdnost hočemo preveriti z metodo ultrazvoka, postavimo med sondi. Sondi pritiskata na preizkušanelec s konstantno silo. Dober kontakt med posamezno sondo in površino

vzorca je bistvenega pomena. Če je potrebno, površino betona očistimo in zbrusimo ter nanjo naneseemo tanek sloj vazelina.

Oddajnik odda skozi preizkušane visoko frekvenčni val. Na drugi strani preizkušanca sprejemna sonda lovi oddani val in meri potovalni čas. Z izmerjenim potovalnim časom in pripadajočo dolžino poti od oddajnika do sprejemnika lahko izračunamo hitrost longitudinalnih ultrazvočnih valov. S pomočjo tako dobljene vrednosti pa lahko ocenimo kvaliteto vgrajenega betona.

### 2.3.2 CEPILNA NATEZNA TRDNOST

Oceno natezne obremenitve, pri kateri se oblikujejo razpoke v betonu, dobimo s preiskavo cepilne natezne trdnosti betona. Postopek preiskave je predpisan v standardu SIST EN 12390-6:2001

#### Potek preiskave

Preiskava poteka praviloma na standardnem valju, dovoljena pa je tudi izvedba preiskave na standardni kocki ali prizmi. Valju standardnih dimenzij pred preiskavo še enkrat natančno izmerimo dejanske dimenzije. Nato ga obremenimo z zvezno linearno obremenitvijo po tvorilkah plašča valja in določimo porušno silo.

Cepilno natezno trdnost določimo po naslednji enačbi:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (3)$$

kjer je:

$F$  – porušna sila (v N)

$l$  – dolžina raznosa sile oz. višina valja (v mm)

$d$  – premer valja (v mm)

## 2.4 MATERIALI ZA IZDELAVO SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA

Samozgoščevalni beton ima v svežem stanju bistveno drugačne lastnosti od običajnega vibriranega betona, vendar so za izdelavo obeh potrebni enaki osnovni materiali (cement, voda, agregat). Osnovno razliko v sestavi predstavljata prostornina praškastih delcev, manjših od 150  $\mu\text{m}$  (mineralni dodatki, fine frakcije kamnitega agregata) in delež grobega agregata, katerega največje zrno običajno ne presega 25 mm (predvsem pri armiranih konstrukcijah z razmakom med armaturnimi palicami manjšim od 200 mm)

Za doseganje potrebnih lastnosti svežega samozgoščevalnega betona je pomembna izbira vrste in količine sestavin betonske mešanice:

- velika količina finih delcev zagotavlja obdelavnost sveže mešanice, istočasno pa zmanjšuje nevarnost segregacije svežega betona,
- zadostna količina superpalstifikatorja omogoča sposobnost tečenja in zapolnjevanja ter zmanjšuje potrebno količino zamesne vode,
- omejena količina grobega agregata preprečuje zaustavitev samozgoščevalnega betona v ozkih predelih med ovirami (armaturnimi palicami),
- primerna količina sredstva za kontrolo viskoznosti ima enako vlogo kot praškasti delci, ki preprečujejo segregacijo grobega agregata s povečanjem viskoznosti paste.

Za izdelavo betona s samozgoščevalnimi lastnostmi se priporočajo naslednje količine osnovnih materialov:

- grob agregat : 750 do 920  $\text{kg/m}^3$ ,
- droben agregat : 710 do 900  $\text{kg/m}^3$ ,
- praškasti delci: 450 do 600  $\text{kg/m}^3$  (razmerje med vodo in praškastimi delci je med 0,8 in 1,2) ,
- voda: 150 do 200  $\text{kg/m}^3$ .

## 2.4.1 CEMENT KOT NARAVNI GRADBENI MATERIAL

Cement je anorgansko hidravlično vezivo, t.j. vezivo, ki reagira z vodo (hidratizira). Proces strjevanja cementa se odvija tudi pod vodo.

Kemično je cement sestavljen iz različnih oksidov, med katerimi prevladujejo kalcijev oksid (CaO), silicijev oksid (SiO<sub>2</sub>), aluminijev oksid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in železov oksid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Po kemični sestavi razlikujemo silikatne cemente in aluminatne cemente. Pri silikatnih cementih so osnovni nosilci lastnosti kalcijevi silikati, pri aluminatnih pa kalcijevi aluminati.

Vezivne lastnosti so navadno posledica vzajemnega delovanja fino mletih metastabilnih klinkerskih mineralov z vodo. Le-ti formirajo prezasičene sisteme, v katerih nastanejo termodinamično obstojni hidrati.

### 2.4.1.1 SILIKATNI CEMENTI

**Portland cement** so začeli proizvajati v XIX. stoletju v Angliji. Postopek pridobivanja je temeljil na žganju mešanice apnenca in gline. Ta osnovna oblika cementa je bila poznana kot mleti produkt žgane mešanice (cementnega klinkerja). Portland cement je dobil ime po sivi barvi gradbenega kamna, ki je zelo podobna barvi cementa iz angleške pokrajine Portland.

V naravi obstaja naravna mešanica apnenca in gline. Poznamo jo pod imenom lapor in je tudi najpogostejša surovina za pridobivanje cementa.

Danes se portland cement pridobiva s postopkom žganja surovinske baze v rotacijskih pečeh. Bazična komponenta mešanice je apnenec, kislina pa glina ali kremenčev pesek. Razmerje bazičnih (CaO, MgO) in kislih (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) komponent mora biti usklajeno tako, da je doseženo popolno molekularno zasičenje komponent. Po žganju se cementni klinker postopoma ohlaja, drobi in melje. Tej mešanici se doda še 2% do 5% sadre (fino mletega gipsnega kamna). Z dodajanjem sadre se regulira hitrost vezanja cementa – doseže se upočasnitev kemične reakcije vezanja trikalcijevega aluminata (3CaO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) z vodo (H<sub>2</sub>O).

Osnovno vlogo pri strjevanju portland cementa imajo kalcijevi silikati, ki pri reakciji z vodo formirajo kalcijeve hidrosilikate.

**Beli portland cement** se proizvaja iz belega Portland cementnega klinkerja. Ta se pridobiva z žganjem krede in/ali belega apnenca ter gline (kaolina) z dodatkom gipsnega kamna (sdrovca). Za žganje se uporablja izključno nafta. Na ta način se izognemo prisotnosti pepela v klinkerju, ki bi se pojavil pri uporabi trdega goriva (premoga).

**Posebne vrste portland cementa** so:

- hidrofobni cement – maltam in betonom daje hidrofobni (vodoodbojni) učinek
- ekspanzivni cement – zaradi učinka ekspanzije izniči krčenje betona.
- zidarski cement

**Mešani cementi** (oznaka CEM II) so portland cementi z mineralnimi dodatki, med katere spadajo tudi granulirana plavžna žindra in naravni ali umetni pucolani.

Granulirana plavžna žindra se pridobiva z naglim ohlajevanjem odpadne žindre, ki nastaja pri proizvodnji železa v visokih pečeh. Po kemični sestavi je to mešanica kalcijevega, silicijevega in aluminijevega oksida. Podobno končno sestavo ima tudi portland cement. Učinek granulirane žindre v mešanih cementih je torej podoben samemu portland cementu, saj s hitrim hlajenjem žindre nastane formacija granulirane steklaste (amorfne) mase, ki zagotavlja dobre hidravlične lastnosti.

Naravna pucolana sta na primer vulkanski pepel in opalska breča, ki nastaneta zaradi hitrega ohlajevanja lave pri vulkanskih erupcijah.

Umetni pucolan je elektrofiltrski pepel, ki je preostanek po gorjenju v prah zmletoga premoga v termoelektrarnah.

Naravni in umetni pucolani so silikatni ali alumosilikatni materiali. Za njih je značilna pucolanska reakcija – reakcija ki poteka med aktivnimi sestavinami pucolanskega materiala, prostim apnom v betono in vodo. Težnja je, da imajo pucolani amorfno strukturo – velikost delcev mora biti enaka velikosti delcev cementa. Ta lastnost je tipična za elektrofiltrski pepel.

#### 2.4.1.2 ALUMINATNI CEMENTI

Aluminatni cementi se pridobivajo s taljenjem mešanice apnenca in boksita. Glavna hidravlična komponenta je monokalcijev aluminat ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ), ki ga je v cementu 40% ali več. Aluminatni cementi, z razliko od portland cementov, zelo hitro pridobivajo na trdnosti v normalnem času vezanja. V 12-tih do 24-tih urah dosežejo do 80% končne vrednosti tlačne trdnosti.

Aluminatni cementi so zelo odporni na visoke temperature, kar je posledica pregrupacije hidravlične vezi v keramično vez. Zaradi te lastnosti se aluminatni cementi najpogosteje uporabljajo pri izdelavi ognjevarnih betonov. Ti prenesejo tudi do 1800°C temperaturne obremenitve.

Slaba lastnost aluminatnih cementov je, da zaradi hitrega sproščanja hidratacijske toplote lahko pride do oblikovanja razpok v betonu.

Aluminatnega in portland cementa ne smemo mešati zaradi možnosti formiranja defektne porozne strukture betona.

#### 2.4.1.3 SESTAVA IN OZNAČEVANJE CEMENTOV PO SIST EN 197-1

Po navedenem standardu delimo cemente na pet glavnih vrst:

- CEM I portlandski cement,
- CEM II/A-X mešani portlandski cement z do 20% dodatka,
- CEM II/B-X mešani portlandski cement z 21 do 35% dodatka,
- CEM III žlindrin cement,
- CEM IV pucolanski cement,
- CEM V mešani cement.

Možni dodatki X: žlindra S, mikrosilika D, pucolan P ali Q, elektrofilitrski pepel V ali W, apnenec L ali LL.

#### 2.4.1.4 HIDRATACIJA CEMENTA

Hidrat nastane, če se na spojino kemično veže voda.

Pod pojmom hidratacija cementa razumemo celotno kemično reakcijo cementa z vodo. Ta obsega fizikalno kemijsko disperzijo delcev cementa v vodi, kemično reakcijo nastanka hidratov (čista hidratacija), pojav absorpcije in difuzije. Zaradi vseh omenjenih pojavov nastajajo strukture z znanimi mehanskimi lastnostmi. Hidratacija cementa je eksotermni proces, pri katerem se sprosti do 500 J toplote na gram cementa.

