

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,  
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

**Špela Zaletel**

# **Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti**

**Diplomska naloga št.: 2962**

**Mentor:**

doc. dr. Jože Lopatič

**Somentor:**

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 26. 6. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **ŠPELA ZALETEL** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
**»SMOTRNOST UPORABE BETONOV VISOKE TRDNOSTI«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 10.06.2007

## **IZJAVA O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 624.012.4(043.2)  
**Avtor:** Špela Zaletel  
**Mentor:** doc. dr. Jože Lopatič  
**Sometor:** asist. dr. Drago Saje  
**Naslov:** Smotrnost uporabe betonov visoke trdnosti  
**Obseg in oprema:** 100 str., 16 pregl., 42 sl., 81 en.  
**Ključne besede:** beton visoke trdnosti, prekladna konstrukcija, steber, osno-upogibna odpornost

### **Izveček**

Diplomsko delo obravnava betone visoke trdnosti. Predstavila sem njegove prednosti in slabosti, njegove mehanske lastnosti in kako se njegova sestava razlikuje od sestave betona običajne trdnosti. S pomočjo cen, po katerih betonarna kupi posamezne setavine betona in na podlagi izbranih mešanic betona običajne trdnosti in betonov visoke trdnosti, sem izračunala vrednost kubičnega metra obeh vrst betonov. Ugotovila sem, da je beton s trikrat višjo tlačno trdnostjo približno dvakrat dražji.

Za izračun nosilnosti poligonalnega prečnega prereza prekladne konstrukcije sem uporabila in priredila že narejeno programsko opremo, ki je bila razvita v programu Microsoft Excel. Napisala sem računalniški program za izračun odpornosti okroglih prečnih prerezov. Razvita programska oprema vključuje preračunavanje enostavnih preglednic, makro ukaze in kodo, napisano v programskem jeziku Visual Basic. Omogoča izbiro dimenzij prečnega prereza, izbiro tlačne trdnosti betona ter izbiro količine in vrste armature.

Opazovala in preučevala sem, kako se spreminja osno-upogibna odpornost prerezov, če spreminjam trdnostni razred betona ali količino natezne ali tlačne armature. Ugotovila sem, da je beton visoke trdnosti, s pogleda odpornosti, smotrno uporabiti predvsem za elemente, ki so pretežno tlačno obremenjeni ali če so izpostavljeni posebnim pogojem okolja, ki uničujejo zgradbo betona.

## **BIBLIOGRAPHIC- DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 624.012.4(043.2)  
**Author:** Špela Zaletel  
**Supervisor:** Assist. Prof. Jože Lopatič, Ph. D.  
**Co-supervisor:** Assist. dr. Drago Saje, Ph. D.  
**Title:** Suitability of Using High Strength Concrete  
**Notes:** 100 p., 16 tab., 42 fig., 81 eq.  
**Key words:** high strength concrete, main bridge girder, pilar, bearing capacity

### **Abstract**

The present work focuses on high strength concrete, presenting its advantages and disadvantages, its mechanical properties and how its composition is different from that of concrete with conventional strength. On the ground of prices for constituents of concrete mix, the final price of cubic metre of both concretes is calculated, considering the composition of selected mixes. It was established that concrete with three times higher strength spent approximately two times more.

To calculate the bearing capacity of polygonal cross section, software, developed by Visual Basic for application using worksheets of Microsoft Excel, was adjusted and used. To calculate the bearing capacity of polygonal cross section, programme pack that was developed in computer programme Microsoft Excel was adjusted and used. Also programme for calculation of bearing capacity of circular cross section was developed. The latter includes calculating of simple index, macro commands and code, written in Visual Basic. It is possible to choose dimensions of the cross section, compressive strength of concrete, quantity and kind of reinforcement.

Changes of flexure and axial bearing capacity were observed with regard to compressive strength of concrete or quantity of reinforcement. Taking into account its strength, high-strength concrete proved to be suitable for construction elements in compression or elements that are exposed to extreme environmental conditions, which destroy structure of concrete.

## ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorju doc. dr. J. Lopatiču in somentorju asist. dr. D. Sajetu za pomoč, usmerjanje, razlago in ves njun čas pri nastajanju diplomske naloge.

Za pomoč pri izdelavi računalniškega programa in čas, ki si ga je vzel za odgovore na vsa moja vprašanja sem zelo hvaležna tudi doc. dr. Iztoku Kovačiču.

Zahvaljujem se tudi vsem v moji bližini, ki so me vedno prenašali z vsemi mojimi težavami in obogatili mene in vsak moj dan ter me vedno vzpodbujali, da naredim največ in najbolje, kar zmorem.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SPLOŠNO O BETONU VISOKE TRDNOSTI</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Zgodovina in razvoj betona visoke trdnosti</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča investitorja</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča projektanta</b>	<b>10</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča izvajalca</b>	<b>11</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča dobavitelja betona</b>	<b>11</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča vpliva na okolje</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>MEHANSKE LASTNOSTI BETONA VISOKE TRDNOSTI</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Tlačna in natezna trdnost</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Modul elastičnosti</b>	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Trajnost betonov visoke trdnosti</b>	<b>21</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Poroznost in propustnost betonov visoke trdnosti</b>	<b>22</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Kemijska korozija in korozija armature</b>	<b>24</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Odpornost proti zmrzovanju</b>	<b>26</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Odpornost proti obrusu in eroziji</b>	<b>27</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Temperaturna in požarna odpornost</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>MEŠANICE ZA BETON VISOKE TRDNOSTI</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Lastnosti uporabljenih materialov</b>	<b>29</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Cementi</b>	<b>30</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Kemijski dodatki</b>	<b>32</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Mineralni dodatki</b>	<b>36</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Aerant</b>	<b>39</b>

<b>4.1.5</b>	<b>Agregat</b>	<b>40</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Voda</b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Sestava mešanice za izdelavo betona visoke trdnosti</b>	<b>42</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Sestava betonske mešanice</b>	<b>43</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Izbira mešanic za ekonomski račun</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>ANALIZA SMOTRNOSTI IN EKONOMIČNOSTI UPORABE BETONOV VISOKE TRDNOSTI</b>	<b>52</b>
<b>5.1</b>	<b>Izračun nosilnosti betonskih prerezov</b>	<b>52</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Interakcijski diagrami poligonalnih prerezov</b>	<b>62</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti za krožni prečni prerez</b>	<b>69</b>
<b>5.2</b>	<b>Ekonomska ocena</b>	<b>85</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Ekonomska ocena mešanic</b>	<b>85</b>
<b>5.3</b>	<b>Primeri uporabe betonov visoke trdnosti</b>	<b>93</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Izvedeni mostovi v ZDA</b>	<b>93</b>
<b>5.3.2.</b>	<b>Izvedbe projektov v Sloveniji</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČKI</b>	<b>98</b>
<b>VIRI</b>		<b>101</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Vpliv vrste agregata na modul elastičnosti betona (str. 19)
Preglednica 2 :	Trdnostne karakteristike, moduli elastičnosti in mejne deformacije za betone različnih tlačnih trdnosti (str. 20)
Preglednica 3:	List za načrtovanje sestave mešanice betona visoke trdnosti (str. 48)
Preglednica 4:	Sestave mešanic betonov visoke trdnosti (str. 50)
Preglednica 5:	Maksimalne upogibne odpornosti krožnega prereza s tlačno osno silo -1000 kN v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 74)
Preglednica 6:	Maksimalne upogibne odpornosti krožnega prereza s tlačno osno silo -10000 kN v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 74)
Preglednica 7:	Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu=0,003$ ) pri upogibni obremenitvi 2000kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 81)
Preglednica 8:	Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu = 0,008$ ) pri upogibni obremenitvi 2000 kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 81)
Preglednica 9:	Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu = 0,003$ ) pri upogibni obremenitvi 10000kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 82)
Preglednica 10:	Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu= 0,008$ ) pri upogibni obremenitvi 10000 kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 82)
Preglednica 11:	Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice A betona visoke trdnosti ( $f_{ck} = 76,7$ MPa) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti (str. 87)
Preglednica 12:	Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice B betona visoke trdnosti ( $f_{ck} = 81,4$ MPa) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti (str. 88)
Preglednica 13:	Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice C betona visoke trdnosti ( $f_{ck} = 48,4$ MPa) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti (str. 89)
Preglednica 14:	Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice D betona visoke trdnosti ( $f_{ck} = 90,0$ MPa) in primerjava le te s skupno ceno materialov

za pripravo betona običajne trdnosti (str. 90)

Preglednica 15: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice E betona visoke trdnosti ( $f_{ck} = 100,0$  MPa) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti (str. 91)

Preglednica 16: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice F betona visoke trdnosti ( $f_{ck} = 100,0$  MPa) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti (str. 92)

## KAZALO SLIK

- Slika 1: Povezava med trdnostjo in vodo-vezivnim faktorjem betona (str. 14)
- Slika 2: Diagrami napetost-deformacija v tlaku za betone različnih tlačnih trdnosti (do 85 MPa), ki so izpostavljeni konstantnim napetostim (str. 18)
- Slika 3: Učinek vodo-cementnega razmerja in stopnje hidratacije na povezanost kapilarnih por v hidratizirani cementni pasti (str. 23)
- Slika 4: Predlagano razmerje med vodo-vezivnim faktorjem in tlačno trdnostjo (str. 46)
- Slika 5: Določitev količine grobega agregata v mešanici za beton visoke trdnosti (str. 46)
- Slika 6: Delovni diagram tlačnega betona, podan s parabolo in premico (str. 54)
- Slika 7: Idealizirana in rečunska sovisnost med napetostjo in deformacijo jekla za armiranje, za nateg in tlak (str. 54)
- Slika 8: Potek deformacij v poljubnem prerezu (str. 55)
- Slika 9: Glavna stran programa za račun odpornosti poligonalnega prereza (str. 56)
- Slika 10: Delovni list iz programa za račun odpornosti krožnega prečnega prereza, na katerem se računa prispevek betona k odpornosti prereza (str. 57)
- Slika 11: Razdalja težišča betonskega prereza od zgornjega roba prereza (str. 58)
- Slika 12: Mala eksentričnost – nateg (str. 59)
- Slika 13: Velika eksentričnost –  $M > 0$  (str. 59)
- Slika 14: Mala eksentričnost – tlak (str. 59)
- Slika 15: Velika eksentričnost –  $M < 0$  (str. 60)
- Slika 16: Delovni diagrami za betone različnih tlačnih trdnosti (str. 60)
- Slika 17: Diagram deformacija – napetost in izračun pomožne napetosti za jeklo z utrditvijo (str. 62)
- Slika 18: Škatlasti prerez prekladne konstrukcije mostu za primerjavo vpliva različnih tlačnih trdnosti betona in različne količine armiranja (str. 63)
- Slika 19: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z armaturo  $A_s = 200 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 64)
- Slika 20: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza

z armaturo  $A_s = 500 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str.64)

- Slika 21: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z armaturo  $A_s = 750 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 65)
- Slika 22: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z armaturo  $A_s = 2500 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 65)
- Slika 23: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 40/50 pri različnih količinah spodnje armature (str. 67)
- Slika 24: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 70/85 pri različnih količinah spodnje armature (str. 67)
- Slika 25: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 70/85 pri različnih količinah zgornje armature (str. 68)
- Slika 26: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 70/85 pri različnih količinah zgornje in spodnje armature in razmerju  $k = \mu / \mu' = 1,0$  (str. 68)
- Slika 27: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 90/105 pri različnih količinah spodnje armature (str. 69)
- Slika 28: Glavna stran programa za račun odpornosti krožnih prečnih prerezov (str. 70)
- Slika 29: Excel-ova stran programa za račun prispevka armature k odpornosti krožnih prečnih prerezov (str. 71)
- Slika 30: Prispevek betona ( $\mu = 0$ ) k upogibni odpornosti pri različnih tlačnih osnih silah za krožni prečni prerez premera  $\phi = 1,5 \text{ m}$  v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 72)
- Slika 31: Upogibna odpornost pri različnih tlačnih osnih silah za krožni prečni prerez premera  $\phi = 1,5 \text{ m}$ , s količnikom armiranja  $\mu = 0,003$  v odvisnosti od tlačne

trdnosti betona (str. 72)

- Slika 32: Upogibna odpornost pri različnih tlačnih osnih silah za krožni prečni prerez premera  $\phi = 1,5$  m, s količnikom armiranja  $\mu = 0,008$  v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 73)
- Slika 33: Maksimalne upogibne odpornosti in pripadajoče tlačne odpornosti krožnih prečnih prerezov s premerom  $\phi = 1.0$  m in z različnimi količniki armiranja  $\mu$  v odvisnosti od tlačne trdnosti betona (str. 75)
- Slika 34: Interakcijski diagrami odpornosti krožnih prečnih prerezov (absolutne vrednosti) z enakimi stopnjami armiranja  $\mu = 0,03$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 76)
- Slika 35: Normirani interakcijski diagrami odpornosti (brezdimenzionalni koeficienti) krožnih prečnih prerezov z enakimi stopnjami armiranja  $\mu = 0,03$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str.76)
- Slika 36: Interakcijski diagrami odpornosti krožnih prečnih prerezov (absolutne vrednosti) z enakimi stopnjami armiranja  $\mu_0 = 0,087$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 77)
- Slika 37: Normirani interakcijski diagrami odpornosti krožnih prečnih prerezov z enakimi mehanskimi stopnjami armiranja  $\mu_0 = 0,087$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 78)
- Slika 38: Osna tlačna odpornost stebra krožnega prereza s premerom  $\phi = 1.5$ m pri upogibnem momentu 5000 kNm in različni količini armature (str. 79)
- Slika 39: Osna tlačna odpornost stebra krožnega prereza s premerom  $\phi = 1.5$  m pri upogibnem momentu 10000 kNm in različni količini armature (str. 80)
- Slika 40: Osna tlačna odpornost krožnega prečnega prereza stebra s premerom  $\phi = 1.5$  m in količnikom armiranja  $\mu = 0,015$  pri različnih upogibnih obremenitvah (str.83)
- Slika 41: Upogibne odpornosti krožnega prečnega prereza s količnikom armiranja  $\mu = 0,01$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 84)
- Slika 42: Maksimalnemu upogibnemu momentu pripadajoče osne tlačne odpornosti krožnega prečnega s količnikom armiranja  $\mu = 0,01$  pri različnih tlačnih trdnostih betona (str. 84)

## GLAVNE OZNAKE

$w/c$	.....	vodo-cementno razmerje
$t$	.....	starost betona v dnevih
$f_{cm}(t)$	.....	srednja tlačna trdnost betona pri starosti $t$ dni
$f_{cm}$	.....	srednja tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni
$E_{cm}(t)$	.....	srednji modul elastičnosti betona pri starosti $t$ dni
$E_{cm}$	.....	srednji modul elastičnosti betona pri starosti 28 dni
$E_{ci}(t)$	.....	tangentni modul elastičnosti pri starosti betona $t$ v dnevih
$E_{ci}$	.....	tangentni modul elastičnosti pri starosti betona 28 dni
$M_{raz}$	.....	masa tekočega superplastifikatorja
$V_{raz}$	.....	prostornina tekočega superplastifikatorja
$M_t$	.....	masa trdnih delcev v tekočem superplastifikatorju
$V_t$	.....	prostornina trdnih delcev v tekočem superplastifikatorju
$M_v$	.....	masa vode v tekočem superplastifikatorju
$V_v$	.....	prostornina vode v tekočem superplastifikatorju
$d$	.....	delež trdnih delcev v tekočem superplastifikatorju
$G_{sup}$	.....	specifična teža tekočega superplastifikatorja
$\varepsilon_0$	.....	elongacija težiščne osi
$\varepsilon_i$	.....	deformacija betona na določenem mestu
$\varepsilon_{cu2}$	.....	mejna specifična deformacija betona
$\varepsilon_{c2}$	.....	specifična deformacija betona pri največji napetosti
$\sigma_c$	.....	napetost betona (na določenem mestu)
$\alpha_{cc}$	.....	koeficient zmanjšanja tlačne trdnosti betona zaradi dolgotrajnega delovanja obtežbe
$f_{cd}$	.....	računska tlačna trdnost betona
$\varepsilon_s$	.....	deformacija armature

$\varepsilon_{ud}$	.....	mejna deformacija armature
$\varepsilon_{yd}$	.....	deformacija armature na meji elastičnosti
$\mu_0$	.....	mehanska stopnja armiranja
$\mu$	.....	stopnja armiranja
$W_{skupna}$	.....	celotna količina vode v agregatu
$W_{abs}$	.....	količina vode, ki jo agregat absorbira v zasičeno vlažnem, površinsko suhem stanju
$w_p$	.....	prosta voda v agregatu, ki sodeluje pri hidrataciji
$N_{Rd,s}$	.....	osna odpornost prereza -prispevek armature
$N_{Rd,c}$	.....	osna odpornost prereza -prispevek betona
$M_{Rd,s}$	.....	upogibna odpornost prereza -prispevek armature
$M_{Rd,c}$	.....	upogibna odpornost prereza -prispevek betona

## **OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

SHRP	Strategic Highway Research Programme – strateški raziskovalni avtocestni program
FHWA	Federal Highway Administration – zvezno avtocestno združenje
DOT	Department of Transportation
ZVPS	zasičeno vlažno, površinsko suho stanje



## 1 UVOD

Beton visoke trdnosti je material s posebnimi mehanskimi lastnostmi, predvsem višjo tlačno trdnostjo. Njegova definicija oziroma meja med običajno in visoko trdnostjo se je spreminjala skozi čas. Danes bi jo težko določili. Glede na spreminjanje porušnih deformacij in deformacij pri najvišjih napetostih za različne tlačne trdnosti betona, bi lahko rekli, da je beton visoke trdnosti vsak, ki dosega tlačno trdnost nad 55 MPa. Tako je definirano tudi v standardu SIST EN 206-1 v točki 3.1.10. V knjigi Osnovne lastnosti gradiv piše, da so to betoni tlačne trdnosti od 40 do 140 MPa [Roko Žarnić, 2000]. Odlikujejo ga tudi druge pozitivne lastnosti. Konstrukcijam zagotavlja podaljšano trajnost in življenjsko dobo. Predvidevam, da bo v prihodnosti z uporabo betona visoke trdnosti mogoče natančno predvideti dobo služenja konstrukcije, znižanje stroškov v celotnem življenjskem krogu in zajamčeno dobro znano obnašanje v času gradnje monolitnih betonskih konstrukcij.

Beton visoke trdnosti se uporablja pri vseh gradbenih konstrukcijah, od visokih in stanovanjskih zgradb do mostov, tunelov in cest. Pomembno je, da smo seznanjeni s obnašanjem in lastnostmi tega materiala, ko izbiramo ustrezno vrsto betona za določeno konstrukcijo. Visokotrdnega betona še niso začeli uporabljati povsod po Evropi. Nekje ga uporabljajo samo za popločenja, saj zagotavlja boljšo odpornost na vremenske in agresivne vplive. Drugje je v uporabi za različne inženirske objekte. Marsikje v Evropi že zadosti zaupajo temu novemu materialu, da ga uporabljajo za veliko različnih namenov.

Z namenom spoznati se s tem materialom in njegovimi mehanskimi lastnostmi je bilo v zadnjem času narejenih že veliko raziskav, predvsem laboratorijskih. V slovenski literaturi nisem zasledila navodil za sestavo mešanice betona visoke trdnosti, čeprav obstaja že dosti ponudnikov več cementu dodatnih mineralnih in kemičnih materialov.

Predno se lotimo izbire ustreznega materiala za določeno konstrukcijo, se moramo seznaniti z njegovimi prednostmi in slabostmi. Določiti moramo tudi pogoje okolja. V tej diplomski nalogi sem skušala predstaviti ta beton nove vrste in z računalniškim programom ugotoviti, kakšne so njegove prednosti. S pridobljenimi cenami sestavin betona visoke trdnosti sem

določila pričakovano ceno enote betona visoke trdnosti in jo primerjala s ceno enote betona običajne trdnosti. Primerjava cen obeh betonov nam omogoča oceno smotrnosti uporabe betona višje trdnosti glede na ostale prednosti, ki jih ima pred betonom običajne trdnosti. Z računalniškim programom sem poskušala predstaviti tudi razliko v osno-upogibnih odpornostih prerezov iz betonov različnih tlačnih trdnosti.

Da bi lahko natančno ugotovili upravičenost uporabe takega betona zaradi manjših stroškov vzdrževanja in daljše trajnosti konstrukcij, bi morali beležiti vse vzdrževalne stroške konstrukcij in jih primerjati med seboj glede na tlačno trdnost betona, s katerim so narejene. Pričakovati bi bilo, da bi tisti, ki z rezultati njegove uporabe niso bili zadovoljni, o tem poročali. Sama nisem zasledila zapisov o slabih izkušnjah.

Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti je pogojena z njegovim namenom. V mostogradnji je lahko cilj povečanje razpona zaradi premostitve, zmanjšanje višine prekladne konstrukcije zaradi zmanjšanja lastne teže, oblikovanje elegantnih mostov, zmanjšanje števila nosilcev ali samo doseganje višje odpornosti na soli in druge vremenske vplive.

V visokogradnji se beton visoke trdnosti najpogosteje uporablja za izdelavo stebrov, predvsem spodnjih etaž. Smotrnost uporabe tega materiala je v tem primeru odvisna od različnih dejavnikov. Pomembno je, koliko armature se nahaja v betonskem elementu in s kakšno tlačno silo je obremenjen, saj to vpliva na velikost upogibnega momenta, ki ga prenese element. Če so stebri narejeni iz betona premajhne tlačne trdnosti, določenih upogibnih momentov ne morejo prenesti ne glede na količino uporabljene armature. Za delavnice, parkirne hiše, hale in avle je pogosto pomembno, da so razponi med stebri dovolj veliki. To pomeni, da mora en steber prenesti več obremenitve, kar lahko dosežemo le, če uporabimo beton visoke trdnosti. Njegova uporaba pa je ponavadi manj smiselna v zgornjih nadstropjih stanovanjskih stavb.

## 2 SPLOŠNO O BETONU VISOKE TRDNOSTI

Beton visoke trdnosti je poseben material, saj se ne obnaša popolnoma enako kot beton običajne trdnosti. Glavni cilj njegovega razvoja je bil povečati njegovo tlačno trdnost. Vendar se s tem niso mogli izogniti nekaterim negativnim reološkimi ali mehanskimi učinkom. Skozi čas so ugotavljali, kaj je potrebno še popraviti in spremeniti. In vsakič so bili bližje željenemu cilju. Vendar danes lahko rečemo, da ima beton visoke trdnosti še nekatere druge pozitivne lastnosti poleg višje trdnosti in včasih so te razlog za njegovo uporabo. Zavedati pa se moramo tudi vseh njegovih negativnih lastnosti.

### 2.1 Zgodovina in razvoj betona visoke trdnosti

Dolgo časa so beton izdelovali le kot preprosto mešanico cementa, vode in kamenega agregata. Njegovo obdelovalnost so kontrolirali s količino zamesne vode. Kmalu so ugotovili, da taka preprosta mešanica ni dovolj trajna, zlasti če je v mešanici velika količina vode in je površina betona izpostavljena različnim agresivnim in uničujočim vplivom okolja.

V prvih začetkih razvoja betona visoke trdnosti si gradbeni inženirji niso predstavljali, da bo beton nekega dne zamenjal jeklo tudi v nekaterih najvišjih zgradbah, saj se je predhodno uporabljal večinoma za nižje konstrukcije. Večina v tem času je bila prepričana, da je beton pri visokih zgradbah uporaben le za temelje in ustroj pritličja ali za varovanje gradbenih jeklenih elementov pred požarom.

Razvoj betona visoke trdnosti se je začel najprej v Chicagu. Tam so pričeli sodelovati projektanti, ki so bili dovolj pogumni in proizvajalci betona, ki so bili dovolj inovativni. Tako so najprej začeli uporabljati ta nov beton v večjih količinah v velikih konstrukcijah v šestdesetih letih dvajsetega stoletja. Tlačna trdnost, ki so jo bili pri betonu takrat sposobni doseči, je bila dokaj nizka glede na današnje standarde. V tem času je običajni beton, ki se je uporabljal v gradbeni industriji, dosegal tlačne trdnosti samo od 15-30 MPa, zato je bil predlog podvojitve te trdnosti preko noči res izziv. Cementi in njegovi dodatki, ki so bili

takrat na voljo, niso bili tako ustrezni za proizvodnjo betona visoke trdnosti kot danes. Večina tržnih cementov je bila bolj grobozrnata kot danes in tržni dodatki za zmanjševanje količine vode so bili takrat predvsem narejeni na podlagi lignosulfatov<sup>1</sup>, ki so stranski produkt proizvodnje celuloze in papirja. Ti dodatki so bili vzrok za velike količine zračnih mehurčkov, če so bili uporabljeni v večjih količinah.

Betonska industrija v Severni Ameriki je takrat šele začela uporabljati elektrofiltrski pepel v večjih količinah. Ponudniki so ga namreč šele začeli primerno obdelovati, da je bil zagotovljeno kvaliteten, proizvajalci betonov pa še niso dobro vedeli, kako je primeren za znižanje cene betona visoke trdnosti.

Konstruktorji in proizvajalci betona visoke trdnosti so morali prepričati investitorje, da jim dovolijo uporabiti ta malo znan material, da bi lahko pokazal svojo vrednost. Sprva so izvajali z betonom višje trdnosti samo posamezne stebre. Ko so se investitorji prepričali, da s tem ničesar ne tvegajo in da vgradnja takega betona ni težavna, jih je bilo lahko prepričati v uporabo le tega v konstrukcijah kasneje načrtovanih zgradb. Korak naprej je bilo lahko narediti, ker se je doseganje vse večje tlačne trdnosti kazalo v cenovnem prihranku. To se je izražalo v povečanem prostoru pisarn ali parkirnega prostora zaradi zmanjševanja dimenzij stebrov, posebej v spodnjih nadstropjih, ki so običajno najbolj donosna. Na ta način so postopoma povečevali tlačno trdnost betona, vendar se je to ustavilo v sedemdesetih letih 20.stoletja pri 60 MPa zaradi tehnološke ovire, preko katere se ni dalo z neobdelanimi, surovimi materiali, ki so bili na razpolago. Na voljo še ni bilo primernih fluidifikatorjev<sup>2</sup>, ki bi še zmanjšali vodo-vezivno razmerje. Pokazalo se je tudi, da je v iskanju znižanja vodo-vezivnega razmerja na stopnjo od 0,35-0,40 kritična točka izbor cementa, saj bi se ta moral pokazati za primerne tako v mehanskih kot reoloških lastnostih. [Aitcin, 1998]

Prvi fluidifikator, ki se je začel široko uporabljati v betonski industriji, je bil derivat lignina, lignosulfat. Dodajal se je v majhnih odmerkih neposredno pred vgradnjo betona [Aitcin, 1998]. Odmerjanje fluidifikatorja se je povečevalo, vendar količina ni mogla biti veliko večja, ker bi to povzročilo zavlačevanje vezanja in vključitev prekomerne količine zračnih mehurčkov, kar

---

<sup>1</sup> Molekule, ki so stranski produkt proizvodnje celuloze in papirja

<sup>2</sup> Dodatki za zmanjševanje količine vode

bi se izrazilo v nižji trdnosti. Sledil je hiter tehnološki razvoj dodatkov za zmanjševanje količine zamesne vode, ki so enakomerno porazdelili cement. Te novejšje dodatke imenujemo plastifikatorji, superplastifikatorji in hiperplastifikatorji, ki se dodajajo sočasno z zamesno vodo ob procesu mešanja betona v betonarni ali/in neposredno pred betoniranjem. V poznih 60-ih letih 20.stoletja so bili superplastifikatorji prvič uporabljeni v betonu na Japonskem in v Nemčiji. Patent za te dodatke, ki temelji na polikondenzatih naftalenskih sulfonatov, je bil izdelan že leta 1938 [Aitcin,1998]. Betonska industrija je verjetno začela uporabljati superplastifikatorje mnogo kasneje, ker so bili v tem času lignosulfonati poceni. Njihovo obnašanje je bilo hkrati zadovoljivo za beton s trdnostjo 15 MPa-20 MPa, zato ni bilo potrebe po iskanju drugih dodatkov za zmanjševanje količine vode. Pri pripravah prvih mešanic s superplastifikatorji so porabili več vode, namesto da bi zmanjšali njeno porabo. Te dodatke so uporabljali za pospeševanje vgrajevanja betona brez tveganja segregacije in s tem izgube trdnosti, ki se pojavi, ko pride do izcejanja vode v betonu. Hkrati so jih lahko uporabljali v mnogo večjih dozah kot lignosulfate ne da bi povzročili kakšno zavlačevanje ali vstop prevelike količine zraka v beton v času njegove priprave. Kasneje so bili superplastifikatorji dodani na mestu betoniranja tik preden je bil beton nameščen v opaž, ker je bilo neprimerno prevažati preveč tekoč beton zaradi segregacije in varnostnih razlogov zaradi razlitja skozi rob posode kamiona. Z uporabo superplastifikatorjev je bilo možno znižati vodo-vezivno razmerje na 0,30 in še vedno dobiti začetni posek stožca 200 mm. To je bil velik napredek v primerjavi s tem, kar so dosegali s fluidifikatorji na osnovi lignosulfatov.