#### 2.4.2 VODA

Voda je pomembna komponenta vsake betonske mešanice, ki omogoča doseganje potrebne obdelavnosti v svežem betonu in proces hidratacije pri strjevanju betona.

Pri mešanju betona se lahko uporabi vsaka pitna voda iz vodovoda, brez dodatnih preiskav. Za vodo drugega izvora pa je potrebno pred uporabo opraviti preiskavo, ki dokazuje njeno neškodljivost za kakovost strjenega betona (vezanje, strjevanje, obstojnost, korozija armature).

Potrebno količino vode v kubičnem metru sveže betonske mešanice prikazuje naslednja enačba:

$$V = V_a + (V_p + \Delta V_p) + V_k + \Delta V_k \quad (4)$$

kjer je:

$V_a$  – voda, ki jo vpije agregat,

$V_p$  – voda, ki omoči površino agregata,

$\Delta V_p$  – dodatna voda, odvisna od oblike teksture in mineraloško petrografske sestave agregata,

$V_k$  – voda, potrebna za standardno konsistenco cementne paste,

$\Delta V_k$  – dodatna voda, potrebna za doseganje zahtevane konsistence betonske mešanice.

Proizvodnja samozgoščevalnega betona zahteva posebno pozornost pri doziranju vode. Prevelika količina vode povzroči segregacijo sveže betonske mešanice, premajhna količina pa zmanjšuje sposobnost tečenja samozgoščevalnega betona.

### 2.4.3 AGREGAT

Agregat v betonski mešanici predstavlja največji delež, zato s svojimi karakteristikami bistveno vpliva na lastnosti sveže betonske mešanice in strjenega betona.

Mineralni agregat kot osnova betonov se razlikuje glede na način pridobivanja.

Drobljenec, ki nastane z drobljenjem večjih kosov kamna, ima ostre robove, je nepravilnih oblik in ima pogosto manj trdna zrna zaradi notranjih razpok. Praviloma je enake mineralne sestave. Pri vgrajevanju se zrna medsebojno zaklinijo, kar rezultira v večji odpornosti betona na tlačno obremenitev. Danes je drobljen agregat bistveno cenejši od prodnatega, zato so betoni izdelani s tovrstnim agregatom praviloma tudi ekonomsko ugodnejši.

Prod je aluvialnega izvora in ima oble robove. Praviloma je raznolike mineralne sestave, kar je odvisno od izvora rečnih nanosov. Sam postopek pridobivanja proda je sicer cenejši od postopka pridobivanja drobljenega agregata, vendar pa je zaradi omejenih količin, ki se lahko pridobivajo v Sloveniji, njegova cena bistveno višja od cene drobljenega agregata. Zaobljena zrna prodnatega agregata omogočajo boljšo vgradljivost in obdelavnost sveže betonske mešanice.

Za izdelavo samozgoščevalnega betona se uporablja prod, drobljenec in kombinacija obeh. Pomembno je, da vedno uporabljamo separiran agregat, ki izpolnjuje zahteve veljavnih standardov (SIST EN 12620:2002 – Agregati za betone)

Običajno govorimo o grobem (zrna premera nad 4 mm) in drobnem agregatu (zrna premera pod 4 mm).

Velikost maksimalnega zrna agregata ( $D_{max}$ ) v betonu je odvisna od vrste in geometrije konstrukcije ter od gostote armature. Pri vibriranih betonih velikost največjega zrna ne sme presegati 25% najmanjše dimenzije prereza elementa. Posebna pozornost velja pri močno armiranih elementih, pri katerih največje zrno ne sme presegati najmanjše svetle razdalje med armaturnimi palicami, zmanjšane za 5 mm. Pri samozgoščevalnih betonih je priporočena velikost največjega zrna med 10 in 25 mm.

Omejevanje velikosti največjega zrna je posledica nevarnosti zaustavitve agregata na ovirah, ki jih predstavljajo ozki predeli opažev in gosto postavljene armaturne palice. Z večanjem maksimalnega zrna namreč narašča tudi nevarnost zaustavitve grobozrnatega materiala.



Zrnavostno sestavo agregata določimo s sejalno analizo po standardu SIST EN 933-1:1999, kjer suh agregat presejemo skozi sita z različnimi odprtini. Kumulativne presevke skozi sita (izražene v odstotkih) predstavimo v grafični obliki z zrnavostno krivuljo. Dobljena krivulja se mora praviloma nahajati v območju mejnih krivulj, ki jih določa standard SIST 1026:2004. Če se krivulja nahaja izven tega območja, je agregat praviloma neprimeren za izdelavo betona in ga je potrebno popraviti z dodajanjem ali odvzemanjem določenih frakcij. Če pa se krivulja nahaja v območju, določenem s standardom, opravimo raziskave. S temi raziskavami dokažemo ustrezno kakovost betona, izdelanega z obravnavanim agregatom. Po potrebi lahko spremenimo sestavo agregata z dodajanjem posameznih frakcij in tako izboljšamo lastnosti betona.

Ustrezno granuliran agregat dobro zapolnjuje celotno prostornino betona (nad 75%). To pomeni, da se pri ustrezni sestavi votline med posameznimi večjimi zrnji pravilno zapolnijo z manjšimi zrnji vse do najmanjših delcev. Tako je segregiranje sveže betonske mešanice onemogočeno.

Specifična površina agregatnih zrn določa količino paste, potrebne za njihovo povezovanje. Pri projektiranju betona je tako potrebno izdelati granulometrijsko sestavo betona, ki ustreza postavljenim zahtevam. Posebne lastnosti (boljšo vgradljivost) lahko dosežemo z opuščanjem samo določenih frakcij. Granulometrijske sestave lahko modificiramo tudi tako, da pustimo samo eno ali dve frakciji. Vse te modifikacije pa morajo biti podkrepljene s poskusi in preiščljene. Na ta način se izognemo povzročitvi resnih napak, ki se odražajo v segregaciji svežega betona ali v bistveni spremembi mehanskih lastnosti strjenega betona.

#### **2.4.4 DODATNI PRAŠKASTI MATERIALI**

Dodatni praškasti materiali (poleg cementa) so tisti mineralni dodatki, pri katerih premer delcev ne presega 0,125 mm. Delimo jih na mineralne dodatke tipa I in II (SIST EN 206-1:2003). Med mineralne dodatke tipa II (reaktivne dodatke) štejemo mleto granulirano žlindro, elektorfiltrski pepel in mikrosiliko. Mineralni dodatki tipa I pa so zmleti materiali iz apnenca, dolomita, kremenca, odpadnega stekla in podobno.

Pri dodatnih praškastih materialih igra pomembno vlogo tudi oblika delcev. Najugodnejša je okrogla oblika, saj kroglasti delci zmanjšajo notranje trenje v pasti, hkrati pa je njihova skupna površina pri dani prostornini najmanjša. S tega vidika sta najprimernejša elektrofilitrski pepel in mikrosilika. Manj primerni so kvadratasti delci apnenčastih, dolomitnih in kremenčastih kamenih mok.

Pomembna lastnost samozgoščevalnih betonov je viskoznost, ki mora biti tolikšna, da zagotavlja ustrezno obdelavnost in odpornost na segregacijo. To dosežemo z dodajanjem dodatnih praškastih materialov, s pomočjo katerih povečamo prostornino paste v betonski mešanici. Pri tem je potrebna večja količina vode, saj imajo praškasti materiali zaradi svoje finosti veliko specifično površino.

#### **2.4.5 KEMIJSKI DODATKI BETONU**

Kemijski dodatki betonu so snovi, ki omogočajo pripravo posebnih betonov, izboljšanje lastnosti sveže betonske mešanice, betoniranje v neugodnih vremenskih pogojih, zmanjšanje stroškov betonskih del in izboljšanje kvalitete strjenega betona. Osnovne skupine dodatkov so:

- Plastifikatorji in superplastifikatorji (povečajo plastičnost svežega betona in s tem zmanjšajo potrebo po vodi),
- sredstva za kontrolo viskoznosti (povečajo viskoznost betona),
- zavlačevalci vezanja (upočasniyo hidratacijo cementa),
- pospeševalci vezanja (pospešijo hidratacijo cementa),
- aeranti (izboljšajo odpornost strjenega betona na zmrzovanje),
- gostilci (povečujejo vodotesnost betona),
- dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah.

Za samozgoščevalne betone so najpomembnejši superplastifikatorji in sredstva za kontrolo viskoznosti.

#### 2.4.5.1 SUPERPLASTIFIKATORJI

Superplastifikatorji so dodatki, ki omogočajo izdelavo betonov bolj plastičnih ali tekočih konsistenc ter podaljšajo čas njihove obdelavnosti pri nespremenjeni količini vode. Lastnosti sveže betonske mešanice so odvisne predvsem od tipa superplastifikatorja, začetne konsistence betona in lastnosti cementnega veziva.

Za izdelavo samozgoščevalnih betonov se uporabljajo superplastifikatorji II. generacije, ki imajo močnejši učinek kot običajni superplastifikatorji. Superplastifikator II. generacije se absorbira na površino cementnih zrn in povzroča disperzijo le-teh z električnim in prostorskim odbojem. Na površini cementnih zrn se formirajo orientirane molekule vode, ki delujejo kot mazivo. Dolge polietilenske verige pa prostorsko preprečujejo združevanje cementnih delcev oziroma povečujejo obdelavnost svežega betona.

Uporaba superplastifikatorjev vpliva tudi na lastnosti strjenega betona. Zaradi boljše disperzije cementnih delcev se poveča stopnja hidratacije cementa, kar se kaže v večji gostoti strjene betonske mešanice.

#### 2.4.5.2 DODATKI ZA KONTROLO VISKOZNOSTI

Sredstva za kontrolo viskoznosti povečujejo stabilnost materialov na bazi cementa in preprečujejo ločevanje sestavin betona med prevozom. Pri samozgoščevalnih betonih zmanjšujejo potrebo po praškastih materialih, s pomočjo njih pa lahko izničimo tudi vpliv nihanja vlažnosti drobnozrnatega agregata na obdelavnost samozgoščevalnega betona.

Dolgoverižne molekule polimera se povežejo z molekulami vode tako, da fiksirajo del zmesne vode in preprečujejo izcejanje. Na ta način se poveča viskoznost sveže betonske mešanice. Pri samozgoščevalnih betonih, ki imajo tendenco segregiranja, se z dodajanjem sredstva za kontrolo viskoznosti dobi stabilna betonska mešanica.

## **2.5 PROJEKTIRANJE SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA**

Razvite so različne metode za projektiranje samozgoščevalnega betona. Razlikujejo se pretežno v uporabi različnih materialov. Vse znane metode dokazujejo, da je nemogoče proizvesti univerzalno mešanico, zaradi specifičnih značilnosti materialov v posameznih regijah. Zaradi velikega števila možnih kombinaciji materialov je zato pomembno najprej določiti karakteristike posameznih komponent in nato njihovo interakcijo. V laboratoriju se večji del preiskav opravlja na maltah, končne preiskave pa na betonskih mešanicah.

Pri projektiranju je poudarek predvsem na določanju ustreznih karakteristik sveže betonske mešanice. Za doseganje primerne obdelavnosti sveže mešanice je potrebno zagotoviti ustrezno količino paste ter pravilno razmerje med vodo in praškastimi delci. Končne karakteristike strjenega betona uravnava predvsem z razmerjem med posameznimi praškastimi materiali v samozgoščevalnem betonu.

## **2.6 MEŠANJE, TRANSPORTIRANJE IN VGRAJEVANJE SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA**

Pri mešanju betona je pomembna vrsta mešalca, saj vpliva na učinkovitost in čas mešanja (ta je pri nižjih temperaturah daljši).

Drugi faktor, ki lahko vpliva na lastnosti sveže betonske mešanice, je sosledje dodajanja posameznih materialov pri mešanju. Običajno v mešalec najprej doziramo agregat, cement in mineralni dodatek, ki se določen čas na suho mešajo. Nato se doda voda s kemijskimi dodatki. Količina vode ima velik vpliv na lastnosti betonske mešanice. Odvisna je predvsem od vlage v agregatu, zlasti v pesku. Na koncu mešanja se dodaja še voda za korekcijo konsistence.

Pri transportiranju betona na gradbišče igra pomembno vlogo čas transporta. Ta mora biti čim krajši (največ 60 minut), da se ne spremenijo lastnosti betonske mešanice. Obstaja tudi nevarnost segregacije med prevozom.

Proces vgrajevanja samozgoščevalnega betona je enostavnejši od vgrajevanja klasičnega betona, saj ne zajema mehanskega zgoščevanja (vibriranja). Izkušnje kažejo, da je horizontalno pot tečenja priporočljivo reducirati na 3 do največ 10 metrov, zaradi možnega pojava segregacije. Zaradi viskoznosti in sposobnosti tečenja samozgoščevalnega betona se pojavljajo večji pritiski betona na opaž. Ti so predvsem odvisni od vrste betona, oblike opaža, načina in hitrosti vgrajevanja ter drugih dejavnikov. Vsaka nepravilnost v izdelavi opaža je lahko usodna, saj zaradi velike sposobnosti prehajanja med ovirami beton prodre skozi odprtino in ga je skoraj nemogoče ustaviti.

### 3 STATISTIČNA ANALIZA

Statistično sem analiziral podatke o glavnih karakteristikah betona, ki je bil vgrajen v različnih elementih pokritega vkopa na hitrocestnem odseku Razdrto – Vipava. Gre za dve vrsti betona, za vibriranega in samozgoščevalnega. Na podlagi vrste betona in vsebnosti aeranta v betonu, sem betone razdelil v tri skupine:

- vibrirani beton ( 134 podatkov)
- samozgoščevalni beton z aerantom (13 podatkov) in
- samozgoščevalni beton brez aeranta (27 podatkov).

Vibriran beton je bil uporabljen pri gradnji večjega dela objekta. V tem delu samozgoščevalni beton ni bil potreben, saj je bilo omogočeno vibriranje. Vgrajeval se je beton trdnostnega razreda C25/30 z odpornostjo proti prodoru vode PV-II ( $e_{max} = 3$  cm).

Samozgoščevalni beton je bil uporabljen pri elementih objekta, ki so bolj obremenjeni in zato zahtevajo večjo količino armature. Vseboval je superplastifikator Glenium 51. Samo v določenih odsekih je bil vgrajen samozgoščevalni beton z dodatkom aeranta ETA S.

Za vse betone so bili na gradbišču odvzeti vzorci iz naključno izbranih mešalcev in vgrajeni v standardizirane kockaste kalupe velikosti 15/15/15 cm. Negovanje vzorcev in preverjanje tlačne trdnosti je potekalo v laboratoriju podjetja Primorje d.d. v Ajdovščini v skladu z veljavnimi standardi.

Statistično analizo sem glede na vsebino in statistične postopke razdelil na tri dele:

- V prvem delu sem za vsako skupino izračunal korelacijske koeficiente med glavnimi karakteristikami betona, to so tlačna trdnost, razlez in prostorninska masa. Poleg tega sem primerjal skupine betonov s testoma F in T. Pri tem sem preizkušal domneve o enakosti varianc in srednjih vrednosti.
- V drugem delu sem testiral porazdelitev podatkov tlačnih trdnosti za posamezne skupine. Za testiranje sem uporabil test  $\chi^2$  ter test Kolmogorova in Smirnova. Na podlagi uporabe omenjenih testov sem ugotavljal tudi njuno primernost za analizo vzorcev z manjšo populacijo.

- V tretjem delu sem določal karakteristične vrednosti oz. karakteristične tlačne trdnosti za posamezne skupine betonov.

### 3.1 KORELACIJE, PREIZKUSI DOMNEV O ENAKOSTI VARIANC IN SREDNJIH VREDNOSTI

#### 3.1.1 KORELACIJE

Z različnimi statističnimi metodami sem ugotavljal povezanost oz. medsebojno odvisnost posameznih lastnosti pri različnih skupinah betona.

Preverjal sem linearno povezanost med dvema slučajnima spremenljivkama, ki jo imenujemo tudi kovarianca. Oceno parametra korelacije sem izračunal s programom Microsoft Excel (v nadaljevanju Excel), z vgrajeno funkcijo CORREL.

V primeru, da je vrednost parametra korelacije blizu nič, lahko govorimo o zelo slabi linearni povezanosti. Če se vrednost parametra približuje ena, govorimo o močni linearni povezanosti, če pa se približuje vrednosti minus ena, sta spremenljivki močno negativno linearno povezani. O pravi linearni povezanosti lahko govorimo le v primeru, da je vzorec, ki ga preizkušamo dovolj velik in tako rezultat testa ni le srečno naključje.

V naslednjih preglednicah so prikazani dobljeni korelacijski koeficienti.

*Preglednica 1: Samozgoščevalni beton brez aeranta*

	Prostorninska masa	Tlačna trdnost	Razlez s posedom
Prostorninska masa	1,00	-0,32	-0,62
Tlačna trdnost		1,00	0,35
Posed			1,00

*Preglednica 2: Samozgoščevalni beton z aerantom*

	Prostorninska masa	Tlačna trdnost	Razlez s posedom
Prostorninska masa	1,00	0,07	0,25
Tlačna trdnost		1,00	0,61
Posed			1,00

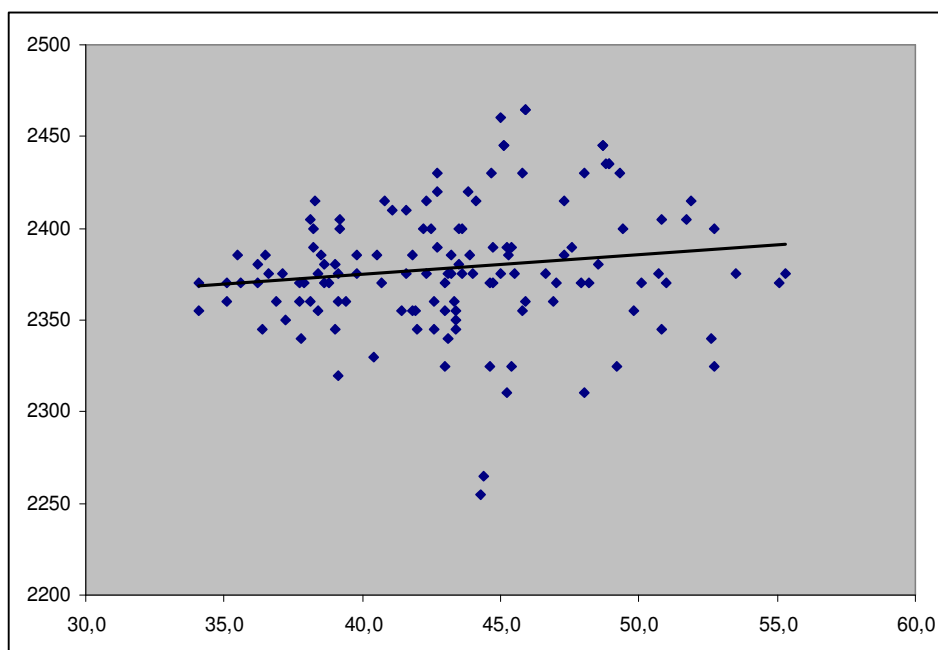
**Preglednica 3: Vibrirani beton**

	Prostorninska masa	Tlačna trdnost	Posed
Prostorninska masa	1,00	0,14	-0,32
Tlačna trdnost		1,00	-0,22
Posed			1,00

O linearni povezanosti dveh parametrov bi lahko govoril le v primeru, ko bi mi to pokazali rezultati pri vseh treh vrstah betona ali v primeru, ko bi bil parameter korelacije blizu števila 1 ali  $-1$  in bi bil vzorec dovolj velik.

V mojem primeru sem pri vibriranem betonu izračunal korelacijske koeficiente, ki imajo nizke vrednosti (kar kaže na nizko povezanost med karakteristikami betona), vendar se njihovi predznaki skladajo z mojimi predpostavkami. Po pričakovanjih se je izkazalo, da sta na primer tlačna trdnost in posed obratno sorazmerno povezana. Večji kot je posed manjša je tlačna trdnost, in obratno.

Sledi prikaz raztrosa rezultatov z razsevnim grafom, ki prikazuje visoko razpršenost rezultatov za povezanost dveh karakteristik betona.



**Slika 7:** Prikaz raztrosa podatkov za korelacijo tlačna trdnost – prostorninska masa, za vibrirani beton (parameter korelacije je 0,14).