Zaradi vse večje uporabe superplastifikatorja, se je pojavil problem hidratacijskega krčenja vgrajenega betona. To krčenje je posledica samoizsuševanja v porah cementnega kamna. Z namenom preseči to težavo so proizvajalci teh dodatkov razvijali take superplastifikatorje, ki so hkrati zavlačevali vezanje in s tem porabo vode pri procesu hidratacije.

Z uporabo mikrosilike, ki je zelo droben cementni nadomestek, je Bache v laboratoriju dosegel celo tlačno trdnost betona 280 MPa in pokazal, da končna tlačna trdnost betona ni odvisna samo od kvalitete, kvantitete in učinkovitosti uporabljenih cementnih materialov, ampak tudi od stopnje zgoščenosti betona in poroznosti trdnega cementnega kamna [Aitcin, 1998]. Potem so znanstveniki in proizvajalci betona začeli zmanjševati vodo-vezivno

razmerje pod 0,30, na stopnjo, ko je bilo vode premalo, da bi hidratiziral ves cement v mešanici. Notranjost grobih zrn cementa je igrala vlogo polnila.

Industrija za izdelovanje pripravljenih vezivnih mešanic za izdelavo betona je izkoristila prihod mikrosilike, novega cementnega materiala takoj, ko so ga začeli dobavljati v uporabni obliki za sprejemljivo ceno. Mikrosilika je stranski produkt izdelovanja silicija ali ferosilicija. V proizvodnji betona so jo začeli uporabljati kot dodatek cementnemu materialu šele v poznih 70-ih letih 20.stoletja v Skandinaviji [Aitcin, 1998]. Dolgo časa so dopuščali, da je ta stranski produkt v obliki dima uhajal v ozračje. Mikrosiliko so začeli zbirati šele, ko so bili podvrženi strogim okoljevarstvenim predpisom. Imeli so dodatne stroške in težave, kako zajeti ta stranski produkt, da ne bi uhajal v zrak in kam z njim po zajetju. Pri tem si niso mislili, da bodo nekoč lahko izkoristili njegove prednosti.

Uporaba betonov visoke trdnosti je še vedno majhna in predstavlja zelo nizek odstotek trgovine z betonom. Vendar se je nekaj držav že povežalo v raziskovalne programe o betonu visoke trdnosti v poznih 80-ih letih 20.stoletja; med njimi ZDA, Norveška, Kanada, Francija, Švica, Avstralija, Nemčija, Japonska, Koreja, Tajska. Resneje so se začeli ukvarjati z betonom leta 1980 v Franciji in nadaljevali v Kanadi 1990. Leta 1989 se je Severni Karolini, v Ameriki začela razvijati tehnologija betona visoke trdnosti s SHRP-jem (Strategic Highway Research Programme). Ti začetni naporji so bili odgovor na občutno povišanje cestnin na državnih cestah in mostovih. Z namenom povečati trajnost mostnih plošč so v Ameriškem združenju FHWA (Federal Highway Administration) spodbudili državni oddelek za transport DOTs (Department of Transportation), da skupaj razvijejo nove betonske mešanice, s katerimi bi dobili manj prepusten beton za penetracijo kloridov cestne soli. [Susan C. McCraven, 2002]

Eno izmed pomembnejših raziskovalnih področij Ameriškega združenja FHWA je bil razvoj »Ultra High-Performance concrete« - ekstremno visokovrednega betona. Ena od oblik takega betona je beton, armiran z jeklenimi vlakni, ki vsebuje drobne praškaste delce in ima zelo nizko vodo-vezivno razmerje. S takim betonom je bila dosežena tlačna trdnost od 125 - 195 MPa. Je zelo odporen na prodiranje kloridnih ionov, ima visoko odpornost na zmrzovanje in druge škodljive vpliva okolja. Razvoj te vrste betona je potekal v več fazah in v eni izmed

njih so analitično določili dvojni T prerez za optimalno obliko nosilca za mostove z razponi 21-30 m. [*Structural designer's guide, marec 2005*]

Zaradi razvoja beton visoke trdnosti že dosega lastnosti naravnega kamna. Beton visoke trdnosti, narejen s superplastifikatorji, ostaja plastičen dovolj dolgo, obenem pa hitro pridobiva trdnost zaradi nizkega vodo-vezivnega razmerja. Včasih je to lahko celo prednost, na primer za izvajanje zahtevnejših geometrijskih oblik pri prostem vgrajevanju, ki z običajnim betonom niso bile možne. Ta lastnost betonov visoke trdnosti pa je lahko dobrodošla tudi pri izvedbi kalupiranih betonskih elementov.

## **2.2 Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti**

Beton visoke trdnosti ni brez slabosti, vendar z uporabo in raziskavami spoznavamo njegove lastnosti, kar nam omogoča učinkovitejšo uporabo.

Poznavanje lastnosti določenega materiala je potrebno, da lahko ocenimo upravičenost uporabe tega materiala v konstrukciji. Tako lahko s poznavanjem lastnosti in obnašanja materiala v različnih pogojih investitorji, lastniki, konstruktorji, izvajalci, proizvajalci betona in okoljevarstveniki določijo, kateri beton je za dane pogoje najboljša izbira. Čeprav lahko različne karakteristike betona visoke trdnosti ponudijo nekaj prednosti glede na beton običajne trdnosti, je ta material še vedno mogoče v marsičem izboljšati. Beton visoke trdnosti pa ima tudi nekatere slabosti, zato se bo še naprej veliko uporabljal beton s tlačnimi trdnostmi od 20 MPa-30 MPa.

V splošnem lahko kot pozitivne lastnosti betona visoke trdnosti označimo predvsem naslednje, ki jih ne moremo doseči z običajnimi materiali in postopki:

- visoka tlačna trdnost
- lahka vgradnja in zgostitev brez segregacije (samozgoščevalni beton)
- nepropustnost in velika gostota, ki zagotavlja odpornost na zmrzovanje, odpornost na luščenje, odpornost na abrazijo, nizko prepustnost kloridnih ionov, nizko alkali-silikatno reaktivnost ter odpornost na sulfate

- dolga življenjska doba (uporaba mineralnih dodatkov izboljša odpornost na ekstremne temperaturne spremembe in agresivne kemikalije ter omogoči dobo služenja tudi do 100 let)
- trajnost in žilavost
- stabilnost prostornine (minimalno krčenje in toplotno raztezanje)
- visoka obdelovalnost in zmožnost samoizravnave
- visok modul elastičnosti, kar pomeni manjše pomike (vendar se ti ne zmanjšujejo sorazmerno z višanjem trdnosti betona)
- nižji stroški vzdrževanja betonskih konstrukcij in elementov preko njihove celotne življenjske dobe
- večja eleganca konstrukcij

Vendar je potrebno biti pri gradnji z betoni visoke trdnosti pozoren na določene probleme in posebnosti, ki se lahko pojavijo:

- Obdelava finalne površine vgrajene mase: ko je beton vgrajen, ima običajno velik posed zaradi superplastifikatorja, ki ga uporabimo za doseganje dovolj velike obdelovalnosti. Vendar je zaradi lepljivosti mikrosilike oteženo zaključevanje finalne površine - vlečenje.
- Zaradi kritično majhne vsebnosti vode naj vgradnja betona ne bi potekala v suhih in močno vetrovnih pogojih, da ne bi prišlo do luščenja zgornjega sloja zaradi izhlapevanja vode.
- Zaradi različnih medsebojnih vplivov sestavin se zahteva izdelava poskusnih serij betona, čeprav izvajalec že ima izkušnje z betonom visoke trdnosti.
- Nega takega betona je obvezna, saj se avtogeno<sup>3</sup> krčenje začne že s hidratacijo. Določila zahtevajo zmanjšanje izgube vlage na minimalno z uporabo zavlačevalcev izhlapevanja.

---

<sup>3</sup> Hidratacijsko krčenje, ki je posledica samoizsuševanja v porah cementnega kamna



### 2.2.1 Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča investitorja

Cilj uporabe določenega materiala je dobiti največje možno povračilo investicije v življenjski dobi konstrukcije. Za lastnika v večini primerov materiali niso pomembni, dokler zadovoljujejo funkcionalne zahteve za sprejemljivo ceno. Redko se zgodi, da želi investitor uporabo materiala zaradi izgleda. Ne glede na to imajo želje lastnika velik vpliv na končni izbor konstrukcijskega materiala.

Povišanje tlačne trdnosti betonov s 60 na 75 MPa npr. za grajene morske ploščadi, ki so konstruirane za globine 300 m, zmanjša količino potrebnega betona za približno 50.000 m<sup>3</sup>. To predstavlja prihranek za investitorja [Aitcin, 1998]. Manjše dimenzije gradbenih elementov lahko pomenijo hkrati dodatni zaslužek zaradi pridobljenega prostora, predvsem v nižjih etažah. Pri delavnicah ali v parkirnih hišah na primer je lahko pridobitev prostora in povečanje razponov med stebri ključnega pomena. Pri gradnji avtocestnih konstrukcij se pričakuje, da je glavna prednost uporabe betona visokih trdnosti pri elementih mostu povečanje razpona dolžine mostov z montažnimi nosilci, zmanjšanje debeline zgornjih ustrojev in izločanje vrst nosilcev. Z uporabo betonov visokih trdnosti se hkrati poveča odpornost konstrukcije proti mrazu in drugim agresivnim snovem in vplivom iz okolja, kar vpliva na večjo trajnost in zahteva manj vzdrževanja.

Zaradi višjega modula elastičnosti betona visoke trdnosti v primerjavi z betoni običajne trdnosti izkazuje zgradba iz betona visoke trdnosti manjše nihanje visoke zgradbe v višjih nadstropjih zaradi vetra. Konstrukcija iz betona visoke trdnosti je tudi bolj toga v primerjavi z jekleno.

Trije osnovni elementi skupne cene betonske konstrukcije so uporabljeni material, izvedba in vzdrževanje. Na te lahko vplivamo z uporabo betona visoke trdnosti, ki ima gostejšo strukturo. Uporaba betona visoke trdnosti vodi k višji skupni ceni uporabljenih materialov, saj je mešanica za tak beton dosti dražja v primerjavi z mešanico betona običajne trdnosti. Vzrok je predvsem v večji vsebnosti cementnega materiala in nekaterih dodatkov ter superplastifikatorjev, ki jih moramo uporabiti, da dosežemo optimalne lastnosti vgrajevanja.

Podatkov o stroških vzdrževanja konstrukcij iz takega betona zaenkrat še ni veliko, vendar se pričakuje, da bodo le-ti dosti manjši v primerjavi s stroški, potrebnimi za vzdrževanje konstrukcij, zgrajenih iz betona običajne trdnosti. Ocenjuje se, da bi bila glede na celotne stroške cena nosilca na tekoči meter iz betona visoke tlačne trdnosti za približno 10-15% višja od cene nosilca iz betona običajne tlačne trdnosti, kar pa bi se lahko uravnalo z manjšo potrebno količino nosilcev in stebrov v konstrukciji. [*Federal Highway Administration, 2005*]

### **2.2.2 Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča projektanta**

Najprej pomislimo, da ima projektant zadnjo besedo pri izboru materiala. Po premisleku ugotovimo, da mora ta odločitev izpolnjevati različne zahteve, kar pomeni, da ta izbor sploh ni tako svobodno prepuščen samo njemu. Zadovoljiti mora lastnikove funkcionalne in arhitektove estetske zahteve ter upoštevati tudi konstrukcijske omejitve v gradbenih pravilnikih. Včasih projektant izbire sploh nima. Če je določeno geografsko področje hkrati središče proizvodnje določene sestavine betona, bo najbrž izbran ta material, če je možna njegova uporaba za konkreten namen, saj je tak material dostopnejši in cenejši. Iz tega stališča lahko odločitev za uporabo betona visoke trdnosti ovira pomanjkanje dovolj kvalitetnega agregata v določenem geografskem območju. Območja, ki so potresno aktivnejša, bodo lahko podprla izbor bolj duktilnega jekla pred krhkim betonom. Pri tem je potrebno vzeti v obzir, da je beton z višjo trdnostjo še krhkejši. Lahko pa je končni izbor tudi odvisen od tega, kateri material projektant bolje pozna, saj lahko tako lažje in učinkoviteje ustvari konstrukcijo, ki bo estetsko, funkcionalno in tehnološko ustrezala.

Pri izboru materiala lahko projektant upošteva naslednje prednosti betona visoke trdnosti: visok modul elastičnosti, hiter razvoj lezenja, trajnost konstrukcije, zmanjšano poroznost, veliko odpornost na abrazijo. Uporaba betona z višjo tlačno trdnostjo lahko vpliva na zmanjšanje velikosti prereza stebrov v nižjih etažah visokih zgradb, kar pomeni povečanje uporabnega prostora in zmanjšanje lastne teže konstrukcije.

### **2.2.3 Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča izvajalca**

Izvajalci gradbenih del imajo običajno malo vpliva na izbor gradbenih materialov za določeno konstrukcijo, vendar jim je včasih dovoljeno predlagati bolj ekonomične alternativne rešitve glede na njihove izkušnje. Tako lahko na primer izvajalec prepriča investitorja, da bo uporaba betona visoke trdnosti znižala končno ceno konstrukcije. Zaradi hitrejše izvedbe gradnje konstrukcije je na primer ekonomoski prihranek v določenih primerih lahko zelo velik.

Idealen beton za izvajalca bi moral ostati plastičen dovolj dolgo, da ga lahko kvalitetno vgradi. Poleg tega bi se moral čim hitreje strditi brez krčenja ali lezenja in brez posebne nege. V tem pogledu je beton visoke trdnosti kljub vsem njegovim prednostim, daleč od idealnega. Proces njegovega strjevanja je zelo odvisen od količine superplastifikatorja in zavlačevalcev. Ti so dodani z namenom, da zmanjšajo vodo-vezivno razmerje in hkrati ohranijo primerno obdelovalnost in je torej višja količina obojega kriva za počasnejši razvoj trdnosti.

Zaradi zmanjšanja teže premostitvene konstrukcije, ki je posledica manjše količine potrebnega betona, se v primeru narivanja te konstrukcije zmanjšajo sile narivanja in sile trenja na vmesnih opornikih. Zaradi tega se lahko tudi izognemo nekaterim začasnim podporam v času gradnje. Pri uporabi betonov visoke trdnosti se delno zmanjšajo tudi izgube sile prednapetja. Do tega prihaja zaradi lezenja in krčenja betona v času sušenja, ki je pri betonih visoke trdnosti manjše. Avtogeno ali hidrationsko krčenje pri betonu visoke trdnosti se namreč razvije že v kratkem času po betoniranju, pred napenjanjem kablov in ne prispeva k izgubi sile prednapetja. Pri betonu visoke trdnosti to krčenje predstavlja večji delež celotnega krčenja betona [Saje,2001].

### **2.2.4 Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča dobavitelja betona**

Proizvajalci betona so dolgo časa prodajali beton za nizke konstrukcije in prepuščali ostalo tržišče jeklu. Beton običajne tlačne trdnosti je bolj razširjen tam, kjer se beton veliko uporablja, ker njegova proizvodnja ne zahteva posebnih veščin ali visoke tehnologije kontrole kvalitete. Poleg tega je beton običajne trdnosti že vpeljan kot tradicionalni gradbeni material,

ki ne zahteva posebnih tehnik trženja in čigar uporaba je natančno določena v gradbenih pravilnikih.

Beton visoke trdnosti lahko predstavlja samo 10-20% prostornine celotne betonske konstrukcije objekta. Vendar je zmožnost njegove dobave lahko ključnega pomena za podpis pogodbe za ostalih 80-90% betona z običajno trdnostjo, ki je potreben za izvedbo celotne konstrukcije. Za izdelavo visokokvalitetnega betona in promocijo le tega so potrebni projekti, s katerim spoznavamo način pravilne izdelave in kontrole kvalitete. Proizvajalci betona so ugotovili, da ti projekti ponavadi pozitivno vplivajo na proizvodnjo betonov običajne trdnosti, saj jih naredi bolj ekonomične.

Višje stroške za izdelavo betona visoke trdnosti lahko predstavlja bolj ostra kontrola kvalitete materialov ter svežega in otrdelega betona. Prišteti moramo tudi dodatne stroške zaradi hlajenja ali ogrevanja betonske mešanice ter sestavin mašanice - dodatnega cementa, superplastifikatorjev, kemičnih in mineralnih dodatkov za doseganje sprejemljive vgradljivosti in za doseganje boljše strukture cementnega kamna.

Beton je lažje dostaviti ponoči, ko ni konic prometa. Ker so temperature ponoči nižje, je vgrajevanje betona takrat v prednosti zaradi lažje zgodnje nege in razvoja toplote v začetku strjevanja. Daljši čas mešanja betona je lahko vzrok za nerentabilnost proizvodnje betona visoke trdnosti.

### **2.2.5 Prednosti in pomanjkljivosti betona visoke trdnosti s stališča vpliva na okolje**

Kadarkoli je namesto betona običajne trdnosti uporabljen beton visoke trdnosti, je Portland cement<sup>4</sup> kot vezivo bolj učinkovito uporabljen. Mikrostruktura betona visoke trdnosti je zaradi manjše količine vode manj porozna in zato bolj čvrsta. Če želimo narediti konstrukcijo z določeno nosilnostjo, je lahko poraba Portland cementa za izdelavo potrebne količine betona običajne trdnosti veliko večja kot če izdelamo ustrezno količino betona visoke trdnosti. Iz tega stališča bi se izdelovanje betona običajne trdnosti smatralo kot energetska potratno.

---

<sup>4</sup> Značilni predstavnik silikatnih cementov (glavna sestavina so silikati kalcija)

### 3 MEHANSKE LASTNOSTI BETONA VISOKE TRDNOSTI

Beton visoke trdnosti je v uporabi zaradi svoje visoke trdnosti in ostalih pozitivnih lastnosti, ki jih ne moremo doseči z betonom običajne trdnosti. Beton visoke trdnosti predstavlja mnogo več kot le beton z višjo tlačno trdnostjo. Označimo ga lahko kot beton z visoko-učinkovitim obnašanjem, kar zajema vse njegove izboljšane mehanske lastnosti in odpornosti na zunanje vplive. Narejen je s pazljivo izbranimi visoko-kvalitetnimi materiali. Sestave mešanic zanj so optimizirane in so pripravljene, mešane, vgrajene in negovane po najvišjih industrijskih standardih.

Za take betone veljajo tudi drugačna konstrukcijska pravila oziroma računi za določanje mehanskih lastnosti kot za betone običajne trdnosti. Ne bi bilo pravilno uporabiti povezave med njegovimi mehanskimi lastnostmi in njegovo tlačno trdnostjo, ki so bile že razvite preko uporabe betona običajne trdnosti in so zapisane v gradbenih pravilnikih. Potrebno je raziskati, kako mikrostruktura betona vpliva na njegove lastnosti. Vsekakor se včasih beton visoke trdnosti obnaša le kot navaden beton, ki ima višjo tlačno trdnost. Zaradi drugačne mikrostrukture, ki je vzrok drugačnega razporeda napetosti v betonu, pa se velikokrat obnaša tudi sicer drugače kot beton običajne trdnosti.

Pomembni značilnosti betona visoke trdnosti sta tudi homogenost in gosta struktura. To običajno dosežemo z nižjim vodo-vezivnim razmerjem, pri čemer moramo betonski mešanici dodajati še različne dodatke. S tem hkrati dosežemo zadostno plastičnost oziroma posed. Pri tem se moramo zavedati, da je potrebno hkrati kontrolirati reologijo, kar je težko. Tu je potrebno upoštevati predvsem plastično<sup>5</sup> in avtogeno krčenje.

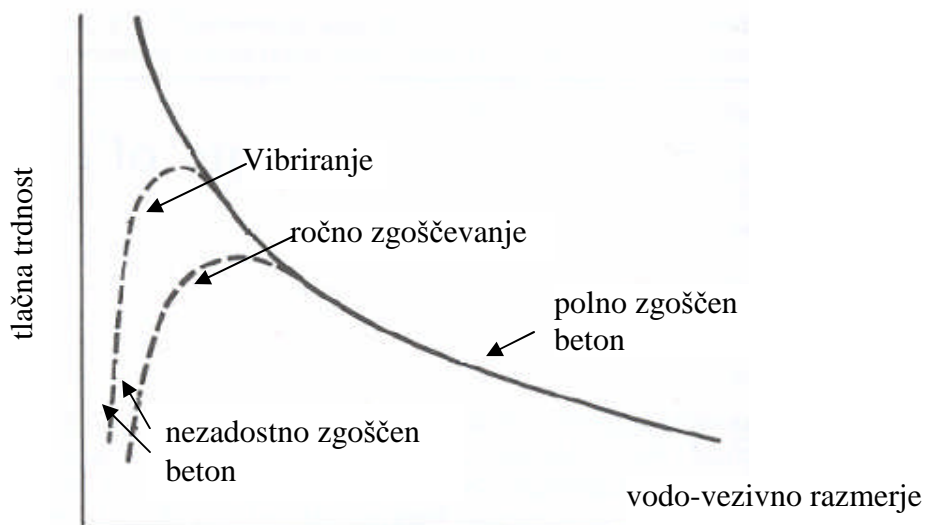
---

<sup>5</sup> Krčenje zaradi izgube vode iz neotrdlega betona v času, ko je ta še v plastičnem stanju

### 3.1 Tlačna in natezna trdnost

Trdnost izkazuje celostno sliko kvalitete betona, ker je neposredno povezana s strukturo hidratizirane cementne paste; je bistven element konstrukcijskega dimenzioniranja. Njena velikost je predpisana glede na vrsto uporabe betona.

Če je uporabljen agregat trdnejši od cementnega kamna, lahko predvidimo tlačno trdnost betona visoke trdnosti glede na vodo-vezivno razmerje. Spodnja slika kaže, da je veljavnost odvisnosti tlačne trdnosti betona od vodo-cementnega faktorja omejena. Pri zelo nizkih vrednostih vodo-cementnega razmerja se krivulja konča. Mešanice z zelo nizkim vodo-cementnim razmerjem in veliko vsebnostjo cementa (nad  $530 \text{ kg/m}^3$ ) pokažejo znižanje trdnosti, kadar so uporabljena velika agregatna zrna. Vzrok tega je razpokanost cementnega kamna ali izguba vezi med cementom in agregatom, za kar je kriva napetost, ki jo povzroči krčenje, omejeno z delci agregata. [A. M. Neville, 1999]



Slika 1: Povezava med trdnostjo in vodo-vezivnim faktorjem betona (A. M. Neville, 1999, str.270)

Če uporabimo določen cement in zadosti trden agregat, lahko na trdnost betona vplivamo z:

- razmerjem cement/zamesna voda,
- razmerjem cement/agregat,
- granulometrijsko sestavo, površinsko teksturo, obliko in togostjo agregatnih delcev,
- največjim zrnom agregata.

Beton lahko smatramo kot nehomogen material, sestavljen iz treh faz:

- hidratizirane cementne paste oz. cementnega kamna
- stičnega območja med agregatom in cementnim kamnom,
- agregata.

Pozornost moramo posvetiti povečevanju trdnosti vsaki od teh treh faz, saj je beton trden toliko kot je trden njegov najšibkejši člen. Pri betonu običajne trdnosti je skoraj vedno najšibkejši člen hidratizirana cementna pasta in je trdnost betona odvisna predvsem od njene trdnosti. Na drugi strani je mikrostruktura betona visoke trdnosti bolj gosta, vključno s stičnim območjem, preko katerega sta povezana agregat in cementni kamen. To pomeni, da mehanske lastnosti grobega agregata<sup>6</sup> vplivajo na nekatere mehanske lastnosti betona visoke trdnosti.

Trdnost hidratizirane cementne paste lahko izboljšamo z naslednjimi ukrepi:

- znižanjem vodo-vezivnega razmerja, ki hkrati ne povzroči težav pri drugih lastnostih betona, predvsem reoloških,
- zmanjšanjem števila majhnih por, ki so čimbolj enakomerno razporejene,
- zmanjšanjem velikosti zrn cementne paste,
- izogibanjem nehomogenosti.

Glavni faktorji, ki vplivajo na poroznost hidratizirane cementne paste, so količina razpoložljive vode, prostornina silikatne faze, ki bo hidratizirala, in količina zraka, ujetega med mešanjem. Kadar je v hidratizirani cementni pasti zraka manj kot 1-2% celotne prostornine betona, lahko trdnost betona izrazimo z enačbo:

$$f'_c = k \cdot \frac{1}{(1 + (w/c))^2} \text{ [P.-C. Aïtcin, 1998, str.91]},$$

kjer je  $k$  konstanta, odvisna od vrste cementa. Torej moramo za povečanje tlačne trdnosti betona zmanjšati vodo-cementno oziroma vodo-vezivno razmerje. Če je beton visoke trdnosti bolj porozen in je zračnih por v njem več, navedena enačba ne velja. Tega dejstva v aeriranem betonu ne smemo zanemariti. Gradbeni inženirji se držijo pravila, da vsak dodatni odstotek zraka v betonu pomeni za 5% nižjo trdnost [Aïtcin, 1998, str. 428]. Poseben izziv predstavlja

---

<sup>6</sup> Grobi agregat predstavljajo večja agregatna zrna

narediti beton z nizkim vodo-vezivnim razmerjem brez večje količine vključenega zraka. S primerno količino zaprtih zračnih mehurčkov moramo narediti beton, ki ima dovolj veliko trdnost in je hkrati dovolj odporen na zmrzovanje.

V začetku so smatrali beton kot dvofazni material (cementni kamen in agregat). Sčasoma so ugotovili, da ima stično območje med agregatom in cementnim kamnom v betonu povsem drugačne lastnosti od čistega cementnega kamna in igra pomembno vlogo pri trdnosti in trajnosti betona. Med konsolidacijo groba agregatna zrna zaradi svoje velikosti, oblike in površinske teksture preprečujejo enotno, homogeno razporeditev vode v svežem betonu. Zaradi tega lokalnega učinka zidu, se nekaj vode akumulira na površini agregatnih zrn, posledica česar je višje vodo-vezivno razmerje na stičnem območju. Mikrostruktura tega območja vsebuje zato večje pore in večje kristalizirane hidratacijske produkte. Zato tam rastejo orientirani kristali Portlandskega cementa in igličasti kristali etringita, kar naredi to območje zelo porozno in šibko. To območje je pri betonu visoke trdnosti veliko bolj homogeno.

Z uporabo superplastifikatorjev, ki so potrebni za doseganje dovolj velikega poseda, je bila ustvarjena nova heterogena cona na vrhu površine betona, ki je postala znana kot »koža betona«, »zunanja koža« ali »betonski plašč« . [Aitcin, 1998]. Tudi to območje nima enake sestave in mikrostrukture kot notranjost betona. S povečevanjem plastičnosti oziroma poseda se poveča učinek zidu, katerega lahko ustvarimo tudi z uporabo večjega števila dodatkov cementu, ki imajo različno specifično težo.

Pri betonu visoke trdnosti sta hidratizirana cementna pasta in stično območje tako trdna, da lahko agregat postane šibek člen v betonu in je pomembna tudi njegova izbira. Uporablja se naravni pesek in gramoz. Do njiju lahko pridemo tudi z drobljenjem, njuna trdnost je odvisna od matične skale, iz katere je bil agregat drobljen. Ker pa miniranje in drobljenje nista nežna postopka, moramo izbrati močno skalo z drobno teksturo, da dobimo delce brez napak. Izvorna skala je lahko enofazna kot so apnenec, dolomit in sienit, ali polifazen material kot je granit. Izogibati se je potrebno uporabi slojevitih skal in skal, ki so bile izpostavljene težkim vremenskim razmeram. Ploski in podolgovati agregatni delci slabše vplivajo na obdelovalnost betona in visoko trdnost. [Aitcin, 1998]



Najvišja dosežena temperatura vgrajenega betona ni sorazmerna s količino uporabljenega cementa, temveč je odvisna od količine hidratiziranega cementa. Pri betonu običajne trdnosti višja zunanja temperatura v zgodnji starosti privede do povišanja njegove zgodnje, vendar znižanju končne trdnosti. [Aitcin, 1998]

Vzorci v laboratoriju, ki so dolgotrajno negovani z vlago, imajo višjo tlačno trdnost kot beton, vgrajen v konstrukcijo. Ta je namreč izpostavljen zunanjim pogojem okolja. Skozi površino vzorca iz betona vdre nekaj vode in hidratacija se zato na že tako gostem robu nadaljuje. Na dejanskem konstrukcijskem elementu se hidratacija zaradi pomanjkanja vode medtem že zaključí.