Pri skupinah samozgoščevalnih betonov se je samo v primeru korelacije med tlačno trdnostjo in posedom z razlezom pokazal isti predznak (preglednica 1 in 2). Vzorca oz. skupini betonov



sta premajhni za potrditev linearne povezanosti med omenjenima karakteristikama. Taka smer povezanosti, bi bila vsekakor zanimiva ugotovitev o lastnosti samozgoščevalnih betonov, kar bi veljalo preveriti na večjem številu podatkov. Ostale korelacije imajo nasprotno predznake pri primerjavi istih lastnosti za obe skupini samozgoščevalnih betonov. To kaže na veliko nezanesljivost dobljenih rezultatov.

### 3.1.2 PREIZKUS ENAKOSTI VARIANC (TEST F)

Test F uporabljamo za preverjanje skladnosti variance dveh vzorcev. S tem testiramo, pri katerem vzorcu so rezultati bolj razpršeni oziroma, če sta si varianci dveh vzorcev enaki.

Za izvedbo testa sem uporabljal v Excelu vgrajeno funkcijo FTEST. Test vrne enostransko verjetnost, da ob zavrnitvi ničelne domneve storimo napako. V mojem primeru sem primerjal vse tri vzorce oziroma skupine betonov med seboj.

Postavil sem ničelne in alternativne domneve in izračunal dejanske stopnje tveganja ob zavrnitvi ničelne domneve:

1.  $H_0$  : Varianca vzorca vibriranega betona je enaka varianci vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

$H_1$  : Varianca vzorca vibriranega betona ni enaka varianci vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

Na podlagi izračunanih varianc za vibrirani beton (4,8) in samozgoščevalni beton brez aeranta (6,5), moram zavrniti  $H_0$ . Dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,03.

2.  $H_0$  : Varianca vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom je enaka varianci vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

$H_1$  : Varianca vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom ni enaka varianci vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

Na podlagi izračunanih varianc za samozgoščevalni beton z aerantom (5,8) in samozgoščevalni beton brez aeranta (6,5), ne morem zavrniti  $H_0$ . Dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,68.

3.  $H_0$  : Varianca vzorca vibriranega betona je enaka varianci vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom.

$H_1$  : Varianca vzorca vibriranega betona ni enaka varianci vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom.

Na podlagi izračunanih varianc za vibrirani beton (4,8) in samozgoščevalni beton z aerantom (5,8), ne morem zavrniti  $H_0$ . Dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,31.

Vidimo, da si varianci vzorcev samozgoščevalnih betonov (z in brez aeranta) nista statistično značilno različni (dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,68). Podobno lahko trdim tudi za vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom in vibriranega betona, vendar je skladnost manjša (dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,3).

### **3.1.3 PREIZKUS ENAKOSTI SREDNJIH VREDNOSTI (TEST T)**

Test T uporabljamo za preverjanje, če sta srednji vrednosti dveh vzorcev enaki.

Test sem izvedel s funkcijo TTEST, ki je vgrajena v program Excel. Zopet sem postavil ter preveril ničelne in alternativne domneve.

1.  $H_0$  : Srednja vrednost vzorca vibriranega betona je enaka srednji vrednosti vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

$H_1$  : Srednja vrednost vzorca vibriranega betona ni enaka srednji vrednosti vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

Na podlagi izračunanih srednjih vrednosti za vibrirani beton (43,4) in samozgoščevalni beton brez aeranta (58,4), lahko zavrnem  $H_0$ . Dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,00.

2.  $H_0$  : Srednja vrednost vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom je enaka srednji vrednosti vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

$H_1$  : Srednja vrednost vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom ni enaka srednji vrednosti vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta.

Na podlagi izračunanih srednjih vrednosti za samozgoščevalni beton z aerantom (49,9) in samozgoščevalni beton brez aeranta (58,4), lahko zavrnem  $H_0$ . Dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,00.

3.  $H_0$  : Srednja vrednost vzorca vibriranega betona je enaka srednji vrednosti vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom.

$H_1$  : Srednja vrednost vzorca vibriranega betona ni enaka srednji vrednosti vzorca samozgoščevalnega betona z aerantom.

Na podlagi izračunanih srednjih vrednosti za vibrirani beton (43,4) in samozgoščevalni beton z aerantom (49,9), moram zavrniti  $H_0$ . Dejansko tveganje ob zavrnitvi ničelne domneve je 0,00.

Rezultati testa so pokazali, da lahko z zelo majhnim tveganjem trdim, da so si srednje vrednosti vseh treh vzorcev statistično značilno različne. To pomeni, da se srednje vrednosti za vse tri vrste betona, razlikujejo med seboj.

### **3.2 PREIZKUŠANJE DOMNEV O PORAZDELITVI TLAČNIH TRDNOSTI BETONOV**

Na podlagi teoretičnih predpostavk o porazdeljevanju betona sem preverjal skladnost med porazdelitvijo tlačnih trdnosti betona posameznih vzorcev (skupin) in normalno, logaritemsko normalno ter Gumbelovo porazdelitvijo.

Postavil sem naslednje ničelne in alternativne domneve:

1.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona brez aeranta se porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona brez aeranta se ne porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.
2.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona brez aeranta se porazdeljujejo po logaritemsko normalni porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona brez aeranta se ne porazdeljujejo po logaritemsko normalni porazdelitvi.
3.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona brez aeranta se porazdeljujejo po Gumbelovi porazdelitvi.

- $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona brez aeranta se ne porazdeljujejo po Gumbelovi porazdelitvi.
4.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona z aerantom se porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona z aerantom se ne porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.
5.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona z aerantom se porazdeljujejo po logaritemsko normalni porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona z aerantom se ne porazdeljujejo po logaritemsko normalni porazdelitvi.
6.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona z aerantom se porazdeljujejo po Gumbelovi porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona z aerantom se ne porazdeljujejo po Gumbelovi porazdelitvi.
7.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti vibriranega betona se porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti vibriranega betona se ne porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.
8.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti vibriranega betona se porazdeljujejo po logaritemsko normalni porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti vibriranega betona se ne porazdeljujejo po logaritemsko normalni porazdelitvi.
9.  $H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti vibriranega betona se porazdeljujejo po Gumbelovi porazdelitvi.  
 $H_1$ : Podatki tlačnih trdnosti vibriranega betona se ne porazdeljujejo po Gumbelovi porazdelitvi.

V nadaljevanju bom na kratko opisal omenjene porazdelitve in najpomembnejše formule, ki sem jih pri izračunih uporabil.

### Normalna porazdelitev:

Normalna porazdelitev je najpomembnejša oziroma najpogosteje uporabljena porazdelitev v statistiki, saj marsikatera količina predstavlja vsoto mnogih drugih in je zato vsaj približno normalno porazdeljena.

Pomembna enačba, ki sem jo uporabljal pri preverjanju skladnosti porazdelitve je enačba porazdelitvene funkcije

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tilde{x}-m_X}{\sigma_X}\right)^2} d\tilde{x}. \quad (5)$$

Integrala v zgornji enačbi običajno ne moremo rešiti, zato lahko vrednosti porazdelitvene funkcije določimo le numerično. Funkcija je vgrajena tudi v program Excel, ki sem ga uporabljal (funkcija NORMDIST).

### Logaritemsko normalna porazdelitev :

Logaritemsko normalna porazdelitev je zelo razširjena v inženirstvu. Najbolj značilni primeri količin, ki se porazdeljujejo logaritemsko normalno so velikost delcev agregata pri drobljenju, trdnost nekaterih materialov, magnituda potresov in podobno. Je zvezna porazdelitev, pri kateri se logaritem slučajne spremenljivke porazdeljuje normalno ( $\ln Y = X$ ). Podobno kot pri normalni porazdelitvi, tudi pri logaritemsko normalni porazdelitvi ne poznamo funkcije  $F_Y(y)$  v analitični obliki, vendar je tudi ta vgrajena v Excel (LOGNORMDIST).

$$F_Y(y) = \int_0^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln y}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \tilde{y} - \ln \tilde{m}_y}{\sigma_{\ln y}}\right)^2} \frac{1}{\tilde{y}} d\tilde{y}. \quad (6)$$

### Gumbelova porazdelitev:

Tudi Gumbelova porazdelitev je razširjena v inženirstvu. Spada namreč v skupino porazdelitev ekstremnih vrednosti. Primer, ko nas zanimajo le ekstremne vrednosti slučajne spremenljivke, je npr. trdnost materiala. Tu nas namreč zanima le porazdelitev najnižjih vrednosti trdnosti materiala in ne vseh poljubnih trdnosti.

Ločimo porazdelitev maksimuma (na zgornjem repu porazdelitve) in porazdelitev minimuma (na spodnjem repu porazdelitve). Obe porazdelitvi sta asimetrični in zrcalni.

Porazdelitvena funkcija maksimuma:

$$F_Y(y) = e^{-e^{-\alpha(y-u)}}, \quad -\infty < y < \infty \quad (7)$$

Porazdelitvena funkcija minimuma:

$$F_Z(z) = 1 - e^{-e^{-\alpha(z-u)}}, \quad -\infty < z < \infty \quad (8)$$

kjer je  $\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma_z}$ ,  $u = m_Y + \frac{\gamma}{\alpha}$  in  $\gamma \approx 0.577216$

Pri vseh treh porazdelitvah nastopata v enačbah za porazdelitveno funkcijo dva parametra, in sicer pričakovana vrednost ter standardna deviacija.

### 3.2.1 TESTIRANJE SKLADNOSTI PORAZDELITEV S TESTOM HI KVADRAT ( $\chi^2$ )

Domneve o skladnosti med porazdelitvijo tlačnih trdnosti betona posameznih skupin in normalno, logaritemsko normalno ter Gumbelovo porazdelitvijo sem najprej preizkušal s testom  $\chi^2$ .

Test  $\chi^2$  se uporablja za preizkušanje zelo različnih domnev. Najpogosteje se uporablja pri preizkušanju ali vzorec ustreza predpostavljeni porazdelitvi ter pri preverjanju statistične odvisnosti. Test temelji na primerjavi dejansko dobljenih rezultatov s teoretično pričakovanimi rezultati. Za zanesljivost testa je potrebno zadostno število podatkov. Poleg tega so rezultati, dobljeni s testom  $\chi^2$ , odvisni tudi od razporejanja mej razredov.

Pri izvedbi testa  $\chi^2$  sem število razredov izračunal po Sturgesovi formuli  $k = 1 + 3,32 \log n$ . Meje razredov sem najprej določal subjektivno, glede na to, da ne obstaja točno določeno pravilo o postavljanju mej. Teoretične vrednosti posameznih razredov sem izračunal z enačbami (5, 6, 8) za porazdelitveno funkcijo, odvisno od testirane porazdelitve. Statistiko H pa sem izračunal po enačbi

$$H = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - \hat{n}_i)^2}{n_i}, \quad (9)$$

kjer je  $\hat{n}_i$  število elementov v posameznem razredu in  $n_i$  teoretično število elementov v posameznem razredu.

Določil sem tudi dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ). Za določitev le-te je možnih več načinov. Lahko jo odčitamo iz tabel, ki so prisotne v večini statističnih priročnikov, na podlagi

vrednosti statistike  $H$  in števila prostostnih stopenj  $v$ . Drugi način je s programom Excel in sicer z vgrajeno funkcijo CHIDIST.

Na podlagi dobljenih rezultatov sem ugotovil, da je test  $\chi^2$  nezanesljiv pri testiranju skladnosti porazdelitve majhnih vzorcev (populacija se je gibala med 13 in 134 podatki).

Tudi premikanje mej razredov je bistveno vplivalo na končni rezultat ( $\alpha_{dej}$ ). V pojasnilo navedenega sledi prikaz rezultatov za testiranje skladnosti skupine samozgoščevalnega betona brez aeranta z Gumbelovo porazdelitvijo s testom  $\chi^2$ . In sicer so v spodnjih preglednicah prikazani izračuni testa  $\chi^2$  v primeru dveh izmed več subjektivno določenih mej.

**Preglednica 4:** Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev s prvo varianto določitve mej za vzorec s 27 podatki.

razred	meje razreda		velikost razreda	P[X<x] za max vrednosti	P[znotraj razreda]	teoretične velikosti razredov
1	$-\infty$	47,00	2	0,06	0,06	1,56
2	47,00	54,00	2	0,21	0,15	4,13
3	54,00	58,00	11	0,41	0,20	5,28
4	58,00	62,00	8	0,68	0,28	7,47
5	62,00	70,00	2	1,00	0,31	8,45
6	70,00	$+\infty$	2		0,00	0,10

$H = 47,86$  in  $\alpha_{dej} = 0\%$

**Preglednica 5:** Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev z drugo varianto določitve mej za vzorec s 27 podatki.

razred	meje razreda		velikost razreda	P[X<x] za max vrednosti	P[znotraj razreda]	teoretične velikosti razredov
1	$-\infty$	50,00	3	0,10	0,10	2,75
2	50,00	54,00	3	0,21	0,11	2,94
3	54,00	58,00	8	0,41	0,20	5,28
4	58,00	62,00	6	0,68	0,28	7,47
5	62,00	66,00	4	0,92	0,24	6,41
6	66,00	$+\infty$	3		0,08	2,14

$H = 2,96$  in  $\alpha_{dej} = 40\%$

Iz zgornjih dveh tabel je razvidno, da sprememba mej razredov vpliva na velikost razredov (dejansko in teoretično) in posledično na končni rezultat testa  $\chi^2$  ter na dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ). Že pri majhni spremembi mej se je dejanska stopnja tveganja spremenila od 0% na 40%, kar kaže na veliko nezanesljivost testa  $\chi^2$  pri majhnih vzorcih.

Omenjeni vpliv se je pokazal pri vseh skupinah in za vse porazdelitve, tudi pri največji skupini s 134 podatki. Sledita prikaza testa  $\chi^2$  z dvema variantama subjektivne določitve mej, pri testiranju skladnosti porazdelitve največje skupine betona z normalno porazdelitvijo.

**Preglednica 6:** Test  $\chi^2$  za normalno porazdelitev s prvo varianto določitve mej za vzorec s 134 podatki

razred	meje razreda		velikost razreda	P[X<x] za max vrednosti	P[znotraj razreda]	teoretične velikosti razredov
1	$-\infty$	35,00	2	0,04	0,04	5,42
2	35,00	37,50	12	0,11	0,07	9,41
3	37,50	40,00	25	0,24	0,13	17,57
4	40,00	42,50	16	0,43	0,19	25,12
5	42,50	45,00	33	0,63	0,21	27,52
6	45,00	47,50	18	0,81	0,17	23,08
7	47,50	50,00	15	0,92	0,11	14,83
8	50,00	$+\infty$	13		0,08	11,05

$H = 4,97$  in  $\alpha_{dej} = 42\%$

**Preglednica 7:** Test  $\chi^2$  za normalno porazdelitev z drugo varianto določitve mej za vzorec s 134 podatki.

razred	meje razreda		velikost razreda	P[X<x] za max vrednosti	P[znotraj razreda]	teoretične velikosti razredov
1	$-\infty$	35,00	2	0,04	0,04	5,42
2	35,00	38,17	18	0,14	0,07	13,24
3	38,17	41,33	24	0,34	0,13	26,43
4	41,33	44,50	37	0,59	0,19	34,60
5	44,50	47,67	26	0,82	0,21	29,69
6	47,67	50,83	18	0,94	0,17	16,71
7	50,83	54,00	7	0,99	0,18	6,16
8	54,00	$+\infty$	2		0,01	1,75

$H = 11,98$  in  $\alpha_{dej} = 4\%$



Iz zgornjih preglednic je razvidno, da tudi pri večjih vzorcih že majhna sprememba mej vpliva na dejansko stopnjo tveganja. Zaradi majhnega premika zgornje meje se je dejanska stopnja tveganja spremenila iz 42% na 4%.

Na podlagi dejstva, da opisan subjektivni način določanja mej ni primeren, sem želel poiskati primernejši način. Kot najprimernejše in tudi najmanj pristransko se je izkazalo določanje mej pri katerem so teoretične velikosti razredov konstantne. Z inverzno funkcijo porazdelitvene funkcije posamezne porazdelitve sem najprej izračunal meje razredov, tako da so bile verjetnosti za vse razrede enake in seveda odvisne od števila razredov. Ker morajo biti verjetnosti, da podatek pade v posamezen razred, enake za vse razrede, so tudi teoretične vrednosti za vse razrede enake (konstantne). Meje razredov izračunane po tej metodi so nepristranske, saj so izračunane na podlagi pričakovane vrednosti, standardne deviacije in števila razredov.

Na ta način sem še enkrat preveril skladnost porazdelitve vseh treh skupin betonov z normalno, logaritemsko normalno in Gumbelovo porazdelitvijo.

V primeru normalne in logaritemsko normalne porazdelitve sem inverzno funkcijo porazdelitvene funkcije normalno/logaritemsko normalno porazdeljene slučajne spremenljivke izračunal z Excelovim orodjem NORMINV/LOGINV.

Pri logaritemsko normalni porazdelitvi je bilo potrebno najprej določiti parametra porazdelitve  $\tilde{m}_Z$  in  $\sigma_{\ln Z}$ , po enačbah:

$$\tilde{m}_Z = m_Z e^{-\frac{1}{2}\sigma_{\ln Z}^2}, \quad \sigma_{\ln Z}^2 = \ln\left(\frac{\sigma_Z^2}{m_Z^2} + 1\right) \quad (10)$$

V primeru Gumbelove porazdelitve pa z izračunom inverzne funkcije:

$$F_Z(z) = e^{-e^{-\alpha(z-u)}} \quad \rightarrow \quad z = u - \frac{1}{\alpha} \ln(-\ln(F_Z(z))), \quad (11)$$

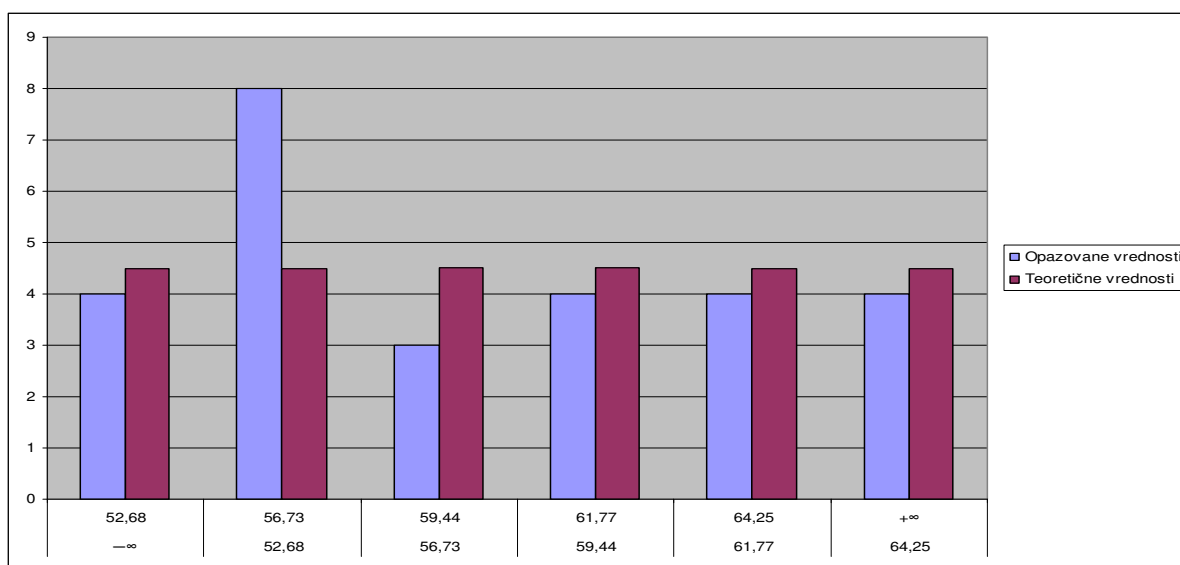
kjer je  $\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma_Z}$  in  $u = m_Z + \frac{\gamma}{\alpha}$ .

V nadaljevanju sta prikazana preglednica in histogram izračuna testa  $\chi^2$  za testiranje skladnosti porazdelitve samozgoščevalnega betona brez aeranta z Gumbelovo porazdelitvijo, z uporabo zgoraj opisanega nepristranskega načina določanja mej.