Kako trdnost betona narašča s časom je odvisno od vrste uporabljenega cementa, vrste in količine dodatkov, vodo-vezivnega razmerja, temperature in pogojev nege. Za povprečno temperaturo 20°C in nego, ki je skladna z EN 12390, lahko rečemo, da tlačno trdnost betona pri različnih starostih lahko ocenimo z izrazom:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (1),$$

kjer je koeficient  $\beta_{cc}$  odvisen od starosti  $t$  betona:

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2)$$

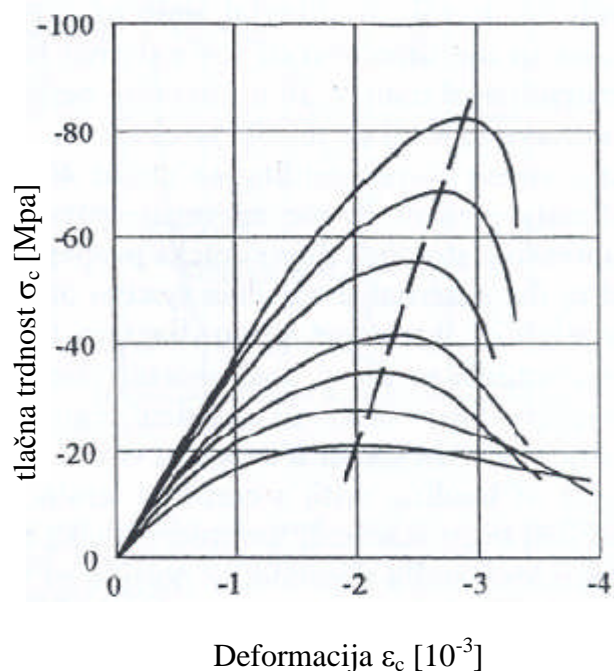
in  $s$  koeficient, ki je odvisen od vrste cementa:

- = 0,2 za cimente trdnostnega razreda CEM 42,5, CEM 53,5 N in CEM 53,5 R
- = 0,35 za cimente trdnostnega razreda CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (razred N)
- = 0,38 za cimente trdnostnega razreda CEM 32,5 N (razred S)

[Eurocode 2, Final Draft, pr EN 1992-1-1, 2003]

### 3.2 Modul elastičnosti

Beton z višjo trdnostjo manj razpoka skozi proces nanašanja obtežbe kot beton z običajno trdnostjo. Posledica tega je strmejša krivulja napetost-deformacija, ki je linearna do večjega deleža končne trdnosti kot pri običajnem betonu [A. M. Neville, 1999]. Tudi padajoči del krivulje je strmejši, kar kaže na večjo krhkost betona visoke trdnosti. To vodi do nenadne lokalne porušitve elementov iz takega betona. Pri enakem razmerju napetost/trdnost, je deformacija betona z višjo trdnostjo večja. Vendar se pod enako napetostjo trdnejši beton deformira manj zaradi višjega modula elastičnosti.



Slika 2: Diagrami napetost-deformacija v tlaku za betone različnih tlačnih trdnosti

(do 85 MPa), ki so izpostavljeni konstantnim napetostim  
(CEB/FIB Model Code 1990, 1999, str. 28)

Modul elastičnosti betona je odvisen od modulov elastičnosti njegovih sestavin, to je hidratizirane cementne paste in agregata. Lahko ga ocenimo glede na njihove module na osnovi teorije kompozitnih materialov ali glede na tlačno trdnost betona [CEB/FIB Model Code 1990,1999]:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot E_{co} \cdot \left( \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{1/3} \quad (3),$$

kjer sta  $E_{co} = 2,15 \cdot 10^4$  MPa in  $f_{cmo} = 10$  MPa ter je koeficient  $\alpha_E$  odvisen od vrste agregata (glej *Preglednico 1*)

Preglednica 1: Vpliv vrste agregata na modul elastičnosti betona  
(CEB-FIB MC 90, str.30)

Vrsta agregata	$\alpha_E$
Bazalt, kompakten apnenec	1,2
Kremenčev agregat	1,0
Apnenec	0,9
Peščenjak	0,7

Projektanti najpogosteje uporabijo izkustven pristop, ki predvideva, da isti parametri vplivajo na tlačno trdnost in modul elastičnosti betona. Izkazalo se je, da to skoraj popolnoma velja za beton običajne trdnosti, kjer je cementni kamen dovolj porozen. Ta predstavlja šibki člen betona in tako vpliva hkrati na obe vrednosti. Pri betonu visoke trdnosti pa je lahko šibek člen tudi agregat, vendar je prenos napetosti znotraj tega betona veliko boljši, celo kadar je šibek člen cementni kamen. Betoni enake tlačne trdnosti, narejeni iz različnih vrst agregata, imajo lahko zelo različne module elastičnosti. [Aitcin, 1998]

Obstaja veliko različnih teoretičnih obrazcev, ki upoštevajo različen učinek modulov elastičnosti agregata in malte na modul elastičnosti celotnega betona. Ti obrazci so uporabni, ker lahko iz njih vidimo kakšen vpliv ima na modul elastičnosti posamezna sestavina betona. Vendar pa te enačbe ne rešujejo osnovnega problema, ampak ga še povečajo, saj je potrebno v tem primeru namesto enega poznati dva modula elastičnosti.

Modul elastičnosti betona se razvija hitreje kot tlačna trdnost, ker je ta v veliki meri odvisen od modula elastičnosti agregata, ki je neodvisen od starosti betona. Ta ugotovitev je upoštevana v naslednji enačbi [CEB/FIB Model Code 1990, 1999]:

$$E_{ci}(t) = \beta_E(t) \cdot E_{ci} \quad (4)$$

kjer je funkcija, ki opiše časovni razvoj modula elastičnosti enaka:

$$\beta_E = [\beta_{cc}(t)]^{0.5} \quad (5)$$

Pri zelo nizki temperaturi je modul elastičnosti betona mnogo višji kot pri sobni temperaturi. Vzrok za to je zamrznjena voda v sistemu por hidratizirane cementne paste, katera se obnaša kot trdna snov, ki nosi obremenitev. Ponavljajoče zamrzovanje in tajanje ima lahko na beton uničujoč učinek.

V Eurocodu 2 je modul elastičnosti  $E_{cm}$  določen kot sekanta med napetostima  $\sigma_c = 0$  in  $\sigma_c = 0,4 \cdot f_{cm}$ . Njegove vrednosti za betone s kremenovim agregatom so napisane v Preglednici 1. Za betone z apnenčevim agregatom in peščenjakom moramo njihove vrednosti znižati za 10% oz. 30%, za betone z bazaltovim agregatom pa zvišati za 20%.

Preglednica 2: Trdnostne karakteristike, moduli elastičnosti in mejne deformacije za betone različnih tlačnih trdnosti (Eurocode, Final Draft, pr EN 1992-1-1, 2003, str.27)

	Trdnost													Analitična razlaga
$f_{ck}$ (MPa)	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck, cu}$ (MPa)	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
$f_{cm}$ (MPa)	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$E_{cm}$ (GPa)	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0.3}$ $f_{cm}$ v MPa
$\epsilon_{c2}$ (‰)	2,0								2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	$f_{ck} > 50\text{MPa}$ : $\epsilon_{c2(\%)} = 2,0 + 0,085 \times (f_{ck} - 50)^{0,53}$
$\epsilon_{cu2}$ (‰)	3,5								3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	$f_{ck} > 50\text{MPa}$ : $\epsilon_{c2(\%)} = 2,6 + 35 \times [(90 - f_{ck})/100]^4$
$n$	2,0								1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	$f_{ck} > 50\text{MPa}$ : $n = 1,4 + 23,4 \times [(90 - f_{ck})/100]^4$

Časovno naraščanje modula elastičnosti lahko opišemo z enačbo:

$$E_{cm}(t) = \left( \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (6)$$

Razmerje med  $f_{cm}$  in  $f_{cm}(t)$  sledi iz *Enačbe 1*.

### 3.3 Trajnost betonov visoke trdnosti

Agresivne vplive na beton lahko razvrstimo v dve osnovni kategoriji: zunanje in notranje. Med zunanje napadalce spadajo: kloridni ioni, ogljikov dioksid, sulfati, bakterije in drobir ter mraz, ki ustvarja cikle zmrzovanja in tajanja. Med notranje vplive pa lahko štejemo vključene kloridne ione (kadar uporabimo določene pospeševalce kot dodatke) in cementne alkalije oz. luge (ko uporabimo potencialno agresivne agregate). Težko je govoriti o trajnosti na novo razvitega materiala kot je beton visoke trdnosti, saj je to povezano z dolgoročnim obnašanjem tega materiala v nekem okolju pod določenimi pogoji. Zaradi majhnega obsega njegove uporabe ni na voljo dovolj informacij o njegovem obnašanju. Tako ne moremo z gotovostjo trditi, da pomeni uporaba betonov visoke trdnosti racionalno izbiro zaradi zagotavljanja daljše življenske dobe konstrukcije.

Za trajnost je pomembno, kako načrtujemo in izvedemo gradnjo betonske konstrukcije ter kako negujemo beton, s katerim gradimo, popravljamo ali prenavljamo betonsko konstrukcijo. Intenzivnost zunanjih kemijskih vplivov lahko zmanjšamo z zmanjšanjem poroznosti in propustnosti betona. S tem zmanjšamo penetracijo agresivnih snovi. Torej je potrebno, da naredimo gost, čvrst in nepropusten beton, kar dosežemo z nizkim vodo-vezivnim razmerjem. To vodi tudi do visoke tlačne trdnosti.

Čeprav inženir nima vpliva na pogoje okolja, se lahko s primernim načrtovanjem določenih detajlov izogne ustvarjanju umetnih uničujočih mikro-klimatskih pogojev, na primer koncentraciji agresivnih snovi na enem mestu konstrukcije. Ko načrtujemo betonsko konstrukcijo, moramo najprej določiti, kakšnim pogojem bo beton izpostavljen med življenjsko dobo konstrukcije in temu primerno prilagoditi sestavo betona. Izbrati je potrebno

primerne materiale, da se bo beton uspešno upiral vsem pogojem okolja. V primeru spremembe uporabe ali okolja betonske konstrukcije, je nujno tudi ugotoviti, če bo beton sposoben prenašati drugačne vplive v novem okolju.

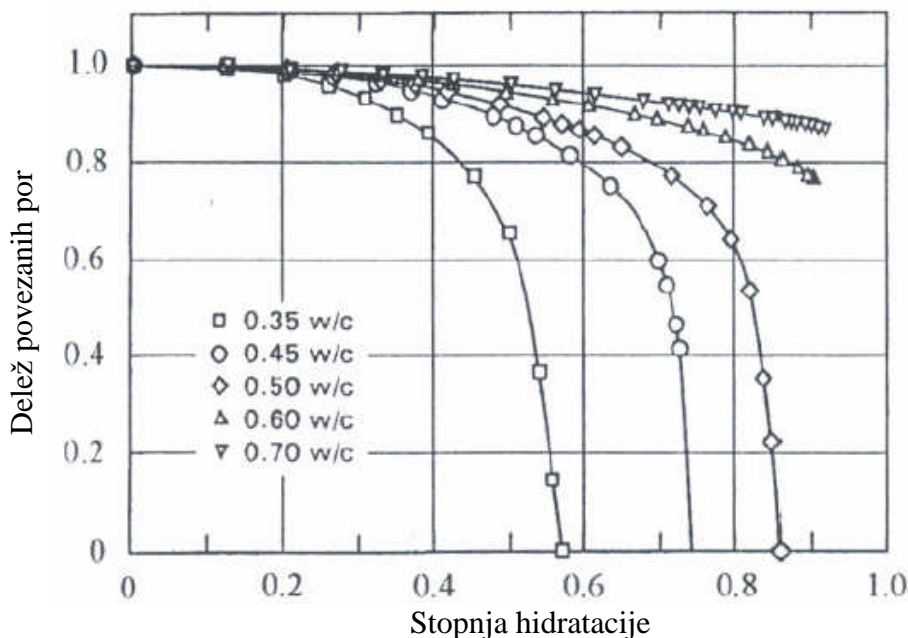
V primerjavi z ostalimi materiali je primerna vgradnja in nega betona zelo pomembna za doseganje zadostne trajnosti betona. Pretirano vibriranje betona povzroča notranje izcejanje celo v betonu visoke trdnosti z nizkim vodo-vezivnim razmerjem. Lahko se ustvari mreža medsebojno povezanih kapilar, ki poteka skozi celoten betonski element do njegove površine. Ta mreža kapilar predstavlja lahek način penetracije za vse agresivne snovi. Beton mora biti vibriran, vendar ne preveč. Zadosten kriterij je povprečen posed od 180-200 mm. Tudi prezgodnje sušenje betonske površine lahko poslabša trajnost betona, saj se lahko ravno tako pojavi mreža kapilar na površini betona. Dobra, primerna nega betona upočasni gradnjo, zato je mnogokrat zanemarjena. Vendar vlaženje betonske površine z nabijanjem ali zaščita pred soncem z namenom, da se prepreči njeno sušenje, lahko veliko pripomore k trajnosti betonske konstrukcije.

### **3.3.1 Poroznost in propustnost betonov visoke trdnosti**

Hidratiziran cementni gel vsebuje sistem por, ki predstavljajo približno 25 % prostornine gela. Njihova prostornina se povečuje z višanjem stopnje hidratacije, vendar je neodvisna od vodo-vezivnega razmerja in je ne moremo kontrolirati ali vplivati nanjo z običajnimi tehnološkimi ukrepi. Kapilarna poroznost pa se s poviševanjem vodo-vezivnega razmerja občutno poviša in z rastjo stopnje hidratacije zniža. Po hidrataciji ostanejo nekatere kapilarne pore prazne celo pod konstantno vlažnimi pogoji, saj je prostornina hidratiziranega cementnega gela manjša kot je prostornina cementa in vode skupaj na začetku reakcije [*CEB/FIB Model Code 1990, 1999*]. To vodi do notranjega sušenja, opisanega kot samoizsuševanje, ki je značilno za betone visoke trdnosti. Največja stopnja hidratacije je odvisna od vodo-vezivnega razmerja dokler je le-ta nižji od 0,42. Torej pri nižjem vodo-vezivnem razmerju hidratizirana cementna pasta vsebuje veliko nehidratiziranega cementa celo pri višjih starostih, kar vpliva na lastnosti betona visoke trdnosti.

Na večjo zgostitev cementnih delcev pred hidratacijo lahko vplivamo z optimalnim razporedom velikosti zrn, z zmanjševanjem poroznosti agregata, znižanjem vodo-vezivnega razmerja (nižanjem maksimalne stopnje hidratacije) in povečevanjem zgoščevanja. S tem dosežemo izboljšano nepropustnost. Drugi način je, da prazne prostore med cementnimi zrnji zapolnimo s tako imenovanimi mikropolnili kot so npr. elektrofilterski pepel ali mikrosilika.

Na trajnost betona močno vpliva povezanost sistema por cementnega kamna. Slika 4 prikazuje delež medsebojno povezanih kapilarnih por v hidratiziranih cementnih pastah z različnimi vodo-vezivnimi razmerji kot funkcijo stopnje hidratacije:



Slika 3: Učinek vodo-cementnega razmerja in stopnje hidratacije na povezanost kapilarnih por v hidratizirani cementni pasti

(Bentz in Garboczi, 1991 v CEB/FIB Model Code 1990, 1999, str. 25)

Povezanost kapilarnih por v hidratizirani cementni pasti z nizkim vodo-vezivnim razmerjem se močno zmanjšuje tekom hidratacije. Pri višjih vodo-vezivnih razmerjih pa sistem kapilarnih por nikoli ne postane popolnoma nepovezan, kar pospešuje penetracijo<sup>7</sup> tekočin in plinov v beton.

<sup>7</sup> vdor v notranjost betonskega elementa

Celotna poroznost normalno težkega betona niha med 8-15 % prostornine. Velik vpliv na trdnost in deformacijske karakteristike otrdelega betona ter na trajnost imajo tudi mikrorazpoke. Zaradi njih je vodo-propustnost betona večja kot vodo-propustnost samega cementnega kamna, čeprav uporabimo gost agregat z zelo nizko vodo-propustnostjo.

### **3.3.2 Kemijska korozija in korozija armature**

Osnovni mehanizem napada kemičnih snovi je naslednji: različni hidratizirani produkti so v ravnovesju z okoliško raztopino v porah dokler ne vstopijo zunanji ioni in podrejo ravnovesja v raztopini. Novo ravnovesje je potem doseženo pri razkroju določenih hidratiziranih produktov in tvorbi novih produktov. Večja odpornost betonov visoke trdnosti na kemične snovi v primerjavi z betonom običajne trdnosti je predvsem zasluga nižje propustnosti. Kemični napadi ne morejo biti popolnoma zaustavljeni, lahko pa so upočasnjeni. Kemične snovi lahko vstopajo v betonski element skozi razpoke v betonu, ne glede na njihov izvor. Ta je lahko toplotno krčenje, plastično ali avtogeno krčenje, krčenje zaradi sušenja, obtežbe itd. Zato je potrebno izločiti katerikoli vpliv okolja, ki ustvarja razpoke v betonu.

Kadarkoli krovni sloj, ki naj bi varoval armaturo pred oksidacijo ali rjavenjem, ne izpolni svoje naloge, se pojavi korozija armaturnega jekla. Razlogi za to so različni: previsoko vodo-vezivno razmerje, slaba nega ali sploh odsotnost le te, premajhen zaščitni sloj armature, vstop kloridnih ionov, karbonatizacija itd. Oksidacija ali rjavenje jekla je povezano s povečevanjem prostornine, ki najprej povzroči mikrorazpoke ali poveča število že obstoječih razpok v krovni plasti, nastalih zaradi neprimerne nege betona. Sčasoma niso delovanju korozije izpostavljene samo armaturne palice, temveč tudi beton v notranjosti betonskega elementa. Ta problem rešujemo na dva načina:

- uporabimo armaturne palice, ki so zaščitene proti koroziji,
- uporabimo nepropustne betone in debelino zaščitnega sloja prilagodimo ostrosti pogojev okolja.

Dodatni cementni material zmanjšuje mobilnost kloridnih ionov v betonu. Nižji koeficienti difuzije v teh primerih nastanejo zaradi večje drobnosti, finosti pornega sistema. Leta 1993 pa so odkrili, da se penetracija drastično poveča z zmanjševanjem pH-ja. [Aïtcin, 1998].



Karbonatizacija je kemijski proces, ki večinoma ni škodljiv za sam beton, temveč lahko poškoduje armaturo. Ker se zmanjšuje pH vrednost medzrnske tekočine v betonu, je na udaru armatura zaradi potencialne korozije. Ogljikov dioksid iz ozračja ponavadi reagira s kalcijevim hidroksidom v betonu:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  [CEB/FIB Model Code 1990, 1999, str.71]. Globina karbonatizacije se povečuje z zmanjševanjem vlage v betonu in se ustavi, če so kapilarne pore v hidratiziranem cementnem kamnu zapolnjene z vodo. Karbonatizacija napreduje počasi kljub veliki vsebnosti plina ( $\text{CO}_2$ ) v suhem betonu, saj je za kemijsko reakcijo potrebna določena količina vlage. Karbonatizacija spremeni poroznost hidratizirane cementne paste. Njena globina je za različne betone z enakimi vodo-vezivnimi razmerji večja pri betonih z večjo vsebnostjo žlindre.

Tudi morska voda lahko uničuje beton zaradi velike koncentracije raztopljenih soli. Kisline povzročajo raztapljanje vseh sestavin hidratizirane cementne paste. V njihovi prisotnosti so ranljivi tudi nekateri agregati, posebej agregati iz apnenca. Stopnja raztapljanja se povečuje z zmanjševanjem pH vrednosti kisline. Raztapljanje se pojavi zaradi tvorbe topnih soli v reakciji:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  [CEB/FIB Model Code 1990, 1999, str.74]. Bolj škodljive v tem pogledu so anorganske kisline.

Sulfati iz talne ali morske vode, prsti ali blata povzročajo ekspanzijo betona. Ob reakciji npr. natrijevega sulfata s kalcijevim hidroksidom se pojavi zamenjava ionov. V tej reakciji se tvori mavec, zaradi česar se prostornina poveča za približno 20 %. Mavec se lahko raztopi v vodi ali sodeluje v reakciji s  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  v Portland cementnem klinkerju, kar vodi v tvorbo etringita:  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  [CEB/FIB Model Code 1990, 1999, str.74].

Poseben tip korozije, ki vodi do napada kislin ali sulfatov, povzročajo biogenske reakcije v prisotnosti bakterij. Do tega pride predvsem na površini betonskih elementov, predvsem v kanalizacijskih sistemih. Najbolj pogosta reakcija je tvorba hidrogen sulfida  $\text{H}_2\text{S}$ , ki jih tvorijo bakterije v odsotnosti kisika. V prisotnosti kisika se tvori fosfatna kislina  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , ki je uničujoča za beton.

Izogibati se moramo tudi alkali-agregatni reakciji. Z opazovanjem betona običajne trdnosti, ugotovimo, da se morajo sočasno pojaviti trije naslednji pogoji v betonu visoke trdnosti, da pride do nje:

- agregat mora biti potencialno reaktiven,
- koncentracija alkalij (lugov) mora biti dovolj visoka znotraj medzrnske raztopine v betonu,
- beton mora biti vlažen.

Velik vpliv na raztezanje betona imajo zunanji vlažnostni pogoji, saj previsoka relativna vlažnost lahko močno pospeši reakcijo. Beton visoke trdnosti vsebuje običajno veliko cementa, zato se v protorninski enoti betona nahaja več alkalij, ki imajo manj vode, v kateri se lahko raztopijo. Torej je medzrnska tekočina bogatejša z alkalijami in ima zaradi velikih količin Portland cementa visok pH. Ker se hkrati povečuje gostota v betonu, je v njem manj prostora za raztezanje agregata. Razpoložljivost alkalijevih ionov v medzrnski tekočini povečuje uporaba velike količine superplastifikatorja, ker so ti večinoma nevtralizirani s sodo (natrijevim karbonatom). Da se ognemo alkali-agregatni reakciji moramo torej zadostiti vsaj enemu od predhodno omenjenih pogojev, potrebnih za nastanek le te.

### **3.3.3 Odpornost proti zmrzovanju**

Beton je lahko občutno poškodovan zaradi ciklov zmrzovanja in tajanja, če je sistem por zapolnjen z vodo toliko, da beton doseže kritično točko zasičenosti. Zaradi površinske napetosti v majhnih kapilarah in zaradi nižje temperature zmrzovanja raztopine, se količina zamrznjene vode pri nižanju temperature povečuje [*CEB/FIB Model Code 1990, 1999*]. Beton lahko pred temi negativnimi učinki zavarujemo, če se v cementnem kamnu nahajajo večje pore, ki nastanejo zaradi ujetega zraka. Lahko uporabimo aerante, ki tvorijo mikroskopske zaprte celice za ekspanzijo ledu v porah in s tem zmanjšajo notranji pritisk. Aeratorji poleg odpornosti na zmrzovanje in tajanje povečajo tudi odpornost betona na cikle vlaženja in sušenja. Tipični aeriran beton vsebuje 5%-8% prostornine zraka.

Izdelava betona z veliko odpornostjo na zmrzovanje zahteva uporabo primerne agregata, ki ne sme biti preveč porozen, saj se sicer lahko v njem shrani več vode, ki zamrzne in pri raztegotovanju ustvarja razpoke v betonu. Poleg tega lahko odpornost betona na zmrzovanje

izboljšamo z zmanjšanjem kapilarne poroznosti hidratizirane cementne paste, torej z vodo-vezivnim razmerjem in primerno nego.

### 3.3.4 Odpornost proti obrusu in eroziji

Ta vrsta odpornosti je pomembna pri voziščni plošči avtocest, pospeševalnih in zaviralnih območjih cestninskih postaj, pred mestnimi cestnimi tuneli in pri nekaterih delih hidrotehničnih objektov. Takim objektom povzročajo škodo pesek in gramoz z obrusom ter hiter tok vode z erozijo. Nekateri pravilniki celo določajo najnižjo dovoljeno trdnost betona, ki zagotovi dovolj veliko odpornost proti obrusu pod določenimi prometnimi pogoji. Do sedaj smo namreč posvetili odpornosti na obrus zelo majhno pozornost, čeprav je dokazano, da je ta odvisna od njegove tlačne trdnosti ter trdote in količine uporabljenega agregata. Ker je pomembna predvsem odpornost površine, je zelo pomembno tudi pravilno zaključevanje betoniranja in pravilna nega površine [P.-C. Aitcin, 1998]. Na površini moramo v največji možni meri povečati trdnost betona z uporabo visokokvalitetnega agregata.

Aitcin poroča, da so GjØrv, Baerland in Ronning (1987, 1990) z eksperimentalnimi raziskavami ugotovili:

- da se je s povečanjem tlačne trdnosti betona s 50 MPa na 100 MPa, abrazija zmanjšala za približno 50 %,
- da je odpornost betona s tlačno trdnostjo 150 MPa na obrus skoraj tako velika kot odpornost masivnega granita,
- da je življenjska doba betona s 150 MPa desetkrat daljša od življenjske dobe visoko-kvalitetnega asfalta,
- odpornost na obrus se zmanjša pod vlažnimi pogoji v primerjavi s suhimi, vendar je razlika manjša pri višji tlačni trdnosti,
- kvaliteta grobega in drobnega agregata je zelo pomembna.

V neki drugi raziskavi, ki so jo izvedli Laplante, Aitcin in Vezina (1991), je bilo ugotovljeno, da je kvaliteta grobega agregata najpomembnejši faktor, ki vpliva na odpornost na obrus betona. Mikrosilika ravno tako vpliva na odpornost na obrus, vendar manj kot agregat in celo manj kot vodo-vezivni faktor.

### **3.3.5 Temperaturna in požarna odpornost**

Odpornost betona visoke trdnosti na požar je potrebno dobro preučiti, saj je zaradi nižanja vodo-vezivnega razmerja spremenjena njegova struktura. Ta je namreč bolj gosta, zaradi česar ga ne moremo več obravnavati kot porozni material. Te notranje pore pri betonu običajne trdnosti omogočajo znižanje povišanega pritiska zaradi višje toplote. Zato predvidevamo, da je beton visoke trdnosti manj požarno odporen kot beton običajne trdnosti.

Za povišanje odpornosti materiala na ogenj so bili predlagani razni ukrepi, od katerih je bil najbolj smiseln predlog, o katerem poroča v svoji knjigi Aitcin. Diedrich in sod. (1993) so predlagali, da bi v beton dodali nekaj plastičnih vlaken, katera bi se stopila v primeru dviga temperature betona in s tem ustvarila kanale, skozi katere bi se iz betona lahko sprostila vodna para, saj bi s tem ta beton postal bolj porozen.

## 4 MEŠANICE ZA BETON VISOKE TRDNOSTI

Lastnosti betona visoke trdnosti so odvisne tudi od lastnosti posamezne sestavine mešanice. Potrebno je upoštevati tudi medsebojno sodelovanje vseh sestavin betona.

### 4.1 Lastnosti uporabljenih materialov

Obnašanje in kvaliteta vsake sestavine betona postajata z uporabo betona visoke trdnosti vse pomembnejša. Nekatere med njimi bolj vplivajo na končno ceno betona visoke trdnosti in s tem določajo njegovo konkurenčnost glede na jeklo in beton običajne trdnosti.

Kemični dodatki imajo velik vpliv na zgodnjo trdnost, kasnejše trdnosti so odvisne predvsem od mineralnih dodatkov. Vsi vezivni materiali naj bi bili vsaj tako drobnozrnati kot Portland cement. Njihova kvaliteta je odvisna od izvora, kemijske sestave in fizikalnih lastnosti kot sta površinska struktura in specifična teža.

Določen cementni material je lahko naravno hidravličen, kar pomeni, da lahko hidratizira sam in pripomore k trdnosti betona. Takšen material je Portland cementni klinker. Lahko ima tudi prikrite hidravlične lastnosti. To pomeni, da lahko kaže svojo hidravlično aktivnost samo kot posledica kemijske reakcije z nekimi drugimi sestavinami kot so produkti hidratacije Portland cementa, ki je tudi sestavni del mešanice. Takšni materiali so plavžna žindra, naravni pucolani, elektrofiltrski pepel (razreda F<sup>8</sup> in C), mikrosilika, apnenčevo polnilo. Tretja možnost je, da je tak material kemijsko nedejaven in ima samo učinek katalizatorja pri hidrataciji ostalih materialov. Taki materiali se imenujejo polnila.

---

<sup>8</sup> Glej poglavje 4.1.3- elektrofiltrski pepel

### 4.1.1 Cementi

Osnovne sestavine za pridobivanje Portland cementa vsebujejo okside kalcija, silicija, aluminija in železa - CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ti oksidi se v večjih količinah v naravi nahajajo v apnencih in glinah in sestavljajo molekule alita, belita in trikalcijevega aluminata oz. aluminatne faze (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Železov oksid je v surovo mešanico dodan z namenom, da zniža temperaturo zgorevanja. Vsebnost vseh štirih spojin v različnih Portland cementih niha znotraj naslednjih vrednosti:

- trikalcijev silikat ali alit	3·CaO·SiO <sub>2</sub> ali C <sub>3</sub> S	45-60 %
- dikalcijev silikat ali belit	2·CaO·SiO <sub>2</sub> ali C <sub>2</sub> S	20-30 %
- trikalcijev aluminat ali aluminatna faza	3·CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ali C <sub>3</sub> A	4-12 %
- tetrakalcijev aluminat ferit ali feritna faza	4·CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ali C <sub>4</sub> AF	10-20 %

Kalcijevi silikati imajo najpomembnejši vpliv na trdnost in hidratacijsko toploto Portland cementa. Cementi z večjo količino alita reagirajo hitreje kot tisti z večjo količino belita.

Portland cement je hidravlično vezivo proizvedeno z mletjem klinkerja, ki mu istočasno dodamo 3-5 % sadre (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). Pri betonih običajne trdnosti se količina veziva običajno spreminja med 300 kg/m<sup>3</sup> in 400 kg/m<sup>3</sup> betona, pri betonih visoke trdnosti se giblje med 400 kg/m<sup>3</sup> in 550 kg/m<sup>3</sup> betona.



Iz zgornjih dveh kemijskih reakcij vidimo, da pri hidrataciji alita z enako količino vode kot pri hidrataciji belita nastane dvakrat toliko kalcijevega hidroksida. Razvoj toplote pri hidrataciji alita znaša 502 J/g in je mnogo večji kot pri hidrataciji belita, kjer znaša 260 J/g. Aluminatna faza običajno ni zaželen, ker je kasneje lahko vzrok korozijskega razpadanja betona. Vendar v začetku ta faza veliko pripomore k zgodnji trdnosti. Reakcija aluminatne faze zahteva največjo količino vode, njena zrna so najbolj drobna in razvijejo največ toplote pri hidrataciji (867 J/g):  $C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$ . Feritna faza hidratizira

podobno kot aluminatna, vendar znatno počasneje. Razvije prav tako dokaj visoko hidratacijsko toploto (419 J/g).

Za izdelavo betona tlačnih trdnosti do 75 MPa lahko uporabimo kateregakoli od sedanjih cementov, medtem ko za izdelavo betonov tlačnih trdnosti 75-100 MPa ne. Za beton višje tlačne trdnosti – od 125 MPa in več kot 150 MPa - je lahko uporabljenih le nekaj od sedaj poznanih vrst cementa. Nekateri cementi omogočajo doseganje visoke končne tlačne trdnosti, vendar se obnašajo reološko slabo. Težko je namreč doseči, da ostanejo plastični dovolj dolgo, da ga lahko zadosti zanesljivo in ekonomično vgradimo. Drugi učinkujejo zelo dobro reološko, vendar so slabi v doseganju končne tlačne trdnosti. Če z betonom gradimo tam, kjer obstaja nevarnost napada sulfatov, je potrebno uporabiti na sulfate odporni cement. Odpornost na abrazijo lahko dosežemo z upoštevanjem zahtev za trdnost. Na abrazijo bo bolj odporen beton, ki mu dodamo elektrofiltrski pepel in beton z več cementa, manj je pomemben izbor specifičnega grobega agregata.

Za doseg različnih lastnosti betona imamo različne vrste cementa. Razlike v fizikalnih lastnostih cementov so velike, predvsem v zgodnji fazi hidratacije. V hidratiziranih cementnih pastah so razlike manjše. Vpliv dodatka cementu ni več tako zaznaven, če uporabimo veliko cementa ali če ima le ta veliko specifično površino. Če v cementu prevladuje mineral alit, je učinek pucolanske<sup>9</sup> reakcije zaznaven že zelo zgodaj. Na drugi strani lahko nek cement pozitivno vpliva na ene lastnosti in negativno na druge, zato je potrebno poiskati ravnotežje zelenih rezultatov. Upoštevati je potrebno tudi ekonomičnost izdelave betona.

*Navadni Portland cement* se največ uporablja in je zelo primeren za splošno uporabo v betonskih konstrukcijah, ki niso izpostavljene sulfatom v zemlji ali talni vodi. V Evropskem standardu ENV 197-1:1992 je zahtevana 95-100% vsebnost Portland cementnega klinkerja za izdelavo tega cementa. *Hitro-vezoči Portland cement* razvije trdnost hitreje v primerjavi z ostalimi cementi in se imenuje cement z visoko zgodnjo tlačno trdnostjo. To je posledica večje količine alita (več kot 55 %, včasih celo do 70 %) in drobnega mletja cementnega

---

<sup>9</sup> Reakcija, pri kateri je dodatni cementni material katalizator, ki reagira s produkti hidratacije, kalcijevimi hidroksidnimi ioni, in s tem tvori produkte, ki zvišujejo tlačno trdnost betona

klinkerja. Pri *Specialnem hitro-vezočem Portland cementu* hiter razvoj trdnosti dosežemo z drobnimi zrni, zato mora biti količina sadre večja kot v cementih v skladu z Evropskim standardom ENV 197-1:1992. Ob isti količini ostalih sestavin mešanice se uporaba tega cementa kaže v manjši obdelovalnosti. *Nizko-toplotni Portland cement* uporabljamo, kjer obstaja možnost škodljivih razpok betona zaradi povišane temperature ob hidrataciji cementa. *Sulfatno-odporni cement* ima majhno količino alita, s čimer se izognemo »betonski kugi«, do katere pride zaradi napada sulfatov, saj se pri reakciji med alitom in sadro poveča prostornina trdne faze za 227 %, kar vodi v rušenje betonske strukture. *Beli Portland cement z barvili* včasih uporabijo zaradi arhitekturnih razlogov. Boljši način za doseg enotnega in trajnega barvnega betona je uporaba barvnega cementa. *Metalurški cement* sestoji iz mešanice Portland cementa in žindre iz plavža, ki je odpadni material v proizvodnji surovega železa - 300 kg žindre je pridelane za vsako tono surovega železa. ENV 197-1:1992 loči dva razreda Portland cementa z dodatkom žindre, ki se razlikujeta v odstotku žindre v skupni masi cementnega materiala:

- Razred II A-S s 6-20% žindre
- Razred II B-S s 21-35% žindre

Oba lahko vsebujeta največ do 5% polnila. Cementi, ki vsebujejo granulirano plavžno žindro, so pogosto ugodni iz stališča odpornosti na kemične vplive, saj so bolj odporni na agresivno delovanje sulfatnih soli. *Superfosfatni cement* je narejen iz medsebojnega mešanja 80-85 % granulirane plavžne žindre in 10-15 % kalcijevega sulfata (v obliki žganega apna) ter do 5 % Portland cementnega klinkerja. Ta cement je odporen na morsko vodo in se lahko uporablja tudi pri zelo visoki koncentraciji sulfatov v zemlji ali talni vodi [A. M. Neville, 1999].

#### **4.1.2 Kemijski dodatki**

V mešanice za beton so dodajali čedalje več različnih dodatkov. Kemični dodatki so bili v začetku v količinah do 5% mase cementa vmešani z namenom, da bi izboljšali nekatere lastnosti betona, da bi zmanjšali stroške proizvodnje betona, da bi zagotovili kvaliteto betona med mešanjem, prevozom, vgradnjo in nego ali da bi premagali določene nevarnosti med betoniranjem. Ti dodatki so lahko organski ali anorganski. Glede na namembnost med njimi ločimo: plastifikatorje, superplastifikatorje, aerante, fluidifikatorje, zaviralce in pospeševalce vezanja.



Njihov učinek je odvisen od mnogih faktorjev kot so: vrste in količine cementa, količine vode, časa mešanja, poseda in temperature betona ter zraka. Ker je njihov učinek odvisen od temperature, se moramo seznaniti z njihovim obnašanjem pri ekstremnih temperaturah. Včasih lahko enak učinek kot s temi dodatki dosežemo s spreminjanjem sestave betonske mešanice, npr. z zmanjševanjem vodo-vezivnega razmerja, dodatkom večjih količin cementa, uporabo drugačnega cementa, z zamenjavo agregata ali spremembo granulometrijske sestave agregata.

**Zaviralce** uporabljamo predvsem za zaviranje hitrega strjevanja betona in ohranjanje njegove obdelovalnosti. Njihov učinek je nasproten od učinka vroče vode ali visoke temperature. Včasih jih uporabimo za pospešitev gradnje, vendar počasnejši razvoj trdnosti. Hidratacijo zavirajo sladkor, derivati ogljikovih hidratov, metanol, topne cinkove in druge soli. Povečujejo krčenje zaradi sušenja, saj pridobivanje trdnosti traja dlje. Na kemično krčenje ne vplivajo. Mnogi zaviralci delujejo tudi kot fluidifikatorji in so lahko vzrok za večjo količino zraka v betonu.

**Pospeševalci** povišujejo stopnjo dosežene zgodnje trdnosti in zmanjšujejo čas, potreben za nego in zaščito. Posebej uporabni so za modifikacijo lastnosti betona v hladnem vremenu. Najpogosteje uporabljani pospeševalci so kalcijevi kloridi, ki so učinkoviti pri pospeševanju hidratacije kalcijevih silikatov, predvsem alita. Čeprav mehanizem njihovega delovanja ni popolnoma jasn, ni dvoma o njihovi učinkovitosti in cenovni ugodnosti. V bližini armature ali drugega jekla v betonu lahko povzročijo obstoj kloridnih ionov, zaradi česar lahko pride do korozije. Dodatna nezaželena značilnost  $\text{CaCl}_2$  je povečevanje kemičnega krčenja za 10-15%, včasih je možno tudi povečanje lezenja [A. M. Neville, 1999]. Dobra stran  $\text{CaCl}_2$  je izboljšanje odpornosti betona na erozijo in abrazijo skozi celotno življenjsko dobo konstrukcije.  $\text{CaCl}_2$  torej zvišuje trdnost betona in omogoča hitrejšo rast temperature med negovanjem betona v pari. Delovanje  $\text{NaCl}$  je podobno, vendar manj močno in bolj spremenljivo. Njegov vpliv na trdnost betona je slab. Barijev klorid deluje kot pospeševalec samo v toplih pogojih.

**Fluidifikatorji** običajno zmanjšajo količino vode v mešanici za 5-10% in kljub temu ohranijo enak posed betona. To posledično pomeni, da lahko zvišamo trdnost betona brez dodatnega

cementa. Včasih je stranski učinek fluidifikatorja zaviranje hidratacije. Mešanice, ki vsebujejo fluidifikatorje, izkazujejo manjšo segregacijo in dobro obdelovalnost. Sodoben napredek v tehnologiji dodatkov je vodil v razvoj bolj učinkovitih fluidifikatorjev, ki zmanjšajo količino potrebne vode za vsaj 8%.

Ugotovili so, da kot dobri razpršilni agenti delujejo molekule lignosulfatov, katere dobimo iz papirne kaše in odpadkov papirnice. Z odstranitvijo sladkorjev jih je možno očistiti, vendar je končni produkt za betonsko industrijo včasih predrag. Z uporabo tega dodatka je možno narediti betone s tlačno trdnostjo le do 60 MPa. [P.-C. Aitcin, 1998].

**Plastifikatorji, superplastifikatorji in hiperplastifikatorji** so sestavljeni iz organskih molekul znane po lastnostih razprševanja. Lahko so uporabljene tudi za nevtralizacijo električnih nabojev na površini cementnih delcev. S tem se zmanjša nagnjenost le teh k sprijemanju oziroma kopičenju. Zmanjšajo količino vode za 12-30% in omogočijo večjo obdelovalnost oz. posed betona z nizkim vodo-vezivnim razmerjem. So nasledniki fluidifikatorjev. Njihov učinek traja le 30-60 minut, odvisno od vrste in količine. Sledi hiter padec obdelovalnosti, zato jih običajno dodajamo betonu na samem mestu gradnje. [Portland Cement Association, 2006; A. M. Neville, 1999]

Po 40-ih letih uporabe prvih plastifikatorjev (sulfoniranih naftalenskih kondenzatov) in lignosulfatov v betonski industriji povsod po svetu so v Nemčiji in na Japonskem odkrili snovi, ki so danes znane kot superplastifikatorji [P.-C. Aitcin, 1998]. Te molekule so se vedno uporabljale za doseganje dovolj velike plastičnosti betona pred njegovo vgradnjo, medtem ko so bili lignosulfati dodani v betonsko mešanico že v betonarni. Superplastifikatorji nove generacije so sestavljeni iz dolgih razvejanih polimernih molekul z različno dolgimi stranskimi verigami, ki določen čas ne dovolijo stika med produkti hidratacije. S tem se podaljša čas obdelovalnosti svežega betona. Še dodatna prednost pred prejšnjimi plastifikatorji je, da nove lahko uporabimo v večjih količinah. So namreč umetni izdelki, izdelani iz surovih materialov in torej ne vsebujejo sladkorjev ali drugih nečistoč. Tehnologija njihove izdelave je tako napredovala, da lahko s superplastifikatorji obdržimo dovolj veliko plastičnost betona celo 45-90 minut. Vendar obstajajo še vedno nekateri Portland cementi, ki

ne sodelujejo dobro s superplastifikatorji in nekaj nizko-kvalitetnih superplastifikatorjev, ki ne sodeluje dobro z vsemi cementi.

Obstajajo štiri glavne družine superplastifikatorjev [*P.-C. Aïtcin, 1998*]:

1. sulfonirani melamin-formaldehid kondenzati oziroma melaminski superplastifikatorji
2. sulfonirani naftalen-formaldehid kondenzati oziroma naftalenski superplastifikatorji
3. modificirani lignosulfonati z zelo malo sladkorja
4. poliakrili

Pri izdelavi superplastifikatorjev sta najpogostejša prva dva tipa spojin. Superplastifikatorje lahko uporabimo skupaj s plastifikatorji, z zavlačevalci ali celo s pospeševalci vezanja.

Naftalenski superplastifikatorji v začetku niso bili cenovno konkurenčni z lignosulfati in prvimi plastifikatorji. Prodajajo jih kot rjavo tekočino s 40-42% količino trdnih delcev ali v obliki rjavega praška, oboje kot natrijeve ali kalcijeve soli. Če uporabimo alkalno reaktiven agregat, moramo dodati tudi kalcijevo sol za zaščito jekla pred korozijo. Naftalenski superplastifikatorji so iz organskih polimernih molekul, ki imajo en konec kemijske verige izjemno hidrofoben (usmeri se proti cementu), drugi hidrofilen (usmeri se proti molekuli vode). Cementni delci se na principu elektrostatičnega naboja tako med sabo odbijajo, s čimer je preprečeno njihovo kopičenje. So pogosto uporabljani superplastifikatorji zaradi določenih prednosti pred melaminskimi, ki jih navajajo izdelovalci betona:

- imajo večjo vsebnost trdne snovi, zato za isti denar nudijo večjo učinkovitost pri ohranjanju obdelovalnosti
- pri njihovi uporabi je lažje nadzirati reologijo betona visoke trdnosti, saj le kratek čas zavirajo strjevanje
- so cenejši, zaradi večje ponudbe na tržišču
- so zelo kvalitetni in zanesljivi

Mnogi proizvajalci betona so zaradi dobrih lastnosti naftalenskih superplastifikatorjev z njihovo uporabo začeli in jih še naprej uporabljajo, ker so dosegli dobre rezultate.

Najprej so uporabljali melaminske superplastifikatorje, ki imajo nekaj prednosti pred naftalenskimi:

- ne zavirajo strjevanja betona

- vsako prekoračenje količine je manj pomembno kot pri naftalenskih superplastifikatorjih zaradi manjše vsebnosti trdnih snovi
- ne povzročajo večjih količin zraka v betonu
- z njimi je lažje dobiti stabilni in ustrezni sistem por
- njihova kvaliteta in obnašanje sta zelo konstantna
- vidnega betona, narejenega z belim cementom, ne obarvajo sivo

V praksi je zelo pomemben izbor pravega superplastifikatorja, saj mora biti na koncu izbrana najboljša kombinacija cement-superplastifikator. Skoraj vedno je lažje zamenjati vrsto superplastifikatorja kot vrsto cementa.

Uporabiti moramo različne količine superplastifikatorja glede na predhodno vodo-vezivno razmerje in vrsto uporabljane cementa. Količino superplastifikatorja izrazimo kot delež njegove trdne snovi glede na maso cementa v mešanici. Količina superplastifikatorja, ki je optimalna, se imenuje količina zasičenosti. To je količina, katere povečevanje ne bi imelo več vpliva na reologijo betona. Če vsebuje cement manj alita in aluminatne faze, je količina zasičenosti nižja. Nanjo vpliva tudi metoda mešanja. Ker je to pri betonu visoke trdnosti močno, količina zasičenosti kljub nižjemu vodo-vezivnemu razmerju odgovarja količini, ki velja za beton, ki ima višje vodo-vezivno razmerje. Zato poskusne serije izvedemo z začetno količino superplastifikatorja, ki predstavlja 80% količine ob zasičenosti ter ga dodajamo, če je potrebno.

Bolje je, da superplastifikator v beton dodajamo v tekoči obliki, saj tako lahko hitreje popolnoma izkoristimo njegov potencial. Superplastifikator v obliki praška potrebuje čas, da se raztopi v vodi, zato med mešanjem ni tako zelo aktiven.

#### **4.1.3 Mineralni dodatki**

Šele za kemijskimi dodatki so začeli uporabljati mineralne dodatke iz narave. Glavni razlog za začetek njihove uporabe je bil ekonomski, saj so bili ti dodatki cenejši kot Portland cement. Mineralni dodatki so odpadni materiali oziroma stranski produkti industrije ali naravnih sedimenti, kateri zahtevajo malo predelave. Mednje prištevamo drobno mlete pucolane,

granulirano žlindro visokih peči, elektrofiltrski pepel in mikrosiliko. Vzpodbuda za uporabo nekaterih dodatnih materialov je bilo na eni strani dejstvo, da se je moralo za proizvodnjo Portland cementa odpirati čedalje več kamnolomov in rudnikov, kar je bilo zaskrbljivo za okolje. Na drugi strani industrijski odpadni material, kot so žindra iz visokih peči, elektrofiltrski pepel ali mikrosilika, ni bilo možno uporabiti nikjer drugje. Poleg tega je sama proizvodnja Portland cementa ekološko škodljiva, saj se pri tem spušča v atmosfero veliko ogljikovega dioksida. Ti dodatki služijo seveda tudi za izboljšanje lastnosti otrdelega betona in ne samo kot zamenjava cementnih materialov.

**Pucolan** je silicijev ali silicijev in aluminijev hidravlični material. Kremen v njem v prisotnosti vlage in pri običajnih temperaturah kemično reagira s kalcijevim hidroksidom, ki nastane pri hidrataciji Portland cementa. S tem se tvori stabilni kalcijev silikat, ki prispeva k trdnosti betona. Pucolanski dodatek se vedno uporablja v povezavi s Portland cementom, s katerim sta včasih že predhodno zamešana, včasih pa ju kombiniramo v betonskem mešalcu. V splošnem je lahko pucolanski material v izvorni obliki naravni ali umetni. Najbolj znana umetna pucolana sta elektrofiltrski pepel in mikrosilika. Naravni pucolanski materiali so: vulkanski pepel, skrilavci in kremenjaki ter žgana glina. Med naravne pucolane lahko uvrstimo tudi riževe lupine. Metakaolin je tudi kremenčev material, ki ga dobijo z upepelitvijo čiste ali prečiščene kaolinske gline.

Uporaba elektrofiltrskega pepela in žindre je cenejša in zahteva manj superplastifikatorja. Oba omogočata večji nadzor nad reološkim obnašanjem betona. Na drugi strani je mikrosilika veliko dražja, vendar je z njo lažje dosežati višje končne trdnosti in nadzirati reološko obnašanje sveže cementne mešanice. Beton s tlačno trdnostjo 90 MPa lahko naredimo brez mikrosilike, za beton s končno tlačno trdnostjo 100 MPa pa moramo v betonski mešanici uporabiti okrog 10 % tega dragega dodatka. Dolgo so mikrosiliko uporabljali samo zaradi reoloških razlogov, vendar se bo njena poraba verjetno še naprej povečevala. Kljub svoji veliki ceni lahko uporaba mikrosilike beton poceni, saj z njo zmanjšamo količino superplastifikatorja, ki je potreben za doseganje zadovoljive obdelovalnosti. Na ta način lahko prihranimo 5-6 litrov superplastifikatorja na 1 m<sup>3</sup> betona. [P.-C. Aïtcin, 1998]

*Elektrofiltrski pepel* je pepel, kondenziran elektrostatično ali mehanično iz izpušnih plinov premogovnih elektrarn. Zrna tega pepela so okrogla in zato potrebujejo manj vode. Ker so drobni, hitreje in bolje reagirajo s kalcijevim hidroksidom, ki nastane pri hidrataciji. Elektrofiltrski pepeli, ki so bogati s kalcijem, lahko pričnejo proces hidratacije samo z dodatkom vode. Nekateri manj bogati s kalcijem, potrebujejo cement za proizvodnjo zadostne količine kalcijevega hidroksida, ki pospeši razvoj trdnosti. Takšen razvoj trdnosti je ponavadi dolgotrajnejši, zato je zgodnja trdnost nižja. Elektrofiltrski pepel razreda F se pridobiva iz bituminoznega premoga in ima veliko kremena ter je pucolansko bolj aktiven. Elektrofiltrski pepel razreda C je pepel z veliko vsebnostjo apnenca, ki izvira iz lesnega premoga. Ta pepel ima nekaj cementnih lastnosti sam.

*Mikrosilika* je bila izvirno predstavljena kot umetni pucolan s posebnimi lastnostmi. Ima ekstremno majhno specifično površino in veliko sposobnost reagiranja s kalcijevim hidroksidom. Pri tem se tvori zelo trden in nepropusten beton. Ta mineralni dodatek je stranski produkt industrije pridelovanja silicijevih in fero-silicijevih zlitin iz zelo čistega kremena in premoga v obločnih električnih pečeh. Pobegli hlapi silicijevega dioksida oksidirajo in se kondenzirajo v obliki zelo drobnih okroglih delcev amorfne silike - odtod ime mikrosilika. V peči zgori večino ogljika, tako da je mikrosilika v bistvu brez ogljika in je zato svetle barve. Običajno imajo zmesi ferosilicija vsebnost silicija 50%, 75% in 90%. [A. M. Neville, 1999]

Trenutno jo imamo na voljo v različnih oblikah. Če jo kupimo kot neobdelano, je njena prostorninska teža zelo nizka (niha med  $200 \text{ kg/m}^3$  in  $250 \text{ kg/m}^3$ ). Rokovanje s tem lahkim prahom je težko, zato je na voljo gostejša oblika mikrodelcev. Aglomerat posameznih delcev, ki je izdelan z aeriranjem (zračanjem), ima prostorninsko težo  $500 \text{ kg/m}^3$ – $700 \text{ kg/m}^3$ . Dobimo jo tudi v obliki malte, katere gostota je  $1300 \text{ kg/m}^3$  –  $1400 \text{ kg/m}^3$ . Ponavadi jo dodajamo v mešanico v mešalec. V nekaterih državah proizvajajo tudi cementno mešanico s 6,5%-8% tega mineralnega dodatka [A.M. Neville, 1999]. Poznamo več vrst mikrosilike, saj jih pridobivajo pri izdelavi različnih zlitin. Tudi delujejo različno. Ko se odločimo, katero mikrosiliko in v kakšni obliki jo bomo uporabili, moramo še določiti njeno količino. Za apnenec – kalcijev karbonat, nastal pri hidrataciji belita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) in alita ( $\text{C}_2\text{S}$ ), bi morala biti teoretična količina tega dodatka 25-30 %. V praksi pa ne uporabljajo večjih doziranja kot 3-10

%, saj se trdnost betona občutno povečuje, ko povečujemo vsebnost mikrosilike do 10%, pri višjih količinah je razlika zelo majhna [P.-C. Aïtcin, 1998]. Poleg tega bi morali v tem primeru dodajati več superplastifikatorja. V literaturi nisem našla natančnih navodil za določanje optimalne količine mikrosilike.

Uporaba mikrosilike zmanjša potrebno količino superplastifikatorja in posledično tveganje zakasnitve strjevanja, saj povečuje zgodnjo tlačno trdnost. Poleg tega mikrosilika zmanjša hitro prepuščanje kloridnih ionov in omogoča lažjo vgradnjo. Vse to je potrebno upoštevati pri ekonomskem vrednotenju.

*Granulirana žindra* za razliko od elektrofiltrskega pepela in mikrosilike ne zahteva kalcijevega hidroksida za začetek hidratacije. Za zagotovitev obdelovalnosti je potrebnih manj kemičnih primesi kot pri prej omenjenih dveh dodatkih. Z žindro lahko nadomeščamo cement celo v deležih od 25% do 70%. Večja količina žindre vodi v počasen razvoj trdnosti. Zmanjša nastalo toploto pri hidrataciji, saj omogoča zmanjšanje količine cementa. Poleg tega zagotavlja izboljšano sulfatno odpornost, zmanjšuje propustnost in poveča odpornost na zmrzovanje.

*Polnila* so zelo drobno zmleti materiali, ki imajo zaradi svojih fizikalnih lastnosti ugoden vpliv na nekatere lastnosti betona kot so obdelovalnost, gostota, propustnost, kapilarnost, izcejanje in razpokanost. Lahko imajo hidravlične lastnosti, sodelujejo v reakciji s produkti hidratacije cementne paste ali pospešijo hidratacijo cementa, tako da delujejo kot jedra skupkov. Evropski standard omejuje uporabo polnil na 5% količine cementnega materiala, vendar dovoljuje uporabo apnenca v količini do 35% v mešanici, če predstavlja ostali cementni material samo Portland cement. V takem cementu (Portland apnenčev cement - razred II/B-L), je apnenec v bistvu polnilo.

#### **4.1.4 Aerant**

Je dodatek betonu, ki izboljša njegovo zmrzlinško odpornost. Običajna količina zračnih mehurčkov za zagotovitev kontrole krčenja, je 3%-4%. Mešanici s 3% zračnih mehurčkov se

bo zmanjšala tlačna trdnost za 5% [*P.-C. Aitcin, 1998*], zato je potrebno razmisliti, če nam v določenem primeru vključevanje zračnih mehurčkov res koristi.

#### 4.1.5 Agregat

Tudi izbor agregata mora biti opravljen previdno, saj z naraščanjem končne trdnosti ta lahko postane šibek člen za porušitev. Ponavadi ima pesek, uporabljen za izdelavo betona visoke trdnosti, zrnastostno sestavo znotraj priporočenih meja za beton običajne trdnosti. Pri načrtovanju mešanice za beton visoke trdnosti je nujno upoštevati, da je za zmanjšanje količine vode potrebno povečati razmerje grobega proti drobnemu agregatu. Na drugi strani se moramo zavedati, da je predpisan maksimalni premer zrna pri betonih visoke trdnosti 16 mm, saj bolj droben agregat omogoča bolj homogeno in kompaktno strukturo betona z manjšo vsebnostjo por. Zaradi velike vsebnosti ostalih drobnih delcev ni nujna uporaba drobnega peska za boljše obdelovalnost in manjšo segregacijo. Do segregacije vodi prisotnost velike količine grobih delcev, ki zadržujejo vodo v območju okoli sebe in s tem ustvarjajo lokalno visoko vodo-vezivno razmerje. Upoštevati je potrebno tudi, da so manjši delci peska trdnejši, saj je manjša vrjetnost nepravilnosti v njihovi strukturi.

Agregat je cenejši kot cement in ga je zato ekonomično uporabiti v betonski mešanici čim več. Vendar pa ekonomičnost ni edini razlog za uporabo agregata. Betonu daje veliko tehnično prednost, ker je volumsko stabilnejši in trajnejši kot hidratizirana cementna pasta.

Hitrost pridobivanja trdnosti je večja, če v betonu uporabimo metamorfni agregat kot pri uporabi sedimentnega agregata. Metamorfni agregat ima namreč manjšo toplotno prevodnost in večjo toplotno kapaciteto v primerjavi s sedimentnim. Toplotna kapaciteta je produkt gostote agregata in njegove specifične toplote. Če je večja torej pomeni, da toplotni tok počasneje spremeni temperaturo v agregatu. Manjša toplotna prevodnost pomeni, da toplotni tok počasneje prodira iz cementne paste v notranjost agregatnih zrn in s tem več toplote ostane v cementnem kamnu, zaradi česar je proces hidratacije pospešen. [*D.Saje, 2001*]

Pomemben faktor, ki vpliva na trdnost betona, je vez med agregatom in cementno pasto. Grobi agregat, njegova vrsta in količina, igra bistveno vlogo v razvoju modula elastičnosti in



tlačne trdnosti ter kontroli lezenja in krčenja betona visoke trdnosti. Trši, gostejši agregat bo razvil večji modul elastičnosti v zgodnji fazi kot manj gost agregat. Če je cena tršega agregata previsoka, je potrebno razmisliti o kombiniranju z mehkejšim agregatom. Obdelovalnost se v tem primeru lahko uravnava z dodatki. Oblika grobega agregata je pomembna tudi iz vidika reologije svežega betona. Med drobljenjem naj bi proizvedli delce, ki so čim bolj zaobljeni, okrogli in naj ne bi bili dolgi in ploski. Slednji so šibkejši in v mešanici zahtevajo dodatno vodo ali več superplastifikatorja za doseganje želene obdelovalnosti. Posebne metode drobljenja povečujejo stroške izdelave zaobljenih delcev. To se lahko uravna z večjo količino grobega agregata v mešanici in s prihranki pri cementu in superplastifikatorju. Iz vidika oblike in trdnosti je najboljši fluvioglacialni gramoz, ki je narejen iz najmočnejših in najtrših delov skal, okrušenih z ledenikom in očiščenih s tekočo vodo od topečega se ledenika. Vendar taki fluvoglacialni gramozi niso pogosti. Rečni gramoz je manj dober, ker je sestavljen iz manj trdnih in močnih delcev. [*P.-C. Aitcin, 1998*]

#### **4.1.6 Voda**

Ključnega pomena za proizvodnjo trajnega betona je bila vedno količina zamesne vode, ki se je uporabila za izdelavo betonske mešanice. Nizko vodo-vezivno razmerje tvori gosto betonsko matrico z majhno propustnostjo in večjo odpornostjo na razpoke zaradi krčenja. Količina zamesne vode je določena glede na vodo-vezivno razmerje in velikosti grobega agregata ter količino zračnih por v drobnem materialu.