**Preglednica 8:** Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev nepristranskim načinom določitve mej za vzorec s 27 podatki.

razred	meje razreda		velikost razreda	P[X<x] za max vrednosti	P[znotraj razreda]	teoretične velikosti razredov
1	$-\infty$	52,68	4	0,17	0,17	4,50
2	52,68	56,73	8	0,33	0,17	4,50
3	56,73	59,44	3	0,50	0,17	4,50
4	59,44	61,77	4	0,67	0,17	4,50
5	61,77	64,25	4	0,83	0,17	4,50
6	64,25	$+\infty$	4		0,17	4,50

$H = 3,44$  in  $\alpha_{dej} = 33\%$



**Slika 8:** Test  $\chi^2$  za Gumbelovo porazdelitev nepristranskim načinom določitve mej za vzorec s 27 podatki.

Rezultati testa  $\chi^2$  z navedeno metodo za določanje mej razredov so pokazali, da lahko z najmanjšim dejanskim tveganjem trdimo, da so vzorci porazdeljeni normalo, kar sicer ni značilno za porazdelitve tlačnih trdnosti betonov. To me je presenetilo predvsem pri vzorcu vibriranega betona s 134 podatki. Pri tako velikem vzorcu bi namreč pričakoval, da se bodo

tlačne trdnosti porazdeljevale po porazdelitvi, ki je značilna za tlačne trdnosti (to je asimetrična porazdelitev, npr. porazdelitev ekstremnih vrednosti).

Rezultati dobljeni z nepristranskim določanjem mej za dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ), so predstavljeni v spodnji preglednici:

**Preglednica 9:** Vrednosti dejanskega tveganja  $\alpha_{dej}$  za test  $\chi^2$ .

	Test - $\chi^2$		
	normalna	logaritemsko normalna	Gumbelova
samozgoščevalni beton brez aeranta	55%	33%	33%
samozgoščevalni beton z aerantom	54%	37%	25%
vibrirani beton	34%	26%	0%

Rezultate o porazdelitvi tlačnih trdnosti betonov sem želel preveriti še z enim testom. Izbral sem si test Kolmogorova in Smirnova.

### 3.2.2 TESTIRANJE SKLADNOSTI PORAZDELITEV S TESTOM KOLMOGOROVA IN SMIRNOVA

Test Kolmogorova in Smirnova se uporablja za ugotavljanje, če vzorec izhaja iz populacije z določeno porazdelitvijo. Njegova prednost je v tem, da podatkov ni potrebno razvrščati v razrede ter da je primeren tudi za manjše vzorce. Test temelji na porazdelitveni funkciji  $F_X(x)$  in empirični porazdelitveni funkciji  $F_X^*(x)$ . Slednja ni odvisna od osnovne kumulativne porazdelitvene funkcije, ki jo testiramo. Vrednosti elementov vzorca  $x_j, j=1, \dots, n$  namreč razvrstimo po velikosti od najmanjše proti največji in tvorimo empirično porazdelitveno funkcijo

$$F_X^*(x_j) = \frac{j}{n} \quad (12)$$

kjer je  $j$  predstavlja zaporedno številko elementa v razvrščenem vzorcu.

Podatke za posamezno skupino betona sem razporedil po velikosti, izračunal empirično porazdelitveno funkcijo ter porazdelitveno funkcijo vzorca. Na podlagi statistike  $D$ , ki je največja razlika med porazdelitveno funkcijo vzorca in empirično funkcijo, sem izračunal dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ).

Izkazalo se je, da je test Kolmogorova in Smirnova v mojem primeru neprimeren za testiranje skladnosti porazdelitev. Vrednosti  $D_{max}$ , ki predstavljajo največjo razliko (odstopanje) porazdelitvene funkcije vzorca in empirične porazdelitvene funkcije, so zelo majhne. Tako so izračunani rezultati za dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ) nepomembni.

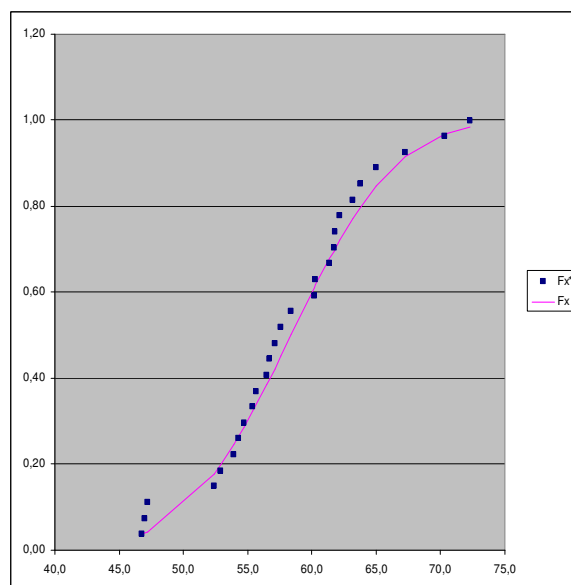
Kot pojasnilo sledi prikaz dobljenih rezultatov testa Kolmogorova in Smirnova za testiranje skladnosti vzorca vzorca samozgoščevalnega betona brez aeranta z normalno porazdelitvijo.

**Preglednica 10: Test Kolmogorova in Smirnova**

za normalno porazdelitev vzorca s 27 podatki

$j..n$	$i$	$F_X^*$	$F_X$	$D_i =  F_X^* - F_X $
1	46,8	0,04	0,04	0,00
2	47,0	0,07	0,04	0,03
3	47,2	0,11	0,04	<b>0,07</b>
4	52,4	0,15	0,18	0,03
5	52,9	0,19	0,20	0,01
6	53,9	0,22	0,25	0,02
7	54,3	0,26	0,27	0,01
8	54,7	0,30	0,29	0,01
9	55,4	0,33	0,32	0,01
10	55,7	0,37	0,34	0,03
11	56,5	0,41	0,39	0,02
12	56,7	0,44	0,40	0,05
13	57,1	0,48	0,42	0,06
14	57,6	0,52	0,45	0,07
15	58,4	0,56	0,50	0,05
16	60,2	0,59	0,61	0,02
17	60,3	0,63	0,62	0,01
18	61,4	0,67	0,68	0,01
19	61,7	0,70	0,70	0,01
20	61,8	0,74	0,70	0,04
21	62,2	0,78	0,72	0,06
22	63,2	0,81	0,77	0,04
23	63,8	0,85	0,80	0,05
24	65,0	0,89	0,85	0,04
25	67,3	0,93	0,92	0,01
26	70,3	0,96	0,97	0,00
27	72,3	1,00	0,98	0,02

$D_{max} = 0,07$  in  $\alpha_{dej} = 100\%$



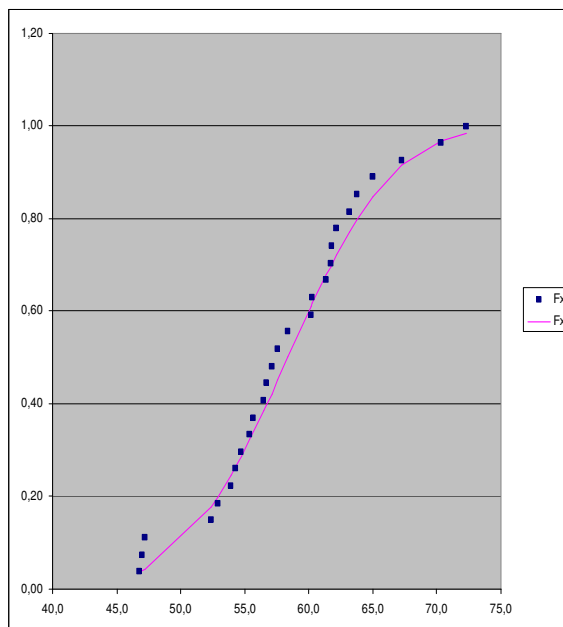
**Slika 9: Prikaz rezultatov testa Kolmogorova in Smirnova za normalno porazdelitev vzorca s 27 podatki.**

Iz zgornje preglednice je razvidno, da je rezultat testa pokazal zelo visoko stopnjo dejanskega tveganja, kar potrjuje majhno odstopanje porazdelitvene funkcije vzorca od empirične porazdelitvene funkcije. Podoben rezultat sem dobil tudi pri preverjanju skladnosti porazdelitve istega vzorca z logaritemsko normalno porazdelitvijo (glej preglednico 11 in sliko 10).

**Preglednica 11:** Test Kolmogorova in Smirnova za logaritemsko normalno porazdelitev vzorca s 27 podatki.

$j..n$	$i$	$F_X^*$	$F_X$	$D_i =  F_X^* - F_X $
1	46,8	0,04	0,03	0,01
2	47	0,07	0,03	0,05
3	47,2	0,11	0,03	<b>0,08</b>
4	52,4	0,15	0,18	0,03
5	52,9	0,19	0,20	0,02
6	53,9	0,22	0,25	0,03
7	54,3	0,26	0,28	0,02
8	54,7	0,30	0,30	0,00
9	55,4	0,33	0,34	0,01
10	55,7	0,37	0,36	0,01
11	56,5	0,41	0,41	0,00
12	56,7	0,44	0,42	0,03
13	57,1	0,48	0,44	0,04
14	57,6	0,52	0,47	0,04
15	58,4	0,56	0,52	0,03
16	60,2	0,59	0,63	0,04
17	60,3	0,63	0,64	0,01
18	61,4	0,67	0,70	0,03
19	61,7	0,70	0,71	0,01
20	61,8	0,74	0,72	0,03
21	62,2	0,78	0,74	0,04
22	63,2	0,81	0,78	0,03
23	63,8	0,85	0,80	0,05
24	65	0,89	0,85	0,04
25	67,3	0,93	0,91	0,02
26	70,3	0,96	0,96	0,00
27	72,3	1,00	0,98	0,02

$D_{max} = 0,08$  in  $\alpha_{dej} = 99\%$



**Slika 10:** Prikaz rezultatov testa Kolmogorova in Smirnova za logaritemsko normalno porazdelitev vzorca s 27 podatki.

Na podlagi prikazanih rezultatov lahko trdim, da je vzorec porazdeljen normalno z dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ) 100% in hkrati porazdeljen logaritemsko normalno z dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ) 99%, kar kaže na nezanesljivost testa. To lahko pripišemo predvsem dejstvu, da je test Kolmogorova in Smirnova primeren zlasti za zvezne porazdelitve, katerih parametre poznamo. Če moramo parametre predpostavljene porazdelitve oceniti iz vzorca, test ne da točne ocene tveganja pri zavrnitvi ničelne domneve. V mojem primeru sem parametre porazdelitve izračunal iz vzorca, kar je vsekakor zmanjšalo točnost ocene tveganja.

V mojem primeru lahko predvidevam, da bi mi test Anderson-Darling podal bolj zanesljive rezultate.

### 3.2.3 PRIMERJAVA TESTOV

Dobljeni rezultati za dejansko stopnjo tveganja ( $\alpha_{dej}$ ) so predstavljeni v spodnji preglednici:

*Preglednica 12: Vrednosti dejanske stopnje tveganja ( $\alpha_{dej}$ ) za test  $\chi^2$  in test Kolmogorova in Smirnova*

	Test $\chi^2$			Test Kolmogorov-Smirnov		
	normalna	logaritemsko normalna	Gumbelova	normalna	logaritemsko normalna	Gumbelova
samozgoščevalni beton brez aeranta	<b>55%</b>	33%	33%	100%	99%	67%
samozgoščevalni beton z aerantom	<b>54%</b>	37%	25%	98%	96%	98%
vibrirani beton	<b>34%</b>	26%	0%	100%	100%	63%

Na podlagi testiranja treh vzorcev (skupin betonov) z različnim številom podatkov (13, 27, 134) za tri predpostavljene porazdelitve (normalna, logaritemsko normalna, Gumbelova) s testoma  $\chi^2$  in Kolmogorov – Smirnov sem ugotovil, da so najbolj merodajni rezultati dobljeni s testom  $\chi^2$ . In sicer z metodo določanja mej pri kateri so teoretične vrednosti razredov konstantne.

Test  $\chi^2$  je pokazal, da se podatki vseh treh vzorcev porazdeljujejo normalno. To dejstvo nakazuje tudi test Kolmogorova in Smirnova, čeprav pri dveh vzorcih kaže tudi na možnost logaritemsko normalne porazdelitve. Druga asimetrična porazdelitev, to je Gumbelova porazdelitev, najmanj sovпада s porazdelitvijo vzorcev.

Na podlagi povedanega ne morem zavrniti naslednjih ničelnih domnev, navedenih na začetku tega poglavja:

$H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona brez aeranta se porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.

$H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti samozgoščevalnega betona z aerantom se porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.

$H_0$ : Podatki tlačnih trdnosti vibriranega betona se porazdeljujejo po normalni porazdelitvi.

### 3.3 DOLOČITEV KARAKTERISTIČNE TLAČNE TRDNOSTI

Karakteristične vrednosti vseh parametrov, ki jih uporabljamo v dimenzioniranju konstrukcij, so običajno definirane kot določen kvantil slučajne spremenljivke, ki predstavlja obravnavano količino.

Karakteristično vrednost lahko preprosto določimo, vendar moramo pri tem upoštevati več predpostavk. In sicer moramo predpostaviti porazdelitev vzorca ter iz vzorca oceniti srednjo vrednost in varianco. Karakteristične vrednosti zato tudi ne moremo določiti točno, ampak lahko ugotovimo le njeno oceno, ki je slučajna spremenljivka.

Za določanje ocene karakteristične vrednosti obstaja več metod. Pri metodi, ki sem jo uporabil - določanje karakterističnih vrednosti iz relativno majhnih vzorcev (Zupan in Turk, 2000), določimo točkovno in intervalno oceno karakteristične vrednosti. Pri točkovni oceni določimo mediano karakteristične vrednosti. Pri intervalni oceni pa določimo območje, za katerega lahko z določeno zanesljivostjo trdimo, da vključuje pravo karakteristično vrednost.

Slučajne spremenljivke lahko opišemo s porazdelitvijo, z momenti (srednja vrednost in varianca) in s kvantili slučajne spremenljivke. Kvantil slučajne spremenljivke je tista vrednost  $x_\alpha$ , za katero velja, da je verjetnost, da je slučajna spremenljivka manjša od nje, enaka  $\alpha$ .

$$P[X < x_\alpha] = F_X(x_\alpha) = \alpha \quad \rightarrow \quad x_\alpha = F_X^{-1}(\alpha) \quad (13)$$

V praksi točnih vednosti pričakovane vrednosti ( $m_X$ ) in standardne deviacije ( $\sigma_X$ ) ne poznamo in ju moramo določiti iz vzorca. Tako lahko namesto točnih vrednosti dobimo le njune ocene. Tudi ocena karakteristične vrednosti je slučajna spremenljivka z oznako  $\hat{X}_\alpha$ . Za vsak izbran interval zaupanja  $\alpha_\lambda$ , lahko oceno karakteristične vrednosti  $\hat{X}_\alpha$ , določimo po enačbi:

$$P[\hat{X}_\alpha < x_\alpha] = 1 - \alpha_\lambda \quad (14)$$

Ocene karakterističnih vrednosti so odvisne predvsem od porazdelitve. Zato je potrebno posamezne porazdelitve obravnavati ločeno.

Kako lahko približek karakteristične vrednosti določimo iz vzorca?

Naj bosta  $n$  velikost vzorca in  $X_i$   $i$ -ti podatek iz vzorca. Oceno za srednjo vrednost imenujemo povprečje, varianco pa varianca vzorca in ju določimo po naslednjih enačbah:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad S_X^{*2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (15)$$

$\bar{X}$  in  $S_X^{*2}$  sta nepristranski oceni parametrov  $m_X$  in  $\sigma_x^2$ . Iz zgornje (15) enačbe je očitno, da sta  $\bar{X}$  in  $S_X^{*2}$  slučajni spremenljivki, odvisni od porazdelitve slučajne spremenljivke  $X$ . Ocena karakteristične vrednosti mora zato temeljiti na povprečju in varianci vzorca, ker sta parametra  $m_X$  in  $\sigma_x^2$  neznan.

V prejšnjem poglavju sem ugotovil, da se podatki za vse tri vzorce (skupine) porazdeljujejo normalno. V nadaljevanju bom zato obravnaval določanje karakteristične vrednosti le za normalno porazdeljen vzorec.

Normalno porazdeljeno slučajno spremenljivko običajno podamo z gostoto verjetnosti, kot določa naslednja enačba

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-m_X}{\sigma_X} \right)^2}, \quad \dots \quad -\infty < x < \infty \quad (16)$$

Osnovna ideja pri določanju karakteristične vrednosti za normalno porazdeljen vzorec je zveza med poljubno normalno  $X$  in standardizirano porazdeljeno slučajno spremenljivko  $U$

$$U = \frac{X - m_X}{\sigma_X}. \quad (17)$$

Če  $X$  zamenjamo s standardizirano normalno porazdeljeno slučajno spremenljivko  $X$ , dobimo

$$P[X < x_\alpha] = P\left[ \frac{X - m_X}{\sigma_X} < \frac{x_\alpha - m_X}{\sigma_X} \right] = F_U\left( \frac{x_\alpha - m_X}{\sigma_X} \right) = \alpha \quad (18)$$

Iz tega sledi povezava med karakteristično vrednostjo in momenti normalno porazdeljene slučajne spremenljivke

$$x_\alpha = m_X + \sigma_X F_U^{-1}(\alpha), \quad (19)$$

kjer je  $F_U^{-1}(\alpha)$  inverzna funkcija porazdelitvene funkcije standardno normalno porazdeljene slučajne spremenljivke in zato neodvisna od parametrov  $m_X$  in  $\sigma_X$ .



Zgornja enačba (19) predstavlja osnovo za določanje ocene karakteristične vrednosti normalno porazdeljene slučajne spremenljivke. Če zamenjamo neznan parametra  $m_X$  in  $\sigma_X$  z njunima ocenama  $\bar{X}$  in  $S_X^{*2}$  dobljenima iz vzorca, dobimo najpreprostejšo oziroma naivno oceno parametra  $\hat{X}_\alpha$ :

$$\hat{X}_\alpha = \bar{X} + F_U^{-1} S_X^* \quad (20)$$

Če bi poznali porazdelitev slučajne spremenljivke  $\hat{X}_\alpha$ , bi lahko več povedali tudi o karakteristični vrednosti  $x_\alpha$ . Preiskave in simulacije dokazujejo, da je ocena karakteristične vrednosti odvisna od velikosti vzorca. Majhni vzorci nas lahko pripeljejo do zavajajočih rezultatov. Tudi zato je določanje karakteristične vrednosti po nekaterih veljavnih standardih npr. SIST EN 206-1:2003 precej nezanesljivo.

Preden predstavim rezultate izračunov karakterističnih vrednosti za moj primer, bom prikazal primer izračuna razreda tlačne trdnosti betona C, kot primer karakteristične vrednosti, po vseh teh metodah. Za razred tlačne trdnosti betona C v skladu s SIST EN 206-1:2003 velja, da je 5% kvantil tlačne trdnosti betona.

Po metodi, ki sta jo uporabila Zupan in Turk (2000) se v zgornjo enačbo (20) vpelje parameter  $\lambda$ . Enačba dobi obliko:

$$\hat{X}_\alpha = \bar{X} + \lambda S_X^* \quad (21)$$

Avtorja sta to enačbo ter enačbi ostalih dveh metod preverjala s pomočjo simulacij. Opravljenih je bilo 1000000 ponovitev in ugotovljena so bila odstopanja od prave vrednosti za posamezno metodo izračuna. Izkazalo se je, da je ocena po enačbi (21) najboljša, saj so odstopanja v najslabšem primeru pri majhnem vzorcu  $n = 6$  enaka 0.6%, pri večjih vzorcih pa še manjša. Relativno dobra je tudi naivna ocena, kjer je napaka pri manjših vzorcih 2.4% in se z večanjem vzorca manjša. Ocena po ENV 206 je najslabša.

Rezultate zgornje analize lahko uporabimo v praksi. Tako točkovno kot intervalno oceno določimo po preprosti enačbi (21), kjer  $\lambda$  za izbrani kvantil odčitamo iz preglednice 13. Če izberemo vrednost  $\lambda$  za  $\alpha_\lambda=50\%$ , določimo točkovno oceno – oceno mediane. Če na primer uporabimo vrednosti  $\lambda$  za  $\alpha_\lambda=25\%$  in  $\alpha_\lambda=75\%$ , lahko določimo območje, za katerega velja, da je 50% možnosti, da prava vrednost  $x_\alpha$  leži znotraj tega območja. Z vrednostjo  $\lambda$  za  $\alpha_\lambda=5\%$  in

$\alpha_\lambda=10\%$  pa določimo tisto kritično mejo, za katero velja, da je verjetnost, da je prava vrednost  $x_\alpha$  večja od izračunane, enaka 95% oziroma 90%.