Poleg kvantitete vode igra pomembno vlogo tudi njena kvaliteta. Nečistosti v vodi lahko ovirajo vgradnjo in oblikovanje betona, negativno vplivajo na trdnost betona, povzročijo madeže na njegovi površini ali celo vodijo do korozije armature. Zamesna voda ne sme vsebovati neželenih organskih snovi ali anorganske sestavine v prekomernih količinah. Vendar ni standardov, ki bi nedvoumno, jasno predpisovali kvaliteto zamesne vode. V mnogih specifikacijah projektov je primerna kvaliteta vode priporočena s stavkom, ki pravi naj bo voda primerna za pitje, saj taka voda ponavadi ne vsebuje velikih količin anorganskih snovi. V puščavskih področjih pa je lokalna pitna voda slana in lahko vsebuje prekomerne količine kloridov. Taka voda je nagnjena k povzročanju nenehne vlažnosti in površinskega razcveta ter korozije armature. Naravne vode, ki so rahlo kisle, so neškodljive. Prisotnost alg

v zamesni vodi ustvarja večjo poroznost betona, kar posledično pomeni izgubo trdnosti. Zavedati se moramo tudi, da voda dodana v mešalec, ni edini vir zmesne vode. Agregat je ponavadi površinsko vlažen in ta voda lahko predstavlja bistven delež celotno zamešane vode, zato je pomembno, da je tudi ta voda brez škodljivih snovi.

## **4.2 Sestava mešanice za izdelavo betona visoke trdnosti**

Splošni sistem pristopa k določanju deležev snovi v mešanici betona visoke trdnosti se še ni razvil. Razlog je verjetno v tem, da je bilo do sedaj narejenih iz tega betona relativno malo konstrukcij, od katerih je vsaka vključevala specifične in posebej izbrane materiale. Z oblikovanjem mešanice betona visoke trdnosti skušamo izpolniti zahtevo po višji tlačni trdnosti, veliki trajnosti, posebne zahteve glede krčenja, lezenja ali modula elastičnosti ali kakšne drugačne zahteve. Včasih je določena trdnost zahtevana mnogo kasneje kot pri 28-ih dneh. Za velik modul elastičnosti betona je potrebna uporaba agregata z visokim modulom elastičnosti in hkrati izbira takega cementnega materiala, ki zagotavlja dobro povezavo med grobimi agregatnimi delci in cementnim kamnom. Lastnost hitrega strjevanja mešanice se lahko nadzoruje z dodatki, če je to potrebno. Glede na zunanje pogoje, katerim bo konstrukcija izpostavljena, moramo uporabiti beton z določeno stopnjo odpornosti na napad sulfatov, odpornosti na abrazijo, odpornosti na alkali-silicijevo reakcijo ali odpornosti na poškodbe zaradi zmrzovanja.

Sestava mešanice je tako umetnost kot znanost, ki vključuje določanje primernih količin različnih sestavin za proizvodnjo mešanice, ki v polnosti izpolnjuje zahteve določene načrtovane konstrukcije in je hkrati ekonomična. V prihodnosti bi morala imeti pomembno vlogo medsebojna skladnost cementa in superplastifikatorja ter vpliv različnih cementnih materialov na lastnosti izdelanega betona. Za sestavo mešanice betona visoke trdnosti je pomembno oboje; lastnosti posameznih materialov in medsebojno učinkovanje med njimi.

Nekaj splošnih napotkov, ki se jih je dobro držati:

1. Obdelovalnost svežega betona lahko nadzorujemo s primerno količino superplastifikatorja (torej količino vode izberemo na osnovi vodo-vezivnega razmerja, zahtevanega za določeno trdnost),
2. Moramo se izogibati prekomerni količini veziva v betonu ( $500-550 \text{ kg/m}^3$ ), da lahko nadzorujemo krčenje,
3. Izbirajmo srednje droben cement, ker lahko preveč droben cement med hidratacijo razvije preveč toplote,
4. Portland cement in superplastifikator morata biti popolnoma združljiva,
5. Če uporabimo aerant, moramo izvesti poskusne serije izdelave betona s primerno trdnostjo,
6. Maksimalno zrno agregata mora biti omejeno zaradi boljše gostote betona, s čimer lahko zmanjšamo količino vode in še vedno ohranimo zadovoljivo vgradljivost.

#### **4.2.1 Sestava betonske mešanice**

Deleži sestavin betonske mešanice so se glede na deleže teh materialov v betonu običajne trdnosti malo spremenili zaradi posebnosti betona visoke trdnosti:

1. Vodo-cementna ali vodo-vezivna razmerja so se ekstremno pomaknila k nižjim vrednostim, zahvaljujoč uporabi superplastifikatorjev;
2. Moderni betoni pogosto vsebujejo enega ali več mineralnih dodatkov, ki zamenjujejo veliko količino cementa;
3. Sodobni betoni vsebujejo mikrosiliko, ki občutno spremeni lastnosti svežega in strjenega betona;

V prvem koraku se izbere predlagan potreben posed pri preizkusu s stožcem, ki je odvisen od vrste konstrukcije. Ta posed pri betonu visoke trdnosti ni odvisen samo od količine zamesne vode. Upoštevati moramo tudi količino uporabljenega superplastifikatorja. Maksimalna velikost agregatnega zrna je tudi zelo pomembna, saj ima večji grobi agregat nižjo specifično površino v primerjavi z manjšim grobim agregatom in zaradi tega potrebuje manjšo količino paste za dosego želene obdelovalnosti. Pri betonu visoke trdnosti dovoljena največja velikost zrna ni več odvisna samo od njegove oblike. Z agregatom, ki ima večja zrna sicer zmanjšamo količino potrebne zamesne vode, vendar je s tem zmanjšana tudi obdelovalnost. Manjša zrna

agregata so trdnejša in bolj primerna za izdelavo betonov visoke trdnosti. Količina zamesne vode se določa glede na maksimalno zrno agregata in potreben posed.

Pred razlago postopka sestave mešanice je potrebno pojasniti ustrezno terminologijo. Zasičeno vlažno, površinsko suho stanje grobega agregata (ZVPS) lahko definiramo kot tisto stanje, v katerem agregat vsebuje toliko vode kot bi jo tudi sicer absorbiral v betonski mešanici iz hidratizirane cementne paste. Celotna količina vode je definirana kot:

$$W_{skupna} = \frac{m_{mokrega\_agregata} - m_{suhega\_agregata}}{m_{suhega\_agregata}} \times 100 \quad (7)$$

Količino vode, ki jo agregat absorbira v zasičeno vlažnem, površinsko suhem stanju, lahko izrazimo:

$$W_{abs} = \frac{m_{ZVPS} - m_{suhega\_agregata}}{m_{suhega\_agregata}} \times 100 \quad (8)$$

Razlika med tema dvema količinama vode predstavlja količino vlage v agregatu, katera sodeluje pri hidrataciji, zato je pomembno, da jo poznamo:

$$W_p = W_{skupna} - W_{abs} \quad (9)$$

Veživo predstavlja cement z mineralnimi dodatki. Mineralni dodatek je lahko dodan v beton v betonarni ali je bil že predhodno zamešan v cement. V slednjem primeru je izraz količina povezan z maso Portland cementa, uporabljenega za beton, zato je delež mineralnega dodatka izražen kot delež celotnega veziva (Portland cement + mineralni dodatki). Kadar mineralni dodatek dodamo v sami betonarni v betonsko mešanico, izrazimo njegov delež samo kot delež samega Portland cementa. [P.-C. Aitcin, 1998]

Količino superplastifikatorja v betonarni ponavadi izrazijo v litrih komercialne raztopine na m<sup>3</sup> betona. Izražanje njegove količine v literaturi je z deležem mase cementa, ki jo predstavljajo njegovi trdni delci. Količino, izraženo v l/m<sup>3</sup> lahko pretvorimo v količino, izraženo s trdnim deležem, vendar moramo zato poznati specifično težo tekočega superplastifikatorja in delež trdnih delcev v njem.

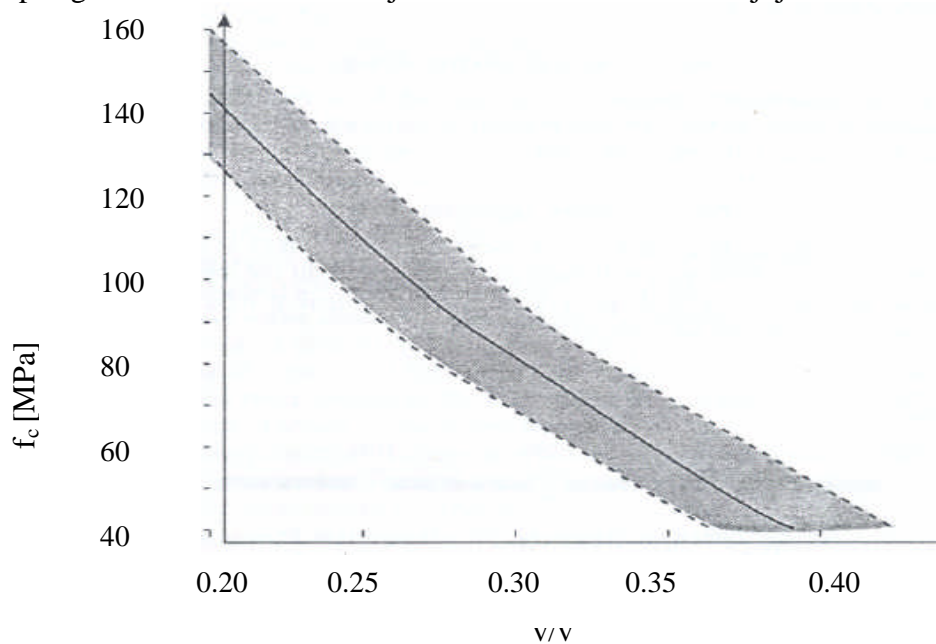
Voda, ki jo dodamo s tekočo raztopino superplastifikatorja, se upošteva kot del zamesne vode. Postopek se začne z izbiro petih različnih karakteristik mešanic ali deležev materialov v

nekem zaporedju. V prvem koraku izberemo vodo-vezivno razmerje, v drugem količino vode, kar nam oboje skupaj določi količino veziva - cement z dodatki. V tretjem koraku določimo delež superplastifikatorja, zatem količino grobega agregata in nazadnje prostornino zraka. Količina veziva, superplastifikatorja, grobega agregata in zraka nas privedejo še do potrebne količine drobnega agregata in z vsemi sestavinami skupaj tvorimo poskusne serije betona. Ti morajo imeti predpisano obdelovalnost in trdnost. Če ti dve lastnosti betona nista primerni, izvedemo še potrebno število iteracij dokler ne dobimo končne sestave, da dobimo beton s primernimi lastnostmi.

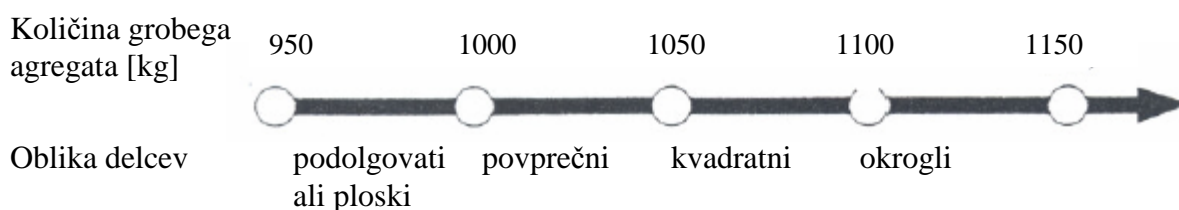
Predlagano vodo-vezivno razmerje lahko za različne želene vrednosti tlačne trdnosti betona pri starosti 28 dni razberemo iz diagrama na *Sliki 4*. Zaradi razlik v učinkovitosti različnih mineralnih dodatkov kaže diagram širše območje ustreznih vodo-vezivnih vrednosti za doseganje zelene trdnosti. Če učinkovitost določenega mineralnega dodatka ni znana iz predhodnih izkušenj, je lahko uporabljena povprečna vrednost v območju vodo-vezivnih razmerij. Ker je obdelovalnost mešanice odvisna od več faktorjev, in sicer količine začetne vode, reaktivnosti cementa, količine superplastifikatorja in njegove stopnje združljivosti z določenim cementom, je težko določiti količino zamesne vode, da bo npr. beton zagotavljal dovolj veliko obdelovalnost še eno uro po zamešanju. Dovolj veliko plastičnost lahko dosežemo z veliko količino vode in malo superplastifikatorja ali obratno, kar ustvari razliko pri reologiji betona. Izračunamo potrebno maso veziva glede na količino vode in potrebno vodo-vezivno razmerje. Določimo mase vseh vezivnih materialov. V začetku lahko dodamo toliko superplastifikatorja, da predstavlja 1% veziva. Iz *Slike 5* preberemo potrebno maso grobega agregata glede na podatke o obliki agregatnih delcev. Če oblika agregatnih delcev ni znana ali obstaja kakšen dvom, se za začetek uporabi  $1000 \text{ kg/m}^3$  grobega agregata. Iz izkušenj je bilo ugotovljeno, da je težko doseči manj kot 1% ujetega zraka, zato lahko predvidimo 1,5% začetne ocene količine ujetega zraka. Priporočeno je zagotoviti majhno količino zračnih por z namenom, saj se s tem izboljšamo obdelovalnost in vgradljivost betona. Maso drobnega agregata v mešanici lahko izračunamo z metodo absolutne prostornine.

Za načrtovanje mešanice betona lahko uporabimo poseben list, na katerem navedemo karakteristike vseh uporabljenih sestavin. Na ta del lista zapišemo specifično težo cementa in mineralnega dodatka, specifično težo agregata v zasičeno vlažnem, površinsko suhem stanju,

količino celotne in absorbirane vode v agregatu v odstotkih ter izračunamo količino proste vode v agregatu. Poleg tega moramo pred izvedbo izračunov zapisati še specifično težo tekočega superplastifikatorja, celotni delež trdne faze superplastifikatorja ter maso vseh cementnih materialov. Iz teh podatkov je potrebno izračunati še maso in prostornino trdnih delcev v superplastifikatorju ter prostornino vode v njem. Zatem zapišemo še vse te vrednosti v prvi stolpec glavne tabele. Načrtovanje sestave mešanice se nadaljuje.



Slika 4: Predlagano razmerje med vodo-vezivnim faktorjem in tlačno trdnostjo betona (Aïtcin, 1998, str. 235)



Slika 5: Določitev količine grobega agregata v mešanici za beton visoke trdnosti (Aïtcin, 1998, str. 236)

V drugi stolpec glavne tabele pišemo vrednosti naslednjih izračunov:

1. Glede na specifične teže, ki so zapisana na vrhu lista za načrtovanje mešanice, izračunamo prostornine vseh sestavin, katerih maso že poznamo,
2. Izvedemo račun prostornine grobega agregata,
3. Glede na delež zraka v mešanici dobimo njegovo prostornino v  $1 \text{ m}^3$ ,
4. Izračunamo prostornino trdnih delcev v superplastifikatorju:

$$s = \frac{M_t}{M_{raz}} \times 100 \quad (10)$$

$$G_{sup} = \frac{M_{raz}}{V_{raz}} \quad (11)$$

$$\frac{s \times M_{raz}}{100} = C \times \frac{d}{100} \Rightarrow \frac{s \times G_{sup} \times V_{raz}}{100} = C \times \frac{s}{100} \Rightarrow V_{raz} = \frac{C \times d}{s \times G_{sup}} \quad (12)$$

$$M_v = M_{raz} - M_t = M_t \cdot \left( \frac{100}{s} - 1 \right) = V_{raz} \times G_{sup} \cdot \frac{100 - s}{100} \quad (13)$$

$$V_t = V_{raz} - V_v = V_{raz} - V_{raz} \times G_{sup} \times \frac{100 - s}{100} = V_{raz} \cdot \left( 1 - G_{sup} \times \frac{100 - s}{100} \right) \quad (14)$$

5. Izračunamo prostornino drobnega agregata v  $l/m^3$ , z odštetjem prostornin vseh ostalih sestavin od  $1000 l/m^3$ .

V tretji stolpec glavne tabele zapišemo naslednje vrednosti:

6. maso drobnega agregata,
7. maso trdnega dela superplastifikatorja,
8. prepisemo maso grobega agregata, vode in mineralnih dodatkov,
9. seštejemo vse mase sestavnih delov v mešanici v ZVPS stanju.

Potem popravimo količino vode, upoštevajoč dejansko vsebnost vode v agregatu in vodo, ki je dodana v mešanico s tekočim superplastifikatorjem. Torej izračunamo maso agregata, upoštevajoč njegovo dejansko vlago (pomnožimo maso ZVPS grobega in drobnega agregata s  $1+w_p/100$ ). V četrti stolpec zapišemo:

10. maso vode, ki se nahaja v agregatu in hkrati sodeluje v hidrataciji,
11. količino vode, ki je prispevek tekočega superplastifikatorja.

Izračunamo vse popravke količine vode, ki jih prištejemo ali odštejemo od potrebne količine vode. V peti stolpec pišemo končno sestavo  $1m^3$  betona:

12. Prepisemo mase različnih mineralnih dodatkov iz prvega ali tretjega stolpca,
13. vnesemo odmerek superplastifikatorja  $V_{raz}$  iz zgornjega dela lista,
14. določimo količino dejansko potrebne mase posameznih sestavin.

Sestavo poskusne serije lahko izračunamo v 6.stolpcu, tako da vse vrednosti v 5.stolpcu tabele pomnožimo s faktorjem, ki predstavlja razmerje med težo potrebne mase poskusne serije in težo  $m^3$  betona. Na koncu izračunamo maso poskusne serije celotne mešanice. Na ta način kontroliramo tudi pravilnost računa. [P.-C. Aïtcin, 1998]

Preglednica 3: List za načrtovanje sestave mešanice betona visoke trdnosti

(P.-C. Aitcin, 1998, str. 245)

### LIST ZA NAČRTOVANJE MEŠANICE

Tlačna trdnost: 100 MPa

Tabela A	$G_C$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	Količina [%]
Cement	3,14	90
Mikrosilika	2,2	10

AGREGAT		$G_{ZVPS}$	$w_{abs}$	$W_{skupna}$	$W_p$
Grob		2,8	0,8	0	-0,8
Droben		2,65	1,2	3,5	2,3
SUPERPLATIFIKATOR		$M_{SOL}$ [kg]	$V_{raz}$ [l]	$V_v$ [l]	$V_t$ [l]
Specifična teža	Delež trdnih	5,0	10,7	8,0	3,0
	Delcev $s$ [%]				
1,21	40				

$\frac{v}{c} = 0,27$	1	2	3	4	5	6
Materiali	Količine [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen [l/m <sup>3</sup> ]	Količine v ZVPS pogojih [kg/m <sup>3</sup> ]	Voda [l/m <sup>3</sup> ]	Ses.m <sup>3</sup> betona[kg]	Poskusna serija [kg]
Voda	140	140	140		124	11,5
Cement	52	47	470		470	43,7
Mikrosilika	0	0	50		50	4,7
Elektrofil tr. pepel						
Grobi agregat	1075,0	384	1075,0	9,0	1066,0	99,0
Drobni agregat		285	755,0	-17,0	772,0	72,0
Zrak[%]	1,5	15,0	5,0			
Superpl.[%]	1	3,0		-8,0	10,7	1
Skupaj		715,0	2495,0	-16,0	231,0	

Uporaba kriterija za izbor materialov in predlagana metoda za načrtovanje mešanice služi kot pomoč pri iskanju najboljših ali najbolj sprejemljivih lokalnih materialov in njihovih deležev, da lahko naredimo najboljši beton visoke trdnosti v smislu reoloških in trdnostnih lastnosti ter ekonomičnosti. Uspešno načrtovanje mešanice betona visoke trdnosti predstavlja iskanje materialov, v katerih je najšibkejši člen zadosti močan, da zadovolji željene cilje glede obnašanja brez nepotrebnih stroškov. Predlagana metoda je osnovana na izkušnjah skozi leta



in naj bi bila uporabljena le kot vodilo. V splošnem bi morali izračunani deleži zagotavljati skoraj take karakteristike kot smo jih želeli. Če beton ne doseže zahtevane stopnje obnašanja, cement ni primeren ali agregat ni dovolj močan ali superplastifikator ni dovolj učinkovit ali kombinacija cement-superplastifikator ni popolnoma kompatibilna ali se je pojavil kakšen drug nepričakovan faktor. Kadar ni dosežena zelena tlačna trdnost in površinski prelom kaže na številne medzrnske prelome, lahko krivimo za slabo obnašanje prešibek agregat. Če površinski zlom kaže večjo nepovezanost med grobim agregatom in hidratizirano cementno pasto, ima uporabljen gramoz pregladko površino ali ima preveč nečistoč. Če poteka površinski zlom skoraj popolnoma čez hidratizirano cementno pasto, ki obdaja agregat, moramo izdelati močnejši beton z enakim agregatom in z nižjim vodo-vezivnim razmerjem. Če beton ne dosega zelenega poseda oziroma plastičnosti, količina dodanega superplastifikatorja ni dovolj velika. Moramo jo povečati ali povečati količino zamesne vode ter hkrati količino cementa z namenom, da ohranimo enako vodo-vezivno razmerje. Če beton hitro izgublja svojo plastičnost, je cement morda bolj reaktiven kot smo pričakovali in moramo povečati količino vode ali pa superplastifikator ni dovolj učinkovit v kombinaciji z izbranim cementom. Torej moramo povečati njegov delež ali pa uporabiti drugo vrsto superplastifikatorja. Razlogi za slabšo obdelovalnost mešanice so lahko napačna oblika agregatnih zrn, slaba granulometrijska sestava uporabljenega gramoza ali nezdržljivost cementa in superplastifikatorja.

Opisana metoda načrtovanja mešanice je namenjena za neaeriran beton visoke trdnosti. Lahko jo uporabimo tudi za aeriran beton, če upoštevamo zmanjšanje trdnosti zaradi sistema zaprtih zračnih por. Teh zagotovimo toliko, da je beton dovolj odporen na zmrzovanje in da hkrati dosega dovolj veliko tlačno trdnost.

#### **4.2.2 Izbira mešanic za ekonomski račun**

Z upoštevanjem vsega znanega o sestavinah betonske mešanice lahko poskušamo sestaviti betonske mešanice. Sestava so odvisne od vrste konstrukcije, za katero beton pripravljamo, in vplivov okolja, kateremu bo konstrukcija izpostavljena. Učinek in obnašanje betona z vsako tako sestavo je potrebno preveriti v dejanskem konstrukcijskem elementu.

Poskušala bom ugotoviti, kakšne bi bile cene različnih vrst betonov visoke trdnosti, ki se med sabo razlikujejo v razmerju in količini posameznih sestavin. V *Preglednici 4* je podanih 6 različnih mešanic:

Preglednica 4: Sestave mešanic betonov visoke trdnosti

Sestavina	Mešanica						
	A	B	C	D	E	F	Običajno t. beton
Portland cement [kg/m <sup>3</sup> ]	475	360	400	492	532,5	419,5	330
Mikrosilika [kg/m <sup>3</sup> ]	25 (5%)	40 (10%)		26 (5%)	23,1**+4,7 (4,15%)	25**+5,1 (5,6%)	----
Elektro. pepel [kg/m <sup>3</sup> ]	----	----	----	----	----	----	----
Drobni agregat [kg/m <sup>3</sup> ]	1051	1133	1054	757	709	886,5	650+ mivka
Grobi agregat [kg/m <sup>3</sup> ]	700	755	702	1046,85	1046,85	1046,85	1055,6
Skupno voda [l/m <sup>3</sup> ]	165	143	208	124,6	150,33	119,6	148,5
Količnik v/v	0,33	0,36	0,52	0,28	0,27	0,27	0,45
Vrsta superplastifikatorja	»1«	»1«	----	»2«	**	**	----
Količina superpl. [% od cem. mat.]	2,05	2,05	----	1,0	** 0,85	**1,15	----
Vključen zrak[%]	2,4	1,6	1,3	1,5	1,5	1,5	
Posed [mm]	100	150	113	220±20	220±20	220±20	
Trdnost betona $f_{ck}$ [MPa] pri starosti dni							
7	53,6	61,1	32,6				
28	68,7	73,4	40,3	82	92	92	25

\*\* uporabimo Antikorodin, praškasto mešanico superplastifikatorja in mikrosilike

»1«-sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzat

»2«-polikarboksilatni superplastifikator nove generacije: Cementol Zeta (TKK)

*dodatki: Mikroslika TKK, Antikorodin*

*superplastifikatorji: sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzat (Antikorodin),  
polikarboksilatni superplastifikator nove generacije (Cementol Zeta Super S)*

*Vrste uporabljenega cementa v mešanicah: CEM II/A-S 42,5 R (335 m<sup>2</sup>/kg).*

Mešanice A, B in C so bile dejansko izdelane v laboratoriju, ostale tri pa sem sestavila na predhodno prikazan teoretični način, brez poskusnih serij. Mešanica B vsebuje največjo količino mikrosilike, ki se je sedaj uporablja. V mešanici C sploh ni mineralnih dodatkov, njena končna trdnost je še dokaj nizka. Mešanico D sem sestavila tako, da sem predvidila končno tlačno trdnost betona 90 MPa. Mešanici E in F naj bi bili mešanici za beton končne 28-dnevne tlačne trdnosti 100 MPa. Med sabo se razlikujeta glede na količino cementa in superplastifikatorja, saj je vrjetno pri manjši uporabi cementa (in posledično vode) potrebno uporabiti več superplastifikatorja. Izračunala bom skupno ceno za materiale v zgornjih šestih mešanicah in jo primerjala s ceno betona običajne trdnosti.

Prihranek pri cementu ne pomeni nujno tudi prihranek pri stroških celotne izdelave betona visoke trdnosti, ker bi to lahko pomenilo večjo potrebno količino superplastifikatorja. Če uporabimo veliko superplastifikatorja, lahko to pomeni počasnejše pridobivanje trdnosti betona. To tudi pomeni izgubo dobička zaradi daljšega betoniranja. V literaturi najdemo veliko informacij o medsebojnih vplivih materialov in veliko poročil o uspešnih sestavah betona visoke trdnosti. Kljub temu je potrebno izvesti tudi poskusne serije z namenom, da oblikujemo ekonomično optimiziran beton visoke trdnosti, ki izpolnjuje vse določene zahteve.

## **5 ANALIZA SMOTRNOSTI IN EKONOMIČNOSTI UPORABE BETONOV VISOKE TRDNOSTI**

Smotrnost uporabe betonov visoke trdnosti je odvisna od tega, kaj želimo z njimi doseči, v kakšnem okolju se nahaja konstrukcija in kakšnim obremenitvam je izpostavljena. Zanima nas tudi, kakšen vpliv bo imel beton visoke trdnosti na trajnost konstrukcije in koliko je to pomembno za določeno vrsto uporabe. Seveda ni brez vpliva tudi njegova cena na enoto glede na ceno betona običajne trdnosti.

Konstrukcija je lahko izpostavljena različnim kombinacijam obremenitev, vendar sem v tej nalogi primerjala le osno-upogibno odpornost različnih prečnih prerezov. Osno-upogibna obremenitev nastopi namreč skoraj v vsakem gradbenem elementu. Z računalniškim programom sem ugotavljala, kakšne so osno-upogibne odpornosti škatlastega in krožnega prereza iz betona različnih tlačnih trdnosti in z različnimi količinami armature.

### **5.1 Izračun nosilnosti betonskih prerezov**

Programa za račun odpornosti krožnih prerezov in za račun odpornosti poljubnih poligonalnih prerezov omogočata račun in izris interakcijskih diagramov ter iskanje optimalnih rešitev po izbranem kriteriju med vsemi rešitvami, ki izpolnjujejo predpisane pogoje mejnih stanj nosilnosti. Programska oprema je razvita v okolju programa Microsoft Excel. Le ta s pomočjo osnovnih preglednic programa, programske kode, napisane v programskem jeziku Visual Basic za Excel, makro ukazi in programskega dodatka Solver (Reševalec) rešuje matematične probleme.

Oba programa za analizo prečnih prerezov omogočata uporabniku vnos podatkov željene količine in pozicije armature. Določimo lahko tudi obremenitev, stalno in spremenljivo, in podamo dodatne omejitve deformacij. V padajočem seznamu izberemo željeno vrsto betona in armature. Vse karakteristike materialov, ki so potrebne za izračun osno-upogibne odpornosti prereza, se same prenesejo iz preglednic glede na izbrani material, t.j.

karakteristična in projektna tlačna trdnost betona, specifična deformacija betona pri največji napetosti, mejna specifična deformacija betona, koeficient  $n$ , ki je odvisen od trdnostnega razreda betona in ga potrebujemo za izračun napetosti v betonu ter povprečni modul elastičnosti betona. Karakteristike armature, ki se tudi prenesejo iz preglednic so projektna natezna trdnost armature, modul elastičnosti jekla, mejna deformacija armature  $\varepsilon_{ud}$  ter količnik  $k$ , ki predstavlja razmerje med projektno napetostjo pri poružitvi jekla in največjo projektno mejo elastičnosti. S pomočjo teh podatkov programa izračunata odpornost prečnega prereza, tako da se izračunata prispevek betona in prispevek armature, nato pa se obe vrednosti seštejeta. Njun seštevek predstavlja celotno osno-upogibno odpornost prereza:

$$N_{Rd} = N_{Rd,c} + N_{Rd,s} \quad (15)$$

$$M_{Rd} = M_{Rd,c} + M_{Rd,s} \quad (16)$$

Odpornosti so odvisne od deformacij prereza.

### Interakcijski diagrami

Izris interakcijskih diagramov zahtevamo z ukaznim gumbom. Za izris interakcijskih diagramov vnesemo že omenjene podatke (pozicija in količina armature, trdnostni razred betona) v posebno preglednico. Ti podatki se v procesu zagona programa prenesejo v primerne celice na glavni strani programa.

### Iskanje optimalnih vrednosti

Optimalno rešitev iščemo s pomočjo Solverja, ki ga ravno tako poženemo z ukaznim gumbom. Pozicijo in količino armature ter trdnostni razred betona sami vpišemo na primerna mesta glavne strani programa. Preko ukaznih gumbov lahko zahtevamo iskanje maksimalnega ali minimalnega mejnega upogibnega momenta in pripadajočo osno odpornost prereza. V tem primeru Solverju podamo ustrezno ciljno celico, kateri iščemo maksimalno oziroma minimalno vrednost, ob kateri so izpolnjeni določeni pogoji (glej Slike 6-8):

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{cu2}, \quad (17)$$

$$\varepsilon_1 \leq 0, \quad (18)$$

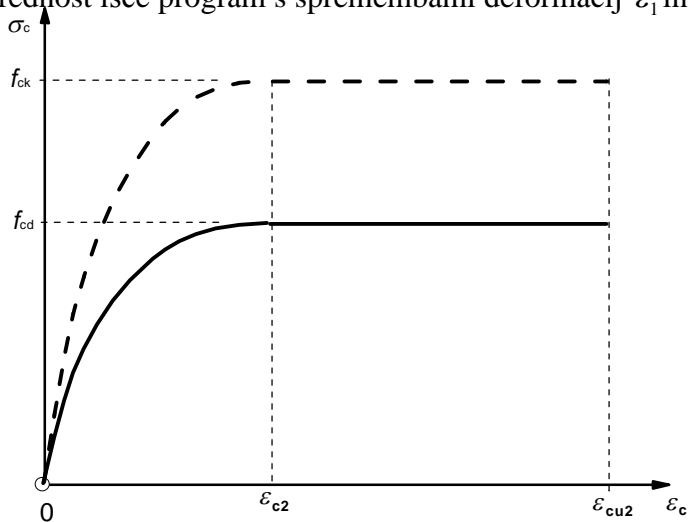
$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud}, \quad (19)$$

$$\varepsilon_s \geq 0, \quad (20)$$

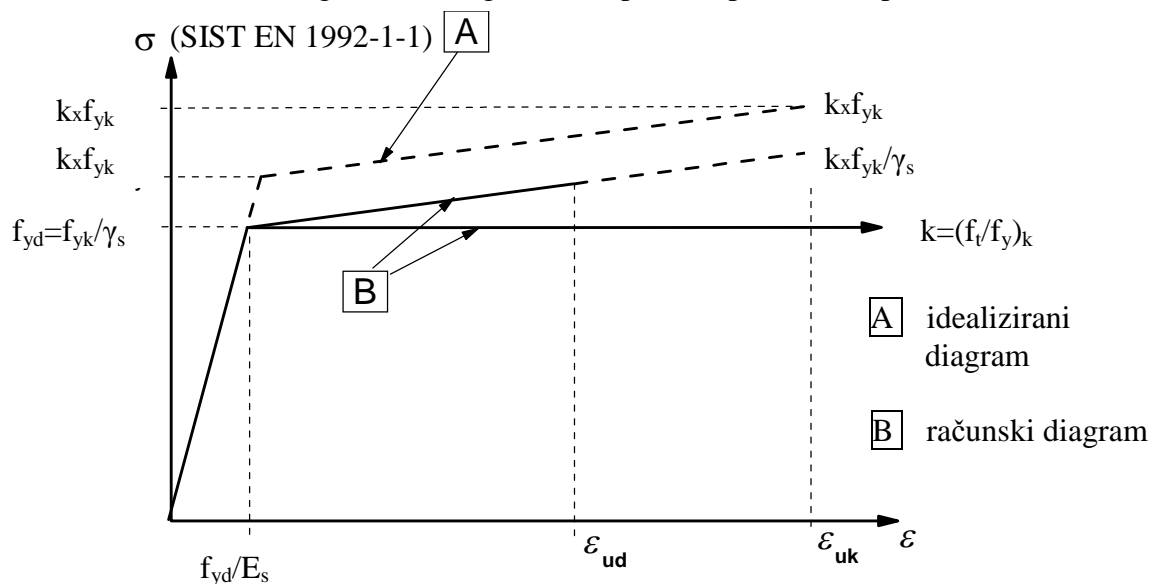
$$\varepsilon_c' \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c' = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} \right) - Z_{tc} \right), \quad (21)$$

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} - Z_{tc} \right). \quad (22)$$

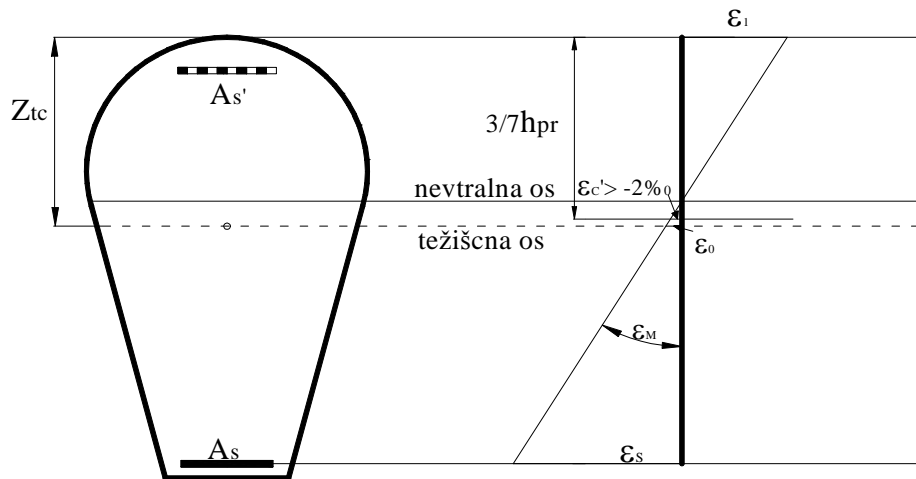
Optimalno vrednost išče program s spremembami deformacij  $\varepsilon_1$  in  $\varepsilon_s$ .



Slika 6: Delovni diagram tlačnega betona, podan s parabolo in premico



Slika 7: Idealizirana in računski sovisnost med napetostjo in deformacijo jekla za armiranje, za nateg in tlak (SIST EN 1992-1-1)



Slika 8: Potek deformacij v poljubnem prerezu

Maksimalni ali minimalni moment lahko programska oprema išče tudi ob dodatnem pogoju, da mora biti hkrati osna odpornost enaka podani osni obremenitvi. Pri tem morajo biti izpolnjeni vsi že napisani pogoji in dodatni pogoj, da je osna odpornost enaka osni obremenitvi:

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{cu2}, \quad (23)$$

$$\varepsilon_1 \leq 0, \quad (24)$$

$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud}, \quad (25)$$

$$\varepsilon_s \geq 0, \quad (26)$$

$$\varepsilon_c' \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c' = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} \right) - Z_{tc} \right), \quad (27)$$

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} - Z_{tc} \right), \quad (28)$$

$$N_{Rd} = N_{Ed}. \quad (29)$$

Lahko zahtevamo tudi iskanje maksimalne oziroma minimalne osne odpornosti prereza ter pripadajoče upogibne odpornosti ali pa maksimalno in minimalno osno odpornost ob določeni upogibni odpornosti. Za iskanje take optimalne rešitve so pogoji naslednji:

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{cu2}, \quad (30)$$

$$\varepsilon_1 \leq 0, \quad (31)$$

$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud}, \quad (32)$$

$$\varepsilon_s \geq 0, \quad (33)$$

$$\varepsilon_c' \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c' = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} \right) - Z_{tc} \right), \quad (34)$$

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} - Z_{tc} \right), \quad (35)$$

$$M_{Rd} = M_{Ed}. \quad (36)$$

Lahko pa podamo obremenitev in iščemo, pri kakšnih deformacijah, se vzpostavi ravnotežje.

V tem primeru morajo veljati vsi že podani pogoji:

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{cu2}, \quad (37)$$

$$\varepsilon_1 \leq 0, \quad (38)$$

$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud}, \quad (39)$$

$$\varepsilon_s \geq 0, \quad (40)$$

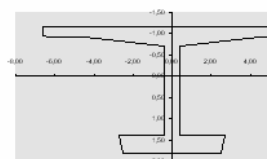
$$\varepsilon_c' \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c' = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} \right) - Z_{tc} \right), \quad (41)$$

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}, \quad \varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \cdot \left( h_{pr} \cdot \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} - Z_{tc} \right), \quad (42)$$

$$N_{Rd} = N_{Ed}, \quad (43)$$

$$M_{Rd} = M_{Ed}. \quad (44)$$

PODATKI:				Deformacije: * - če je negativno velja za $\varepsilon_s$ (bet.)				Mejno		Dodatna omejitvev				
Geometrija prereza:		Vse dimenzije v metrih!		Generiranje nove geometrije		$\varepsilon_{s,max} = \varepsilon_s =$	-0,542	prom.	eps0=	epsM=	-2,80			
Število podprezov:		5				$\varepsilon_{1-} - \varepsilon_{1+} =$	19,315	prom.	7,48	6,85	20,00	20,00		
j	bszj	bspj	hj	nj		$\varepsilon_{0'} =$	-0,542	prom.	-0,542		-2,80	20,00		
1	13,20	13,20	0,22	22		$\varepsilon_{0''} =$	20,000	prom.	20,000		-2,80			
2	13,20	12,64348	0,04	4		Eps 2 ->	-3,943567							
3	8,97348	0,84	0,19	19		Armatura								
4	0,84	0,84	2,10	210		a	oz	a'	z (m)	$\varepsilon$ (prom.)	$\sigma_s$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_s'$ (kN/cm <sup>2</sup> )	
5	5,4765	5,00	0,45	45		A <sub>s</sub> ->	0,125	-1,05	0,314	6,27	0,00	6,27		
6						A <sub>s</sub> ->	0,100	1,73	19,315	34,78	0,00	34,78		
7						Kabli								
8						a	oz	a'	$\varepsilon_{s,rel}$ (prom.)	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	z (m)	$\varepsilon$ (prom.)	$\sigma$ (kN/cm <sup>2</sup> )	
9						A <sub>s</sub> ->	0,000	0,000	0,00	-1,17	-0,542	-10,58	0,000 %	
10						A <sub>s</sub> ->	0,000	0,000	0,00	1,83	20,000	138,62	0,000 %	
						A <sub>s</sub> +A <sub>s</sub> '=		0,00					0,000 %	
Komentar: Paralelni stojini h=4,0 m polje Mmax				Geometrija:				A <sub>s</sub> '=		200,00	cm <sup>2</sup>	0,236 %	-μ <sub>s</sub> '	
Kvaliteta materialov:		Bet. f <sub>cd</sub> =		6,00	kN/cm <sup>2</sup>	h=	3,00	m	A <sub>s</sub> =	500,00	cm <sup>2</sup>	0,590 %	-μ <sub>s</sub>	
Beton: C30/105		f <sub>ctd</sub> =		90,00	MPa	d=	2,90	m	A <sub>s</sub> +A <sub>s</sub> '=		700,00	cm <sup>2</sup>	0,826 %	-Σμ <sub>s</sub>
γ <sub>f</sub> = 1,5		ε <sub>cu</sub> =		-2,80	prom.	A <sub>s</sub> =	8,47	m <sup>2</sup>	Beton: z (m)		$\varepsilon$ (prom.)	$\sigma$ (kN/cm <sup>2</sup> )		
α <sub>ct</sub> = 1		ε <sub>cu</sub> '=		-2,80	prom.	Z <sub>tc</sub> =	1,117	m	Zg. Rob:	-1,17	-0,542	-1,68	μ <sub>s</sub> '= 0,7	
Armatura: RA_400/500		E <sub>s</sub> =		4400,00	kN/cm <sup>2</sup>	I=	11,3103	m <sup>4</sup>	Sp. Rob:	1,83	20,000	0,00	k= 1	
γ <sub>f</sub> = 1,15		Arm. f <sub>td</sub> =		34,78	kN/cm <sup>2</sup>	EI=	497651918	kNm <sup>2</sup>	Armatura: RA_400/500		Beton: C30/105		μ <sub>s</sub> '= 6,04%	
Kabli: PA_1570/1770		E=		20000	kN/cm <sup>2</sup>	OBREMENITEV		Nsd (kN)	Msd(kNm)	e <sub>uF</sub> =	2,1638462	m	μ <sub>s</sub> '= 6,04%	
γ <sub>f</sub> = 1,15		k=		1,00		Rač. obremenitev:		9750	21000	e <sub>uF</sub> '=	4	m	μ <sub>s</sub> '= 6,04%	
		ε <sub>sd</sub> =		200	prom.	ODPORNOST		Ni <sub>rd</sub>	Mi <sub>rd</sub>	x=	0,079	m		
		Kab. f <sub>td</sub> =		138,52	kN/cm <sup>2</sup>	Beton:		-8895,73	10184,46	e <sub>c</sub> =	-1,145	m		
		E=		19500	kN/cm <sup>2</sup>	Armatura: As'		1254,42	-1312,97	z <sub>c</sub> =	2,873	m		
		k=		1,00		As		17391,30	30057,81	z=	2,889	m		
		ε <sub>sd</sub> '=		100	prom.	Kabli:		Ap'	0,00	0,00	0,00			
						Ap		0,00	0,00	0,00	0,00			
						Rač. odpornost:		9750,00	38929,30	Eži max Mrd (Nrd=Nsd)			Eži max Mrd (Nrd=?)	
Obremenitev (kN,m)		N		M		Napaka:		0,00	17929,30	Eži max Nrd (Mrd=Msd)			Eži max Nrd (Mrd=?)	
Stalna		5000		10000		Kvadrat:		1,1202E-19	321459634,8	Eži min Mrd			Eži min Mrd	
Spremenj.		2000		5000		Vsota kv.:		321459635		Eži min Nrd			Eži min Nrd	
Projektna		0		0										





Slika 9: Glavna stran programa za račun odpornosti poligonalnega prereza

EpsM=		2,32708	prom.	n_podpr=		150	Sc ->	6,13239	m3	Mc,Rd->	24975,9	kNm		
fcd=		2	kN/cm2				Ztc ->	1,25	m					
fyd=		34,7826	kN/cm2				ly ->	1,91353	m4					
i	bgzj	bspj	hj	b_sr	Zci	Api	Api*Zci	zi	lyi	Epsi	Sigi	Nci	Mci	
1	0	0,40689	0,01667	0,20344	0,00833	0,00339	2,8E-05	-1,24167	0,00523	-3,48061	-20000	-67,8142	84,2026	
2	0,40689	0,57349	0,01667	0,49019	0,025	0,00817	0,0002	-1,225	0,01226	-3,44182	-20000	-163,396	200,16	
3	0,57349	0,7	0,01667	0,63674	0,04167	0,01061	0,00044	-1,20833	0,0155	-3,40304	-20000	-212,248	256,466	
4	0,7	0,80554	0,01667	0,75277	0,05833	0,01255	0,00073	-1,19167	0,01782	-3,36425	-20000	-250,923	299,016	
5	0,80554	0,89753	0,01667	0,85153	0,075	0,01419	0,00106	-1,175	0,01959	-3,32547	-20000	-283,844	333,517	
6	0,89753	0,9798	0,01667	0,93866	0,09167	0,01564	0,00143	-1,15833	0,02099	-3,28668	-20000	-312,887	362,428	
7	0,9798	1,05462	0,01667	1,01721	0,10833	0,01695	0,00184	-1,14167	0,0221	-3,2479	-20000	-339,069	387,104	
8	1,05462	1,12349	0,01667	1,08905	0,125	0,01815	0,00227	-1,125	0,02297	-3,20912	-20000	-363,018	408,395	
9	1,12349	1,18743	0,01667	1,15546	0,14167	0,01926	0,00273	-1,10833	0,02366	-3,17033	-20000	-385,153	426,878	
10	1,18743	1,24722	0,01667	1,21733	0,15833	0,02029	0,00321	-1,09167	0,02418	-3,13155	-20000	-405,776	442,972	
11	1,24722	1,30341	0,01667	1,27532	0,175	0,02126	0,00372	-1,075	0,02456	-3,09276	-20000	-425,106	456,988	
12	1,30341	1,35647	0,01667	1,32994	0,19167	0,02217	0,00425	-1,05833	0,02483	-3,05398	-20000	-443,313	469,173	
13	1,35647	1,40673	0,01667	1,3816	0,20833	0,02303	0,0048	-1,04167	0,02499	-3,01519	-20000	-460,533	479,722	
14	1,40673	1,45449	0,01667	1,43061	0,225	0,02384	0,00536	-1,025	0,02505	-2,97641	-20000	-476,871	488,793	
15	1,45449	1,5	0,01667	1,47725	0,24167	0,02462	0,00595	-1,00833	0,02503	-2,93762	-20000	-492,416	496,519	
16	1,5	1,54344	0,01667	1,52172	0,25833	0,02536	0,00655	-0,99167	0,02494	-2,89884	-20000	-507,241	503,014	
17	1,54344	1,585	0,01667	1,56422	0,275	0,02607	0,00717	-0,975	0,02478	-2,86005	-20000	-521,407	508,372	
18	1,585	1,62481	0,01667	1,6049	0,29167	0,02675	0,0078	-0,95833	0,02457	-2,82127	-20000	-534,968	512,677	
19	1,62481	1,663	0,01667	1,6439	0,30833	0,0274	0,00845	-0,94167	0,0243	-2,78248	-20000	-547,967	516,003	
20	1,663	1,69967	0,01667	1,68133	0,325	0,02802	0,00911	-0,925	0,02398	-2,7437	-20000	-560,445	518,411	
21	1,69967	1,73494	0,01667	1,7173	0,34167	0,02862	0,00978	-0,90833	0,02362	-2,70492	-20000	-572,435	519,962	
22	1,73494	1,76887	0,01667	1,7519	0,35833	0,0292	0,01046	-0,89167	0,02322	-2,66613	-20000	-583,967	520,704	
23	1,76887	1,80154	0,01667	1,7852	0,375	0,02975	0,01116	-0,875	0,02278	-2,62735	-20000	-595,068	520,685	
24	1,80154	1,83303	0,01667	1,81729	0,39167	0,03029	0,01186	-0,85833	0,02232	-2,58856	-20000	-605,762	519,946	
25	1,83303	1,86339	0,01667	1,84821	0,40833	0,0308	0,01258	-0,84167	0,02182	-2,54978	-20000	-616,07	518,526	
26	1,86339	1,89268	0,01667	1,87803	0,425	0,0313	0,0133	-0,825	0,0213	-2,51099	-20000	-626,011	516,459	
27	1,89268	1,92094	0,01667	1,90681	0,44167	0,03178	0,01404	-0,80833	0,02077	-2,47221	-20000	-635,602	513,778	
28	1,92094	1,94822	0,01667	1,93458	0,45833	0,03224	0,01478	-0,79167	0,02021	-2,43342	-20000	-644,859	510,514	
29	1,94822	1,97456	0,01667	1,96139	0,475	0,03269	0,01553	-0,775	0,01964	-2,39464	-20000	-653,796	506,692	
30	1,97456	2	0,01667	1,98728	0,49167	0,03312	0,01628	-0,75833	0,01905	-2,35585	-20000	-662,427	502,34	

Slika 10: Delovni list iz programa za račun odpornosti krožnega prečnega prereza, na katerem se izračuna prispevek betona k odpornosti prereza

Prispevek betona k odpornosti prereza se izračuna na posebnem delovnem listu Microsoft Excel-a, tako da razdelimo prerez na posamezne lamele. Izračunamo ploščino posameznih lamel in celotnega prereza:

$$A_i = D_z \times b_i, \text{ kjer so} \quad (45)$$

$A_i$  - ploščina pos. lamele,  $D_z$  – debelina posamezne lamele,  $b_i$  – povprečna širina lamele

$$A_c = \sum_i A_i \quad (46)$$

Izračunamo tudi statične momente posameznih lamel na zgornji rob prereza in jih seštejemo:

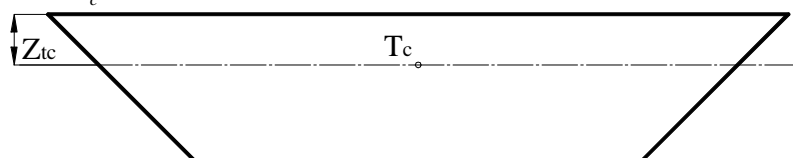
$$S_i = A_i \times Z_i \quad (47)$$

, kjer so  $S_i$  – Statični moment lamele na zgornji rob prečnega prereza,  $Z_i$  – oddaljenost sredine lamele od zgornjega roba prečnega prereza

$$S_c = \sum_i S_i \quad (48)$$

Sedaj lahko izračunamo razdaljo težišča betonskega prereza od zgornjega roba prereza:

$$Z_{tc} = \frac{S_c}{A_c} \quad (49)$$



Slika 11: Razdalja težišča betonskega prereza od zgornjega roba prereza

Izračunamo koordinate središča vsake lamele v lokalnem koordinatnem sistemu:

$$z_i = Z_i - Z_{tc} \quad (50)$$

S pomočjo Steinerjevega izreka izvedemo račune vztrajnostnih momentov lamel glede na težišče prereza in jih seštejemo:

$$I_i = \frac{b_i \times D_z^3}{12} + A_i \times z_i^2 \quad (51)$$

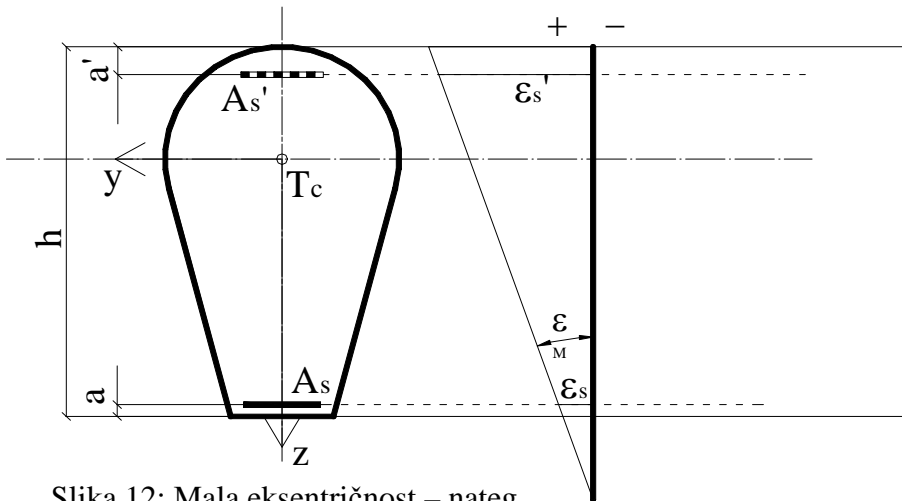
$$I_c = \sum_i I_i \quad (52)$$

Glede na  $\varepsilon_0$ , deformacijo v težišču, in  $\varepsilon_M$ , ukrivljenost, izračunamo specifične deformacije lamel. V primeru male ekscentričnosti-natega, deformacija  $\varepsilon_1$  predstavlja deformacijo manj tegnjene armature. V primeru male ekscentričnosti-tlaka pa deformacija  $\varepsilon_s$  predstavlja deformacijo betona na krajnem manj tlačnem robu prereza. V primeru velike ekscentričnosti, ko je upogibni moment negativen, deformacija  $\varepsilon_s$  predstavlja deformacijo tlačne armature.

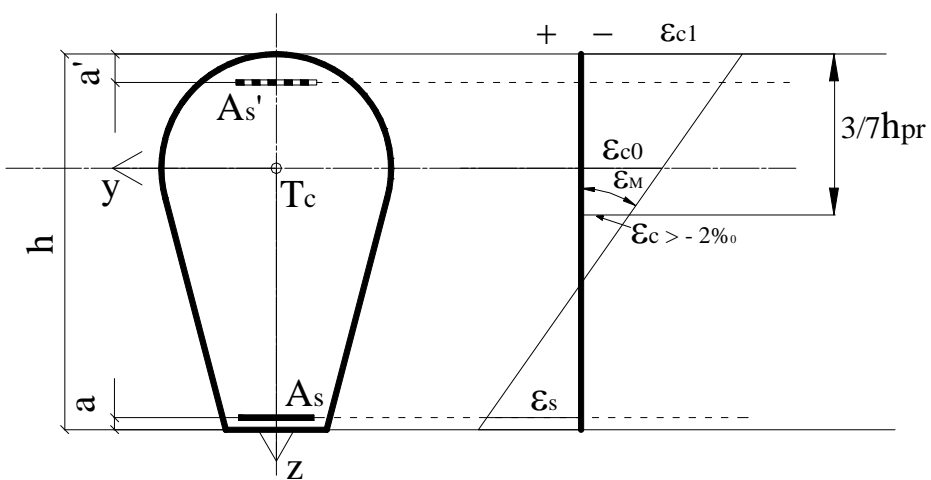
$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \times z_i \quad (53)$$

$\varepsilon_s \geq 0$ in $\varepsilon_1 \geq 0 \Rightarrow \varepsilon_M = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{h - a - a'}$	mala ekscentričnost – nateg ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_s'$ )
$\varepsilon_s \geq 0$ in $\varepsilon_1 \leq 0 \Rightarrow \varepsilon_M = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{h - a}$	velika ekscentričnost – $M > 0$
$\varepsilon_s \leq 0$ in $\varepsilon_1 \leq 0 \Rightarrow \varepsilon_M = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{h}$	mala ekscentričnost – tlak ( $\varepsilon_s = \varepsilon_{c2}$ , $\varepsilon_1 = \varepsilon_{c1}$ )
$\varepsilon_s \leq 0$ in $\varepsilon_1 \geq 0 \Rightarrow \varepsilon_M = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{h - a'}$	velika ekscentričnost – $M < 0$ ( $\varepsilon_s = \varepsilon_s'$ , $\varepsilon_1 = \varepsilon_{c2}$ )

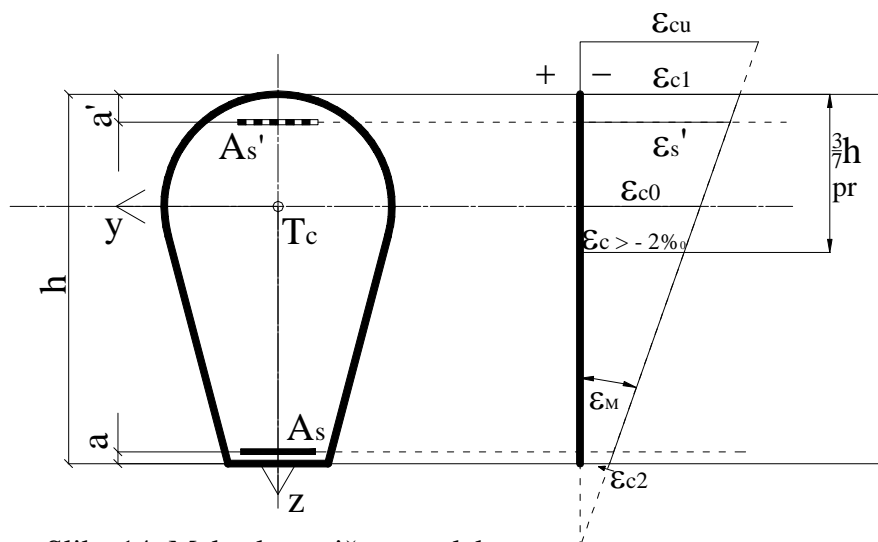
$$(54)$$



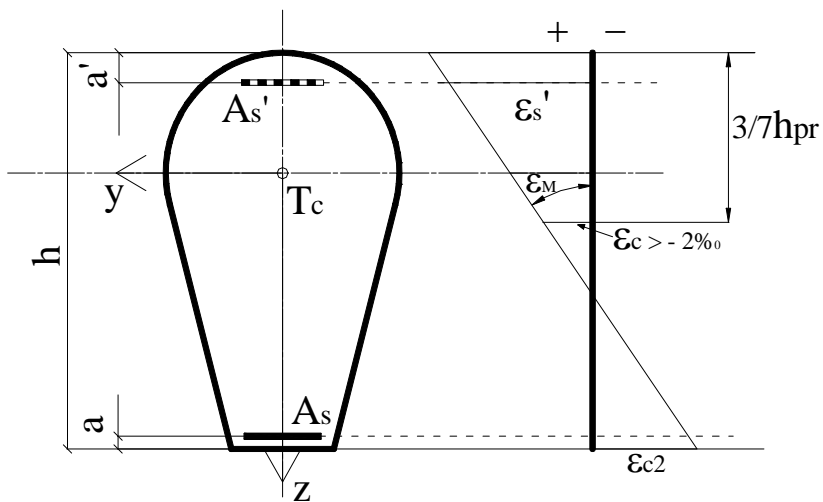
Slika 12: Mala eksentričnost – nateg



Slika 13: Velika eksentričnost –  $M > 0$



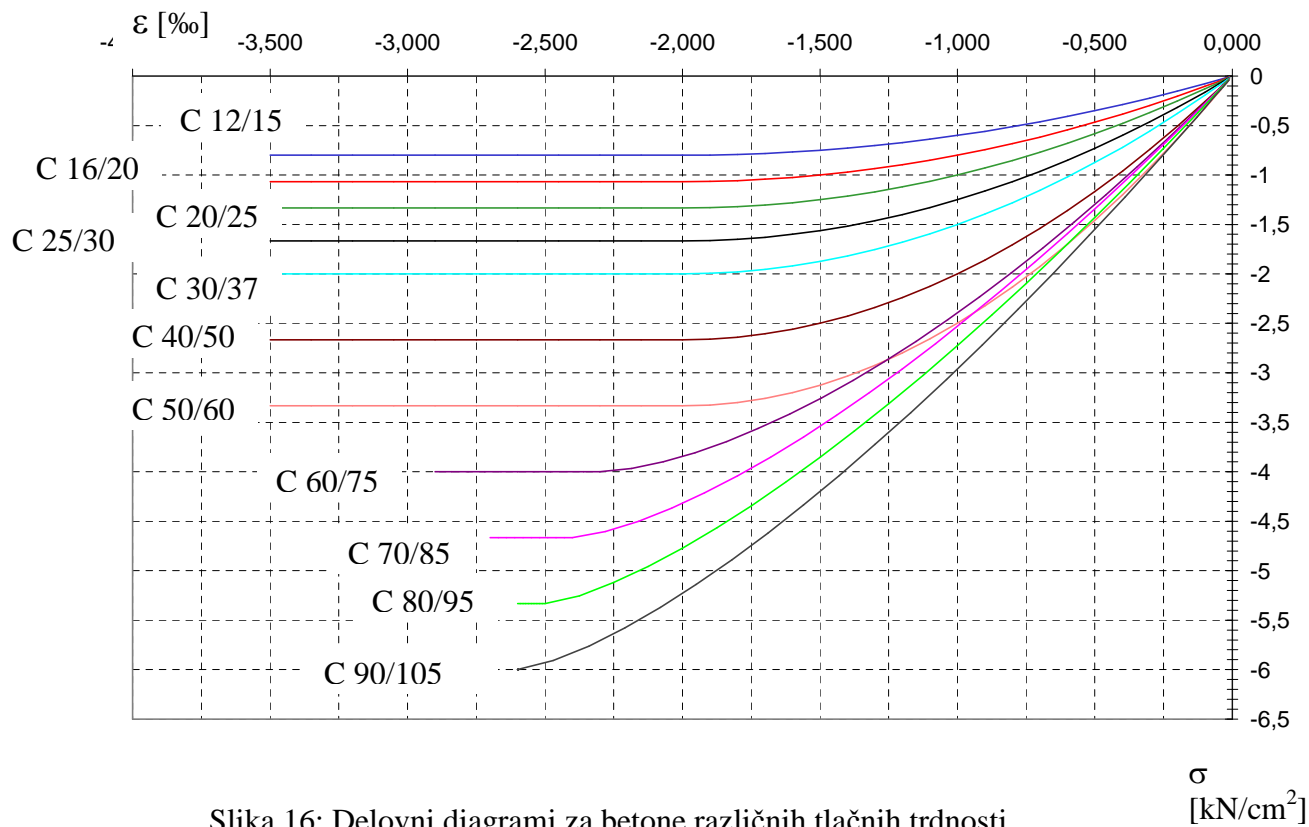
Slika 14: Mala eksentričnost – tlak



Slika 15: Velika eksentričnost –  $M < 0$

Račun napetosti po lamelah izvedemo z uporabo konstitutivnega zakona betona. Pri uporabi funkcije moramo podati tudi potrebne parametre:

- dejansko deformacijo
- tlačno trdnost betona
- specifično deformacijo betona,  $\epsilon_{c2}$ , pri največji napetosti
- mejno specifično deformacijo betona,  $\epsilon_{cu2}$
- $n$ , koeficient odvisen od trdnostnega razreda betona.