**Preglednica 13:** Vrednosti  $\lambda$  za različne velikosti vzorca  $n$

$n$	$\alpha_\lambda=50\%$	$\alpha_\lambda=25\%$	$\alpha_\lambda=10\%$	$\alpha_\lambda=5\%$
5	-1,779	-2,463	-3,400	-4,203
6	-1,750	-2,336	-3,092	-3,708
7	-1,732	-2,250	-2,894	-3,399
8	-1,719	-2,188	-2,754	-3,187
9	-1,709	-2,141	-2,650	-3,031
10	-1,702	-2,104	-2,568	-2,911
15	-1,681	-1,991	-2,329	-2,566
20	-1,671	-1,932	-2,208	-2,396
30	-1,662	-1,869	-2,080	-2,220
50	-1,655	-1,811	-1,965	-2,065
100	-1,650	-1,758	-1,861	-1,927

Poleg točkovne karakteristične vrednosti pa je zelo pomembno tudi določanje intervalne ocene, ki ni le ocena – slučajna spremenljivka, saj vključuje tudi razpršenost ocene.

V mojem primeru sem določal razred tlačne trdnosti betona, za katerega velja, da je  $\alpha=25\%$ . Predpisan razred tlačne trdnosti betona je C25/30. Za zadostitev te zahteve je potrebno, da je karakteristična tlačna trdnost ( $\alpha_\lambda=25\%$ ) večja od 30 MPa.

Za vse skupine betonov sem določil točkovno karakteristično tlačno trdnost – mediano za  $\alpha_\lambda=50\%$ , intervalno oceno za  $\alpha_\lambda=25\%$  ter naivno oceno po enačbi (20). Rezultate sem primerjal z rezultati, dobljenimi v laboratoriju podjetja Primorje d.d., kjer so karakteristično tlačno trdnost računali po naslednji enačbi iz PBAB.

$$x_\alpha = \bar{X} + 1,3 \cdot S_x^* \quad (22)$$

Za določitev karakteristične tlačne trdnosti betona po tej enačbi je potrebno upoštevati rezultate, dobljene na vsaj 30-tih vzorcih. Koeficient pa se z velikostjo vzorca ne spreminja.

Rezultati tega preizkusa so prikazani v spodnji preglednici.

**Preglednica 14:** Prikaz karakterističnih tlačnih trdnosti za različne metode določanja

n	(20)	$\alpha_i=50\%$	$\alpha_i=25\%$	(22)
27 (samozgoščevalni beton brez aeranta)	47,7	47,57	46,11	49,94
13 (samozgoščevalni beton z aerantom)	40,43	40,18	38,16	42,42
134 (vibrirani beton)	35,48	35,46	34,93	37,13

Iz dobljenih rezultatov je razvidno, da so odstopanja največja pri vzorcu z najmanjšo populacijo, kar sem pri prejšnjih razlagah že večkrat predpostavil. To pomeni, da je še posebej pri majhnih vzorcih, potrebna velika previdnost pri določanju karakteristične vrednosti. Poleg tega je sklepanje o porazdelitvi tako majhnega vzorca tvegano, saj sta oceni za pričakovano vrednost in standardno deviacijo precej negotovi. V takšnem primeru je najprimernejše določanje razreda tlačne trdnosti betona z intervalno oceno, kjer je  $\alpha_i=25\%$ . Na ta način lahko s 75% verjetnostjo trdimo, da dejanska karakteristična vrednost ne pade pod izračunano vrednost.

Metoda, ki so jo uporabljali v laboratoriju podjetja Primorje d.d., je povzeta po standardu PBAB. To je še vedno veljavna regulativa za prevzem betonov. Na ta način se preverja ali betoni proizvedeni po določeni recepturi izpolnjujejo zahtevo za razred tlačne trdnosti. Rezultati preizkusa pa so pokazali, da so pri tej metodi dobljene vrednosti bistveno previsoke. Dejanska marka betona, ki je bil preizkušen, je zato verjetno nižja od izračunane. V tem primeru sicer zadostimo pogojem, ki so določeni s standardom, vendar se moramo zavedati, da je zelo velika verjetnost, da so dejanske vrednosti nižje.

Dobljeni rezultati nam jasno kažejo višje karakteristične tlačne trdnosti za samozgoščevalne betone (tudi z dodatkom aeranta). To pomeni, da imajo samozgoščevalni betoni, katere sem obravnaval, v primerjavi z vibriranimi betoni višjo tlačno trdnost. To je najverjetneje posledica precej nižjega vodo-cementnega razmerja pri samozgoščevalnih betonih, ki je praviloma nujno za doseganje ustrezne viskoznosti teh betonov. Celo vnos dodatne količine zraka v aeriran samozgoščevalni beton ni v celoti izničil vpliva nižjega vodo-cementnega razmerja.

## 4 ZAKLJUČEK

Armirani beton je postal najpomembnejši konstrukcijski material našega časa. Zadnja leta se zaradi povečanja konstrukcijske učinkovitosti pojavlja trend povečanja deleža armature v konstrukcijskih elementih. Po drugi strani pa se zaradi omejevanja in širjenja razpok vedno pogosteje priporoča uporaba večjega števila armaturnih palic manjšega prereza. Zato je učinkovita zgostitev svežega betona z vibriranjem velikokrat nemogoča. Poleg tega predstavlja vibriranje veliko obremenitev delavnega okolja. Težko obremenitev za delavce predstavljajo vibracije pervibratorjev (motnje krvnega obtoka), hrup in fizična obremenitev zaradi rokovanja z opremo. Zaradi navedenega se vse pogosteje srečujemo s problemom pomanjkanja kvalificiranih delavcev.

Samozgoščevalni betoni predstavljajo rešitev zgoraj navedenim težavam in se vse pogosteje pojavljajo pri gradnji armiranobetonskih konstrukcij.

Zaradi pomembnosti samozgoščevalnih betonov sem natančneje preučeval njihove karakteristične tlačne trdnosti in jih primerjal s tistimi od vibriranega betona. Vsi podatki o tlačnih trdnostih vzorcev so bili opravljeni za betone na istem objektu. Na ta način je moj primer podoben večini primerov iz prakse.

Obravnaval sem tri vzorce z različnimi velikostmi populacije. Razmeroma velik vzorec za vibrirani beton (134 podatkov) in manjša vzorca za samozgoščevalni beton (27 podatkov za beton brez aeranta in 13 podatkov za beton z aerantom). Prav zaradi majhnega števila podatkov dveh vzorcev, sem prilagodil test  $\chi^2$  in rezultat primerjal z dobljenim pri velikem vzorcu. Podobno sem tudi uporabil način za določitev karakteristične tlačne trdnosti pri relativno majhnem vzorcu. Opravljeni izračuni so mi potrdili predpostavko, da je obravnavanje majhnega vzorca precej bolj problematično in je zato priporočljivo uporabljati posebne metode za statistične izračune. Vsekakor je bolje uporabljati metode, za katere lahko z večjo verjetnostjo trdimo, da so dobljeni rezultati na varni strani.

Primerjava statističnih lastnosti samozgoščevalnih in vibriranih betonov je pokazala, da se porazdelitve tlačnih trdnosti ne razlikujejo. Dosežene tlačne trdnosti pa so pri

samozgoščevalnih betonih precej višje, kot pri vibriranih betonih. Zanimiva je tudi ugotovitev o premosorazmerni korelaciji med tlačno trdnostjo in posedom pri samozgoščevalnih betonih. Vsekakor pa so analizirani vzorci premajhni za posploševanje, tlačne trdnosti pa so odvisne predvsem od recepture betona.

## VIRI

Bokan Bosiljkov, V. 2000. Betoni vgradljivi brez kompaktiranja. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 22. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, 19. – 20. oktober 2000. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 171-178.

Bokan Bosiljkov, V. 2001. Posebne lastnosti svežega samozgoščevalnega betona – pregled obstoječih metod. Gradbeni vestnik, 50: 232-240.

Bokan Bosiljkov, V., Petan, S. 2001. Vpliv različnih superplastifikatorjev na lastnosti samozgoščevalnih betonov. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 23. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, 18. – 19. oktober 2001. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 173-180.

Bokan Bosiljkov, V. 2003. Samozgoščevalni betoni – največji napredek v tehnologiji betona zadnjih nekaj desetletij. Pomurska Akademsko Znanstvena Unija, Konferenca 2003.  
[http://www.pazu-ms.org/sl/informacija.asp?id\\_meta\\_type=25&id\\_informacija=190](http://www.pazu-ms.org/sl/informacija.asp?id_meta_type=25&id_informacija=190)

De Schutter, G. 2005. Guidelines for Testing Fresh Self-Compacting Concrete. European Research Project: Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete. Guidelines TESTING-SCC: 23 str.  
<http://www.civeng.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC/Guidelines%20for%20testing.pdf>

Dietz, J., Ma, J. 2000. Preliminary Examinations for the Production of Self-Compacting Concrete Using Lignite Fly Ash. Lacer, 5: 125-140.

Đureković, A. 1996. Cement, cementni kompozit i dodoci za beton, 1. izdanje. Zagreb, 258 str.

Hesford, C. 1998. The Chi-squared test  
<http://ourworld.compuserve.com/homepages/clivehesford/chisqu.html> (11.3.2006)

Kolmogorov-Smirnov test

<http://www.physics.csbsju.edu/stats/KS-test.html> (13.3.2006)

Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit Test

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35g.htm> (13.3.2006)

National institute of standards and technology

<http://www.itl.nist.gov/>

Ouchi, M., Nakamura, S., Osterberg, T., Hallberg, S., Lwin, M. 2003. Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States.

<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/scc.htm>

Persson, B. 2001. A comparison between mechanical properties of self.compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cem Concr Res*, 31: 193-198.

Petan, S. 2002. Poraba kamene moke kot dodatnega praškastega materiala za izdelavo samozgoščevalnih betonov iz drobljenega kamenega agregata. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer

Zupan, D., Srpčič J., Turk, G. 2005. Characteristic value determination from small samples. COST E24 Final Conference, Arcachon, 8-9 September 2005

Zupan, D., Turk, G., Characteristic value determination for arbitrary distribution, Ljubljana, FGG

Zupan, D., Turk, G. 2000. Določanje karakterističnih vrednosti iz relativno majhnih vzorcev. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 22. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, 19. – 20. oktober 2000. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

Concrete in Practice. What, why & how?. 2004. National Ready Mixed Concrete Association.

<http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/37p.pdf>