Slika 16: Delovni diagrami za betone različnih tlačnih trdnosti

$\sigma$   
[kN/cm<sup>2</sup>]

Konstitutivni zakon betona za dimenzioniranje konstrukcij se glasi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i \geq 0 \text{ ali } \varepsilon_i \leq \varepsilon_{cu2} &\rightarrow \sigma_c = 0, \\ 0 \geq \varepsilon_i \geq \varepsilon_{c2} &\rightarrow \sigma_c = -\alpha_{cc} \times f_{cd} \times \left( 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right), \\ \varepsilon_{c2} \geq \varepsilon_i \geq \varepsilon_{cu2} &\rightarrow \sigma_c = -\alpha_{cc} \times f_{cd}. \end{aligned} \quad (55)$$

Nato določimo tudi prispevke posameznih lamel k osni in upogibni nosilnosti betonskega prereza:

$$N_{ci} = \sigma_{ci} \times A_{li} \quad (56)$$

$$M_{ci} = N_{ci} \times z_{li} \quad (57)$$

Račun prispevka armature k odpornosti prereza se začne z izračunom deformacije na mestu armature:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \times z_s \quad \text{oziroma} \quad \varepsilon_s' = \varepsilon_0 + \varepsilon_M \times z_s' \quad (58)$$

S pomočjo konstitutivnega zakona lahko določimo napetost v armaturi:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E} \quad \text{pri čemer je } \varepsilon_{yd} \text{ projektna deformacija na meji tečenja} \quad (59)$$

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{ud} \text{ ali } \varepsilon_s \leq -\varepsilon_{ud} \rightarrow \sigma_s = 0$$

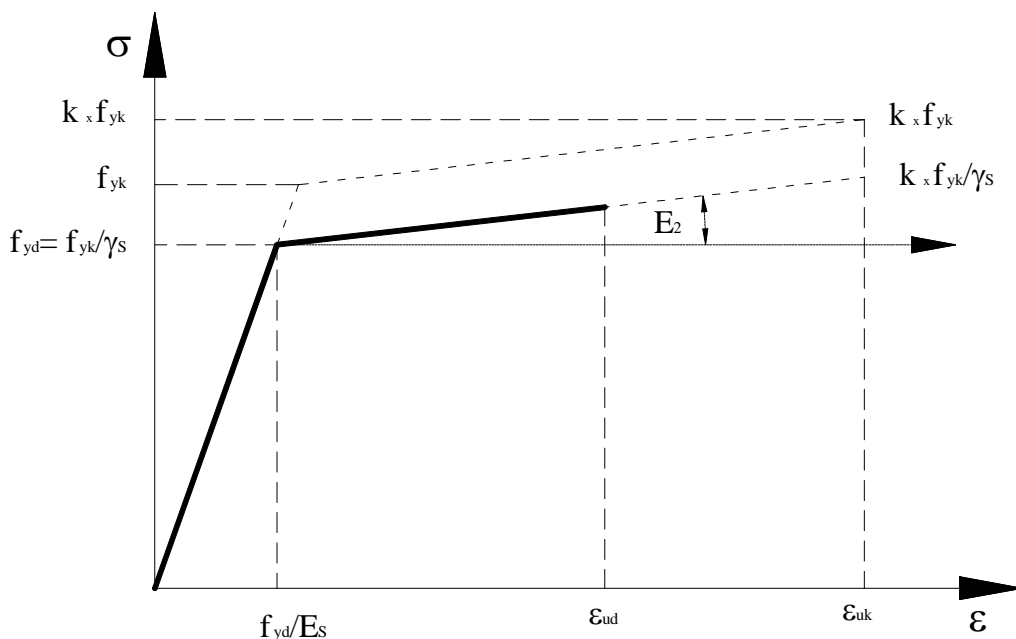
$$\text{sicer, če } k = 1 \rightarrow \sigma_s = \frac{f_{yd}}{2} \times \left( \left| \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{yd}} + 1 \right| - \left| \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{yd}} - 1 \right| \right)$$

$$\text{če } k \neq 1 \rightarrow E_2 = (k - 1) \times \frac{f_{yd}}{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{yd}}$$

$$f_{yd}^* = f_{yd} - \varepsilon_{yd} \times E_2,$$

$$\sigma_s^* = \frac{f_{yd}^*}{2} \times \left( \left| \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{yd}} + 1 \right| - \left| \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{yd}} - 1 \right| \right), \quad \sigma_s = \sigma_s^* + E_2 \times \varepsilon_s \quad (60)$$

Pri čemer je  $k = f_t / f_{yd}$  količnik med napetostjo pri poružitvi jekla z utrditvijo in projektno mejo elastičnosti.



Slika 17: Diagram deformacija – napetost in izračun pomožne napetosti za jeklo z utrditvijo

Nato določimo tudi prispevke posameznih točk armature k osni in upogibni odpornosti prečnega prereza. Pri tem moramo odšteti prispevek betona k odpornosti na mestu prerezov armature:

$$N_{si} = (\sigma_{si}(E_s) - \sigma_c(si)) \times A_{si} \quad (61)$$

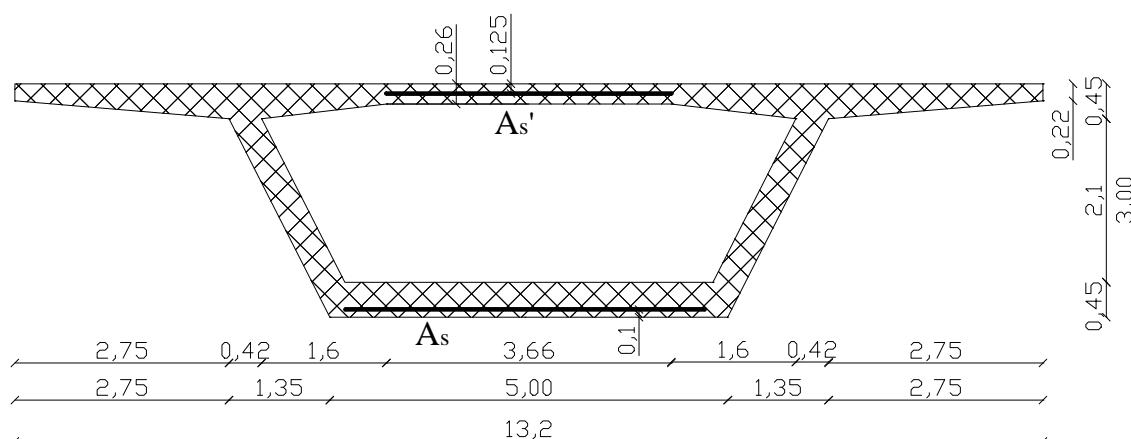
$$M_{si} = N_{si} \times z_{si} \quad (62)$$

### 5.1.1 Interakcijski diagrami poligonalnih prerezov

Račun prispevka armature k odpornosti je enostavnejši za poligonalni prerez kot za krožni prerez, saj smo v tem primeru upoštevali samo dve mesti armature – težišče spodnje in zgornje armature. Zato se račun prispevka armature k odpornosti prereza lahko izvede na glavnem delovnem listu programa.

V računskem primeru sem s programom preverila, kakšen je vpliv različnih tlačnih trdnosti betona in kakšen vpliv imajo različni količniki armiranja na osno-upogibno odpornost škatlastega prereza. Najprej sem s programom določila in izrisala interakcijske diagrame

osno-upogibne odpornosti za prereze iz betonov različnih tlačnih trdnosti, a z enako količino armature. Primerjala sem tudi osno-upogibne odpornosti prerezov iz betona enake tlačne trdnosti, ki imajo različne količine natezne ali tlačne armature. S programom sem preučila razlike v odpornostih prečnega prereza z različnimi karakteristikami za naslednji škatlasti prečni prerez :



$$A_c = 8,47 \text{ m}^2$$

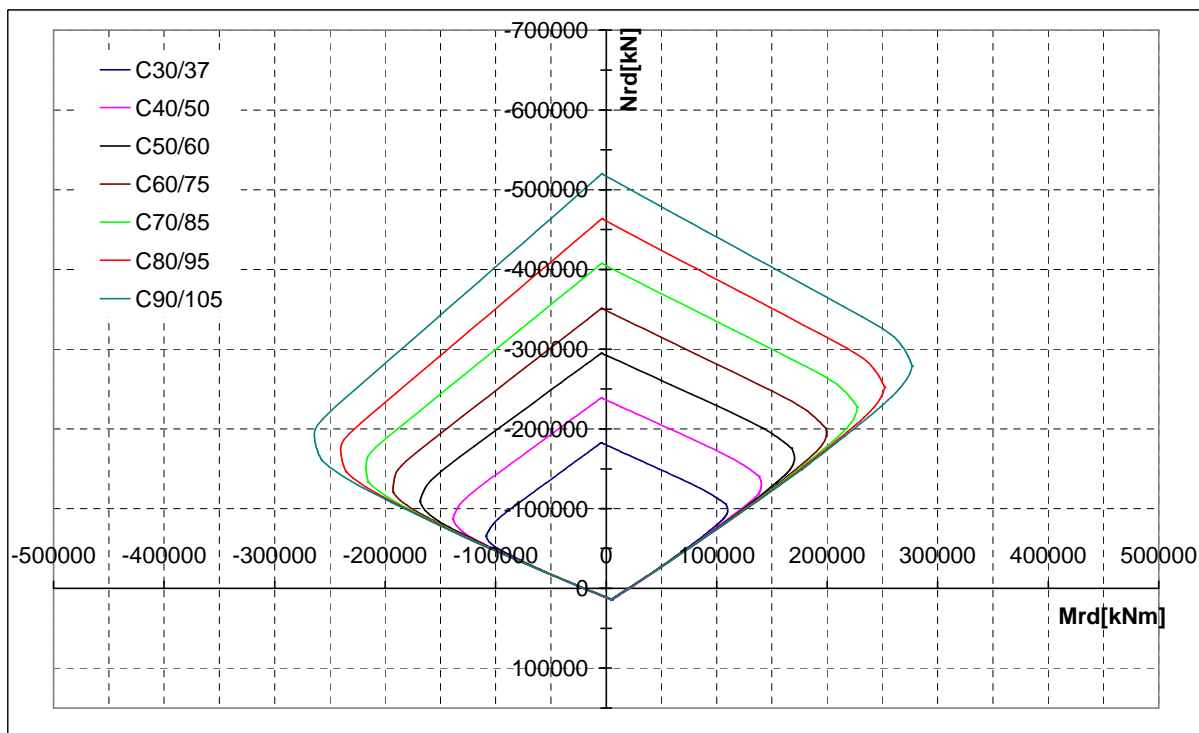
$$Z_{tc} = 1,17 \text{ m}$$

$$I_{yc} = 11,31 \text{ m}^4$$

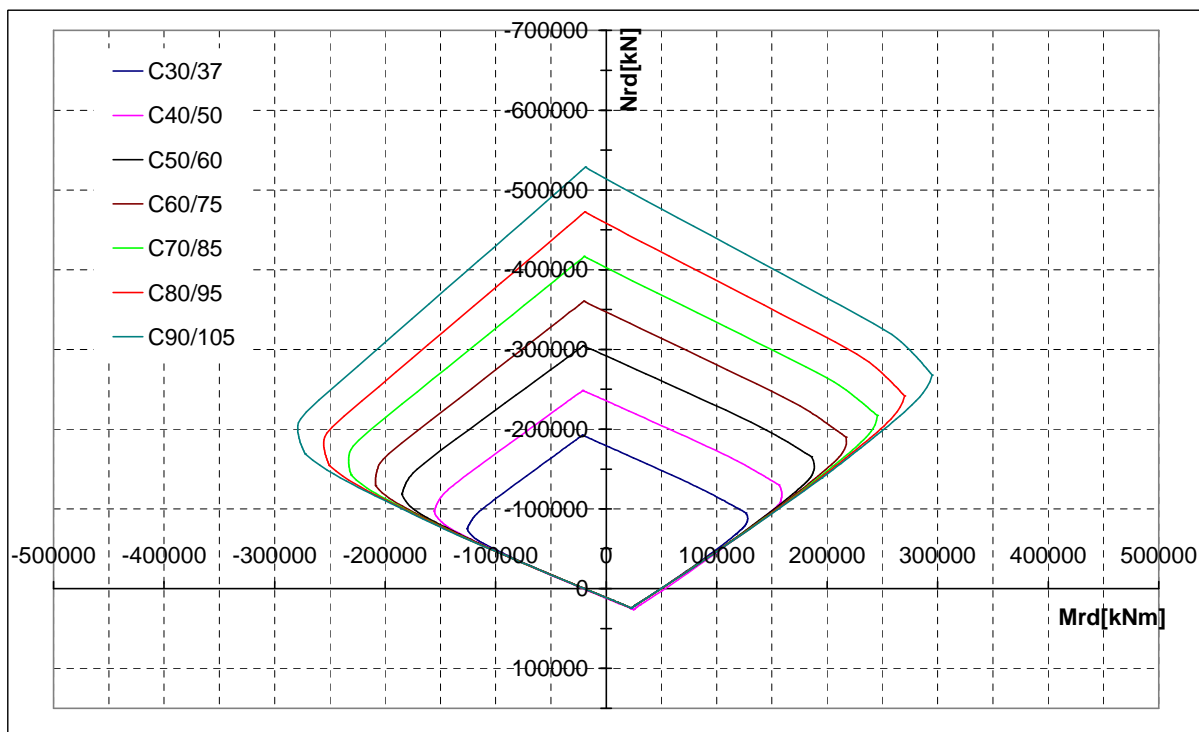
Slika 18: Škatlasti prerez prekladne konstrukcije mostu za primerjavo vpliva različnih tlačnih trdnosti betona in različne količine armiranja

Ugotovitve pri višanju tlačne trdnosti betona ob enaki količini armature (Slike 19-22):

1. Znatno povišanje upogibne odpornosti prereza je mogoče le pri povečanju tlačne sile prereza,
2. Maksimalna upogibna odpornost prereza se povečuje približno še enkrat počasneje kot maksimalna osna tlačna odpornost prereza,
3. Maksimalna osna tlačna odpornost prereza se povečuje, vendar njej pripadajoča upogibna odpornost prereza ostaja enako velika (ta je odvisna le od armature, ki je v tem primeru konstantna).

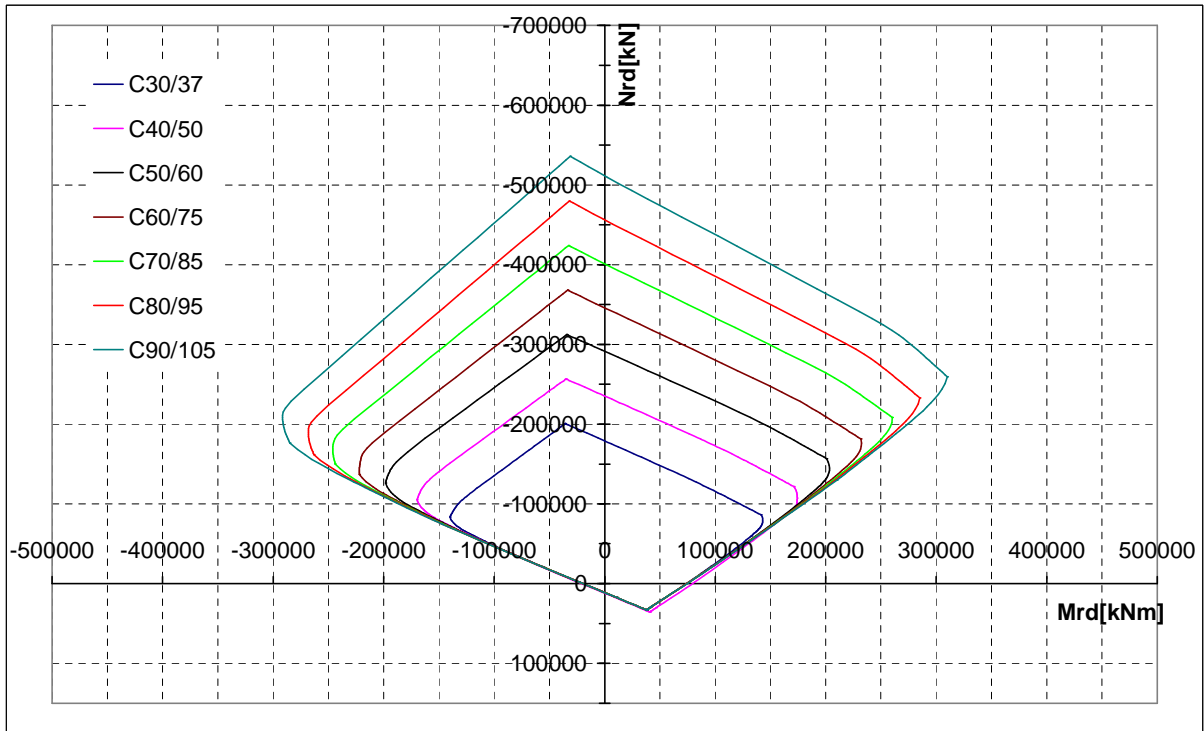


Slika 19: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z armaturo  $A_s = 200 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona

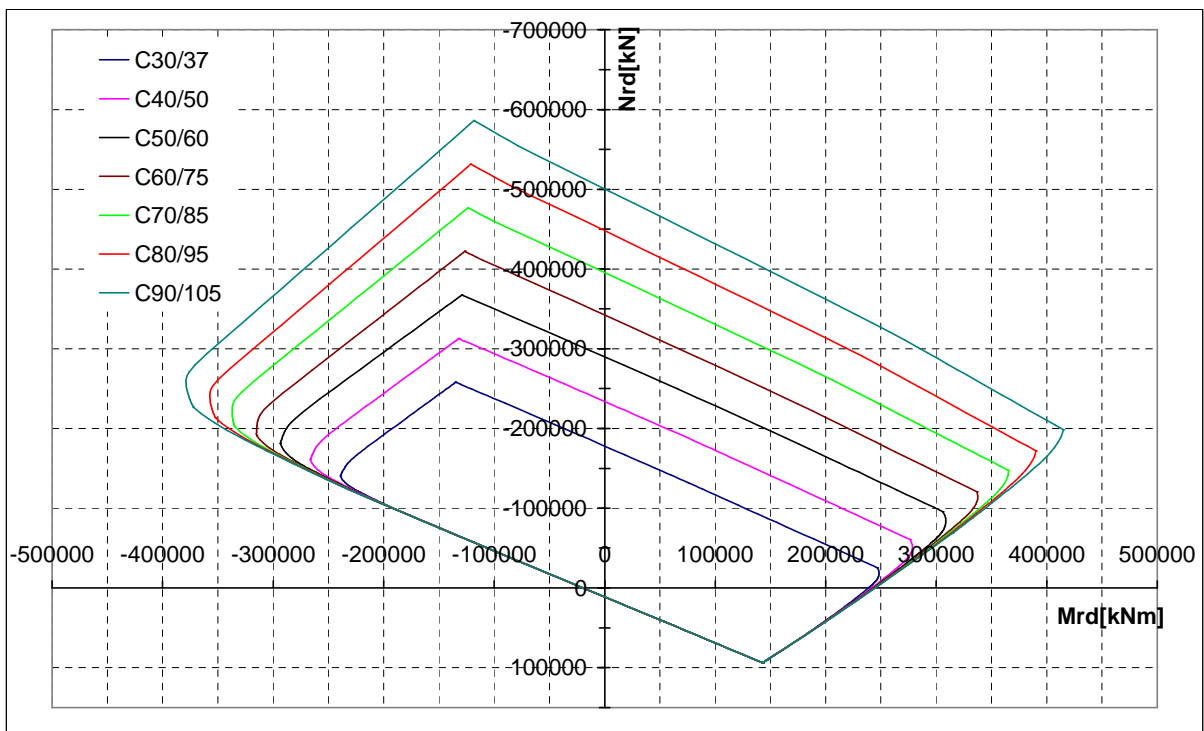




Slika 20: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z armaturo  $A_s = 500 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona



Slika 21: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z armaturo  $A_s = 750 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona



Slika 22: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z armaturo  $A_s = 2500 \text{ cm}^2$ ,  $A_s' = 200 \text{ cm}^2$  pri različnih tlačnih trdnostih betona

Diagrami na *Sliki 22* so narisani samo zaradi nazornosti povečanja odpornosti prerezov z različnimi tlačnimi trdnostmi prereza, kadar imamo v prerezu večjo količino armature. Zavedati se namreč moramo, da  $2500 \text{ cm}^2$  armature ni mogoče vgraditi v tak prerez.

Ugotovitve pri spreminjanju količine spodnje armature ob enaki tlačni trdnosti betona (*Slike 23, 24 in 27*):

1. Če je osna tlačna sila pod določeno mejo, se s povečevanjem količine spodnje armature upogibna odpornost prereza povečuje,
2. Z višanjem maksimalne upogibne odpornosti se znižuje pripadajoča osna odpornost prereza,
3. Z višanjem maksimalne osne tlačne odpornosti se povečuje pripadajoča upogibna odpornost prereza glede negativnih upogibnih momentov,
4. Osno-upogibna odpornost prerezov iz betona visoke trdnosti je možno izkoristiti le z ustreznim povečanjem sile v armaturi.

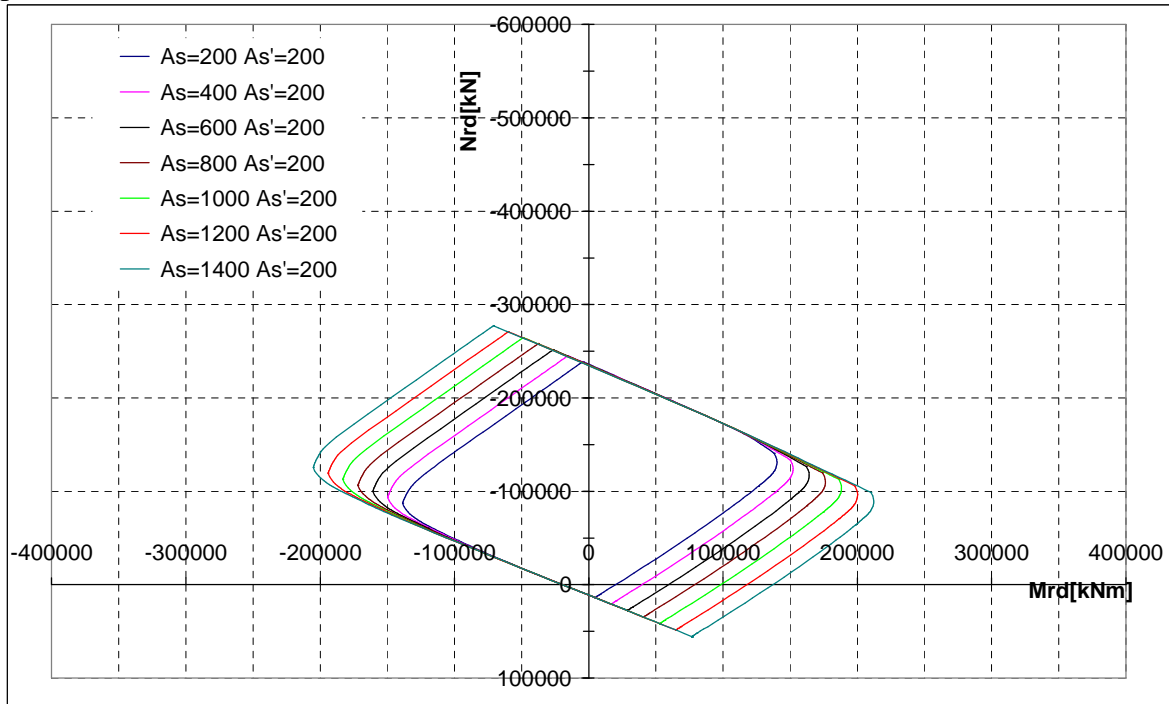
Ugotovitve pri spreminjanju količine zgornje armature ob enaki tlačni trdnosti betona:

1. Ob višji tlačni osni sili povečevanje zgornje armature zvišuje upogibne odpornosti prereza; če tlačna sila ni zadosti velika, povečevanje zgornje armature ne pripomore nič k upogibni odpornosti prereza (*Slika 25*),
2. Z višanjem maksimalne upogibne odpornosti narašča pripadajoča pozitivna osna odpornost prereza (*Slika 25*),
3. Z višanjem maksimalne osne natezne odpornosti prereza se povečuje pripadajoča upogibna odpornost prereza glede negativnih upogibnih momentov (*Slika 25*).

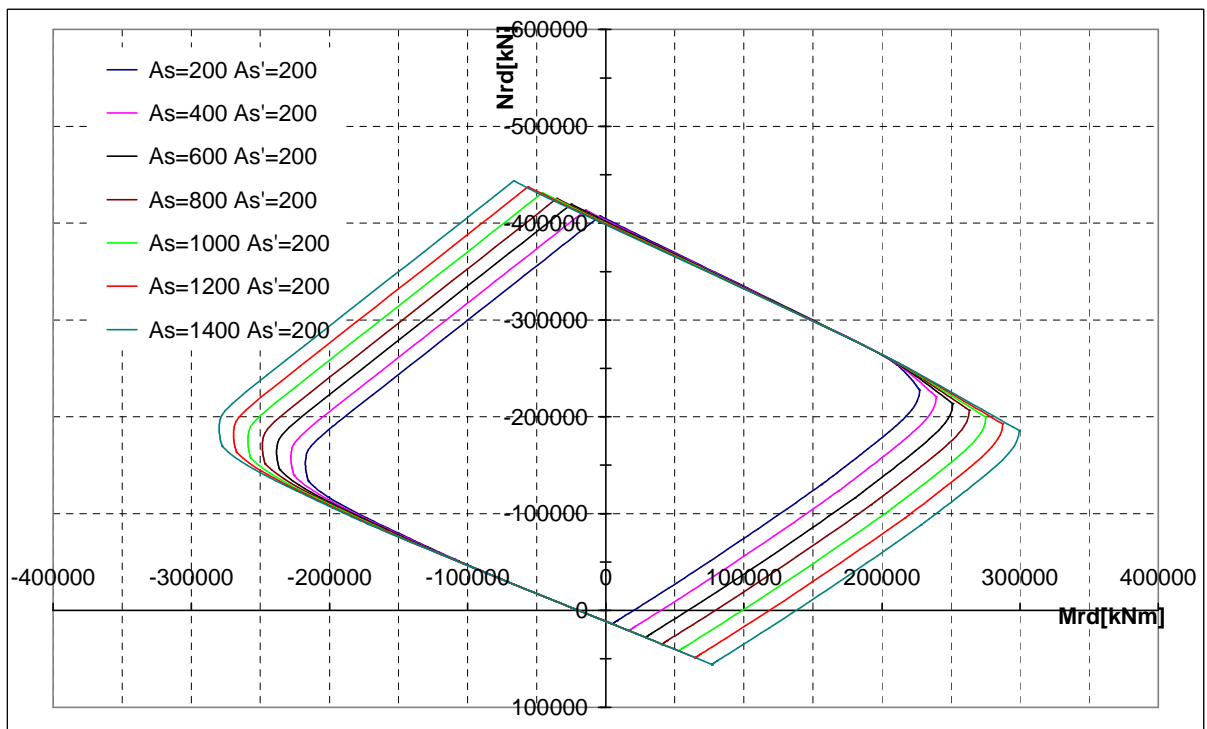
Z večanjem količine spodnje armature se upogibna odpornost prereza povečuje bolj kot če povečujemo količino zgornje armature (primerjava *Slike 23 in 24*).

Če želimo povečati obseg območja odpornosti prereza na osno-upogibne obremenitve, je potrebno povečevati količino spodnje in zgornje armature (*Slika 26*). Če želimo povečati

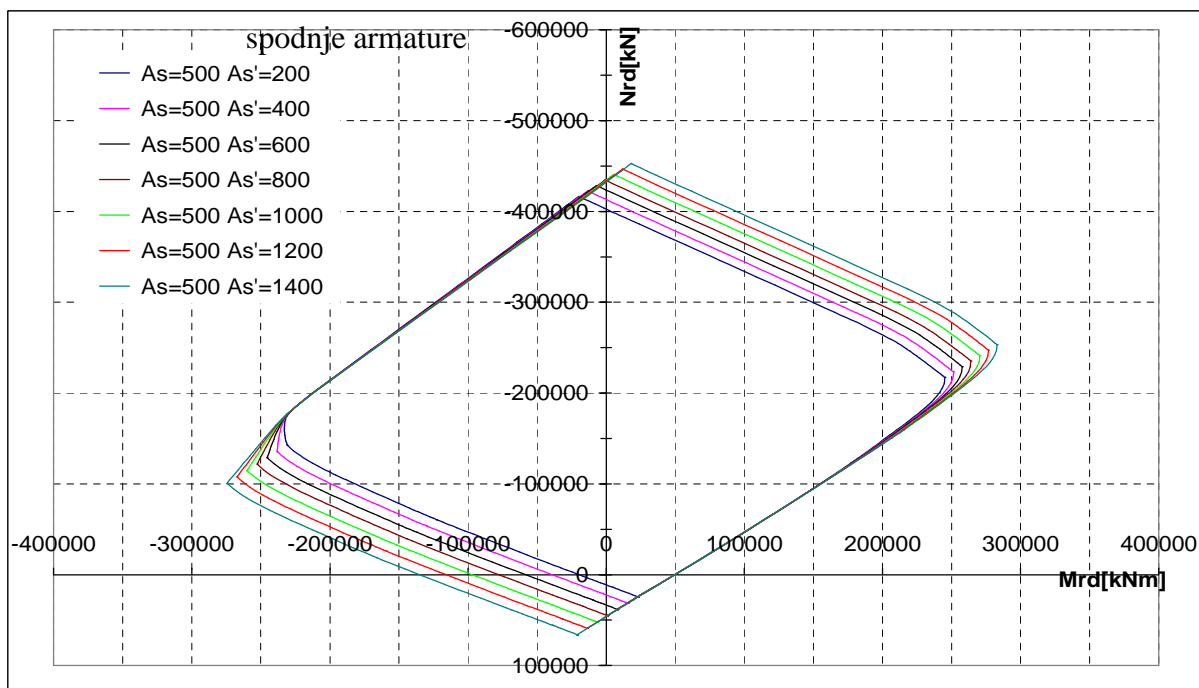
pripadajočo upogibno odpornost prereza tudi ob višji tlačni obremenitvi, lahko namesto povečevanja količine obeh armatur, kar lahko včasih vodi do nerealnih količin armature, povečamo tlačno trdnost betona (Slike 19 -22).



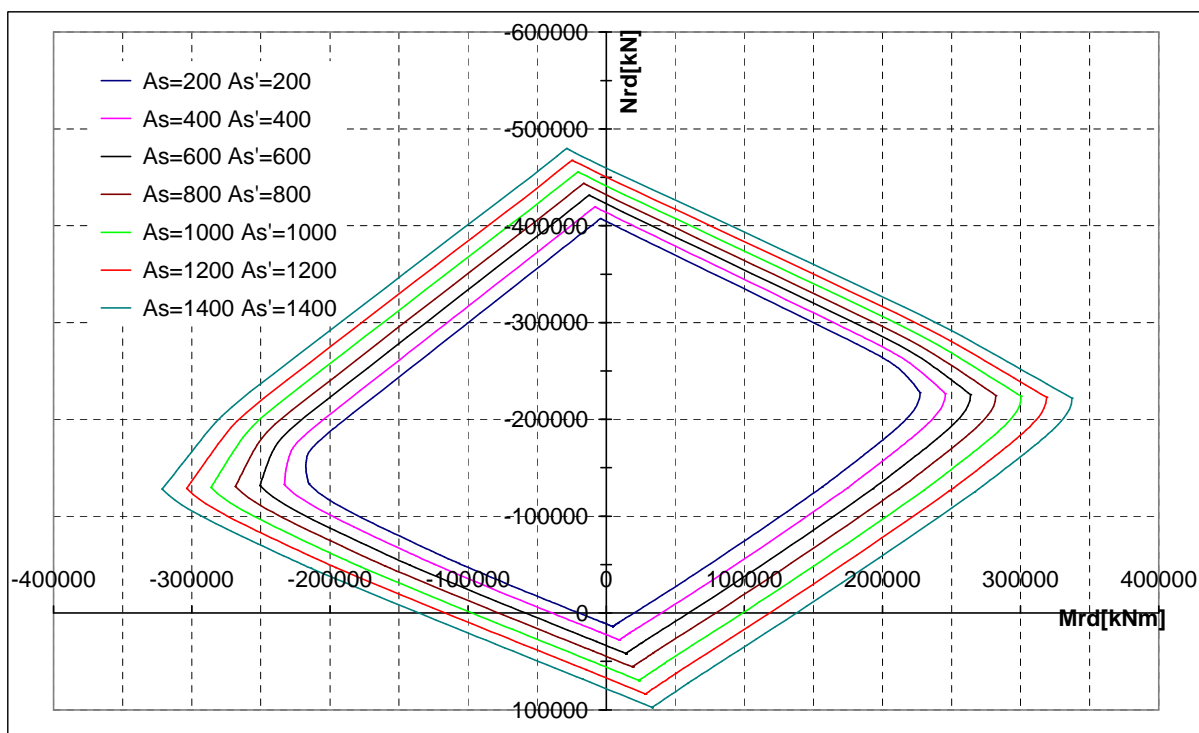
Slika 23: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 40/50 pri različnih količinah spodnje armature



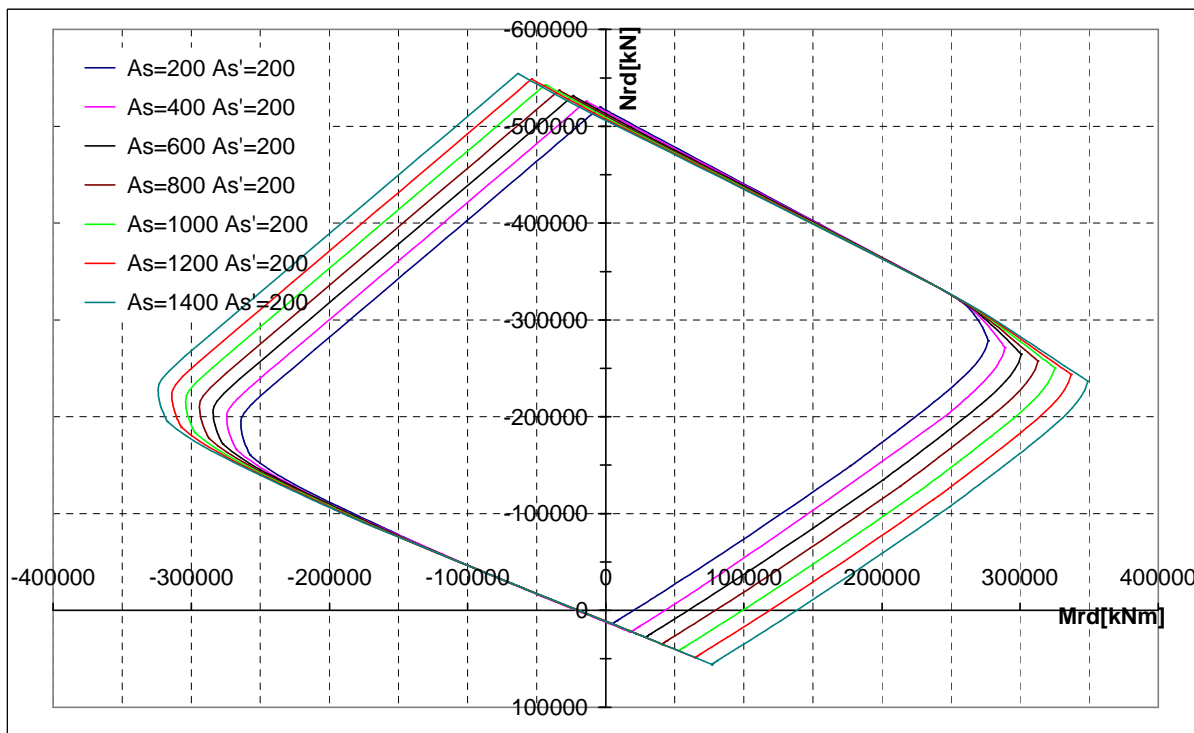
Slika 24: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 70/85 pri različnih količinah



Slika 25: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 70/85 pri različnih količinah zgornje armature



Slika 26: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza iz betona trdnostnega razreda C 70/85 pri različnih količinah zgornje in spodnje armature in razmerju  $k = \frac{\mu}{\mu'} = 1,00$



Slika 27: Interakcijski diagrami osno-upogibne odpornosti škatlastega prečnega prereza z betonom trdnostnega razreda C 90/105 pri različnih količinah spodnje armature

### 5.1.2 Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti za krožni prečni prerez

Skušala sem ugotoviti tudi, kakšna je smotrnost uporabe betonov visoke trdnosti pri krožnih prečnih prerezih predvsem stebrov, npr. za mostne konstrukcije ali visoke stavbe. To me je zanimalo predvsem zaradi že dognanih ugotovitev v razvojno raziskovalni nalogi, predhodno izvedeni na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, na Katedri za masivne in lesene konstrukcije [F. Saje in sod., 2005]. V njej je bilo že ugotovljeno, da z višjo tlačno trdnostjo betona ne zmanjšamo bistveno potrebne višine škatlastega prereza prekladne konstrukcije. Zaradi velike potrebne količine natezne armature v prerezu prekladne konstrukcije, tlačne trdnosti betona ne moremo v celoti izkoristiti, zaradi česar ni možno bistveno povečati

upogibne odpornosti prereza. Narava obremenitve pri stebrih je malo drugačna kot pri prekladni konstrukciji, saj so mnogo bolj tlačno obremenjeni. Zato sem pripravila posebno programsko opremo za račun osno-upogibne odpornosti krožnega prereza.

Ta računalniški program je pripravljen za poljubne premere stebrov. Podajamo lahko poljubno število točk armature in poljubni količnik armiranja ali poljubni premer armaturnih palic. Z izbirnimi gumbi izberemo kaj želimo, da program upošteva - velikost palic ali količnik armiranja. V tej programski opremi se račun prispevka armature k osno-upogibni odpornosti prereza izvede na posebnem listu Excela, saj je lahko zelo obsežen. Najprej program armaturo enakomerno razporedi v krožnem prerezu glede na podatke. Zatem za vsako točko armature posebej določi deformacijo na tistem mestu in napetost v posamezni točki armature. Napetost v armaturi se izračuna s pomočjo konstitutivnega zakona uporabljene armature, ki je že napisan v poglavju 5.1 v enačbah (59) in (60). Določijo in seštejejo se prispevki posameznih točk armature k osni in upogibni odpornosti krožnega prečnega prereza po predhodno napisanih enačbah (61) in (62).

okrogli prerez $\phi = 2,50$ m		Deformacije: * - če je negativno velja za $\varepsilon_2$ (bet.)		Mejno	Dodatna omejitev
Geometrija prereza: Vse dimenzije v metrih!		Generiranje nove geometrije		$\varepsilon_s^* - \varepsilon_1 = -3,500$ prom.	eps0= epsM= -3,50
Število podprezov: 150				$\varepsilon_1 - \varepsilon_s^* = 2,132$ prom.	-0,591 2,327 20,00 20,00
		odstotek armiranja je podatek za armaturo		$\varepsilon_c^* = -1,007$ prom.	-1,007 -2,00 20,00
		upoštevaj dimenzijo armaturnih palic		$\varepsilon_c = -0,176$ prom.	-0,176 -2,00
n = 26		Eps 2 -> 0		Za interakcijske diagrame upoštevaj podatek za fi palic	
$\phi = 20$ mm	n = 370			Za interakcijske diagrame upoštevaj podatek o koeficientu armiranja	
a = 0,1 m	a = 0,08 m	razporedi armaturo		Podatki za interakcijske diagrame	
n = 370	$\phi = 0$ mm			n = 1	Racunam f=
$\mu = 0,000$				i	Beton Armatura $n_s$ $\phi$ [mm] $\mu_s$ a-kr. sloj arm.[m]
a = 0,08 m				1	C30/37 RA_400/500 1 0,001 0,1
Kvaliteta materialov:		Bet. $f_{cd} = 2,00$ kN/cm <sup>2</sup>		2	C40/50 RA_400/500 143 0,6 0,1
Beton: C30/37		$f_{ck} = 30,00$ MPa		3	C50/60 RA_400/500 204 0,6 0,1
$\gamma_c = 1,5$		$\varepsilon_{c2} = -2,00$ prom.		4	C60/75 RA_400/500 204 0,6 0,1
$\alpha_{cc} = 1$		$\varepsilon_{cu2} = -3,50$ prom.		5	C70/85 RA_400/500 204 0,6 0,1
		n = 2,00		6	C80/95 RA_400/500 204 0,6 0,1
		$E_{cm} = 3200,00$ kN/cm <sup>2</sup>		7	C90/105 RA_400/500 204 0,6 0,1
		Arm. $f_{yd} = 34,78$ kN/cm <sup>2</sup>		8	C70/85 RA_400/500
		E = 20000 kN/cm <sup>2</sup>		9	C80/95 RA_400/500
		k = 1,00		10	C90/105 RA_400/500
		$\varepsilon_{sd} = 200$ prom.		11	C40/50 RA_400/500 0
				12	C40/50 RA_400/500 0
				13	C40/50 RA_400/500 0
				14	C40/50 RA_400/500 0
				15	C50/60 RA_400/500 0
				16	C50/60 RA_400/500 0
				17	C50/60 RA_400/500 0
				18	C50/60 RA_400/500 0
Obremenitev (kN,m)		Pokazi veliko sliko			
Obtežba	N M				
Stalna	0 0				
Sprem.	0 0				
Projektna:	0 0				

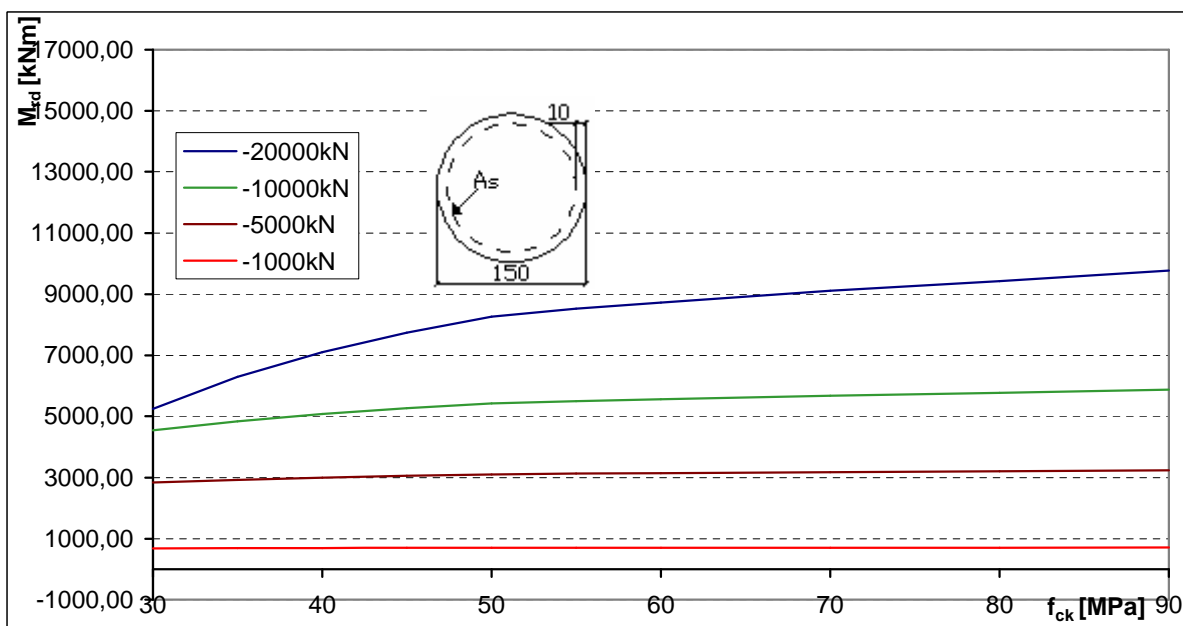
Slika 28 : Glavna stran programa za račun odpornosti krožnih prečnih prerezov

n->	370	alfa->	0,97297 °			Ns,rd->	0 kN	fyd =	34,7826	kN/cm2
a->	0,08 m	eps0->	-0,5912	As1->	0 cm^2	Ms,rd->	0 kNm	Es =	20000	kN/cm2
fi->	0 mm	epsM->	2,32708					ks =	1	
								epsud =	200	prom.
								fcd =	2	
								epsc2 =	-2	
								epscu2 =	-3,5	
								n =	2	
Armatura	a [m]	z [m]	def.[prom	s_1 [kN/c	s_2[kN/cr	nap [kN/cm^2]	Nsi,rd [kN	Msi,rd [kNm]		
1	0,08	-1,17	-3,31383	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
2	0,08	-1,16983	-3,31344	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
3	0,08	-1,16933	-3,31226	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
4	0,08	-1,16848	-3,3103	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
5	0,08	-1,1673	-3,30756	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
6	0,08	-1,16579	-3,30403	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
7	0,08	-1,16393	-3,29971	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
8	0,08	-1,16174	-3,29462	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
9	0,08	-1,15922	-3,28875	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
10	0,08	-1,15636	-3,2821	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
11	0,08	-1,15317	-3,27467	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
12	0,08	-1,14965	-3,26647	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
13	0,08	-1,14579	-3,2575	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
14	0,08	-1,14161	-3,24776	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
15	0,08	-1,13709	-3,23725	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
16	0,08	-1,13225	-3,22598	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
17	0,08	-1,12708	-3,21395	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
18	0,08	-1,12158	-3,20117	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
19	0,08	-1,11577	-3,18763	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
20	0,08	-1,10963	-3,17334	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
21	0,08	-1,10317	-3,15831	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
22	0,08	-1,09639	-3,14254	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
23	0,08	-1,0893	-3,12603	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
24	0,08	-1,08189	-3,10879	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
25	0,08	-1,07417	-3,09082	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
26	0,08	-1,06614	-3,07214	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
27	0,08	-1,0578	-3,05274	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
28	0,08	-1,04916	-3,03263	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
29	0,08	-1,04021	-3,01181	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		
30	0,08	-1,03097	-2,9903	-34,7826	-2	-32,7826	0	0		

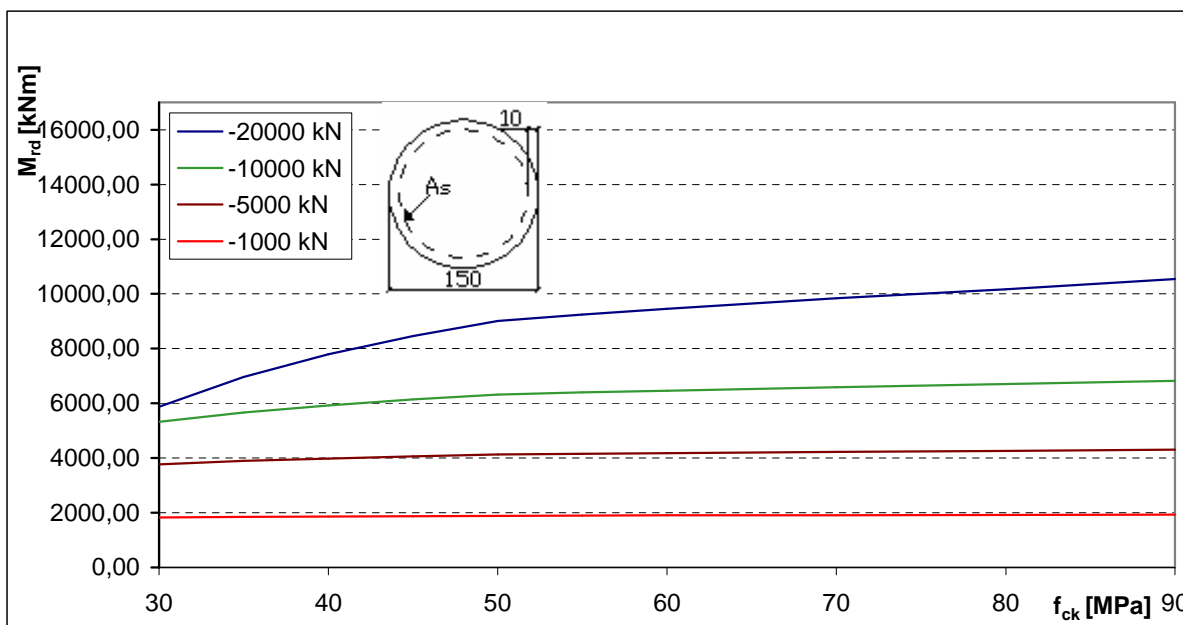
Slika 29 : Excel-ova stran za račun prispevka armature k odpornosti krožnih prečnih prerezov

Ugotovitve pri uporabi programa na računskih programih so naslednje:

1. Če je okrogli prečni prerez obremenjen z večjo tlačno osno silo, se hitreje povečuje upogibna odpornost prereza z višanjem trdnosti betona, saj je v tem primeru prispevek betona k upogibni odpornosti prereza večji (Slika 30).
2. Če je v stebru tudi armatura, so te razlike med upogibnimi odpornostmi stebrov, obremenjenih z različnimi tlačnimi osnimi silami, manjše (primerjaj slike Slika 30, Slika 31 in Slika 32).
3. Naraščanje upogibne odpornosti krožnih prerezov iz betonov tlačne trdnosti nad 50 MPa ni več tako izrazito (Slike 30-32).

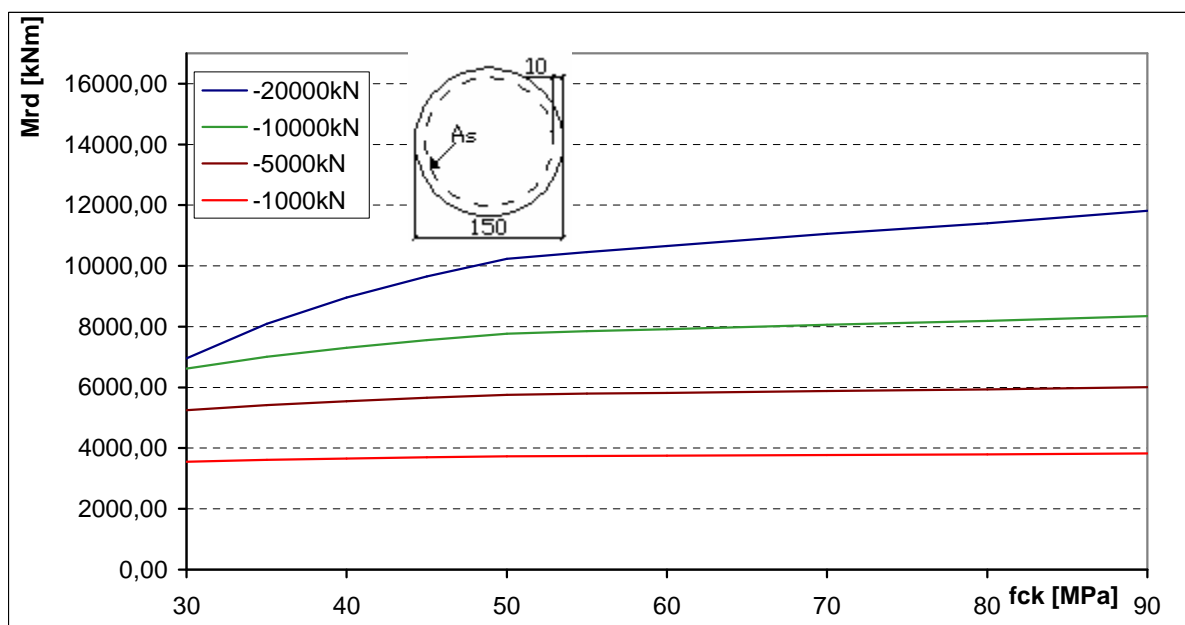


Slika 30: Prispevek betona ( $\mu=0$ ) k upogibni odpornosti pri različnih tlačnih osnih silah za krožni prečni prerez premera  $\phi = 1,5$  m v odvisnosti od tlačne trdnosti betona



Slika 31: Upogibna odpornost pri različnih tlačnih osnih silah za krožni prečni prerez premera  $\phi = 1,5$  m, s količnikom armiranja  $\mu = 0,003$  v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

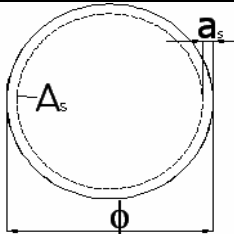




Slika 32: Upogibna odpornost pri različnih tlačnih osnih silah za krožni prečni prerez premera  $\phi = 1,5$  m, s količnikom armiranja  $\mu = 0,008$  v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

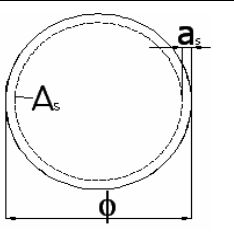
Če je krožni prečni prerez, npr. prečni prerez stebra, obremenjen z majhno tlačno silo, npr. samo z -1000 kN, je upogibna odpornost stebra iz betona trdnostnega razreda C 90/105 s tlačno projektno trdnostjo  $f_{cd} = 6,0 \text{ kN/cm}^2$ , ki je armiran s količnikom armiranja  $\mu_s = 0,015$ , le za 8,7% večja od enako armiranega stebra iz betona trdnostnega razreda C30/37 s projektno tlačno trdnostjo  $f_{cd} = 2,0 \text{ kN/cm}^2$  (Preglednica 5). Če je popolnoma enak krožni prečni prerez obremenjen z 10x večjo tlačno osno silo, se upogibna odpornost enako armiranega krožnega prečnega prereza pri uporabi betona trdnostnega razreda C 90/105 poveča za 21,6% glede na beton trdnostnega razreda C 30/37 (Preglednica 6).

Preglednica 5: Maksimalne upogibne odpornosti krožnega prereza s tlačno osno silo -1000 kN v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

	<b>Beton:</b> $\phi = 1,50 \text{ m}$ ; $A_c = 1,767 \text{ m}^2$
	<b>Armatura – S 400 (brez utrditve):</b> $A_s = 264,92 \text{ cm}^2$ ; $a_s = 0,008 \text{ m}$ ( $\mu_s = 0,015$ )
	<b>Dodatni pogoji:</b> $\varepsilon_s \leq 20 \text{ prom.}$ ;

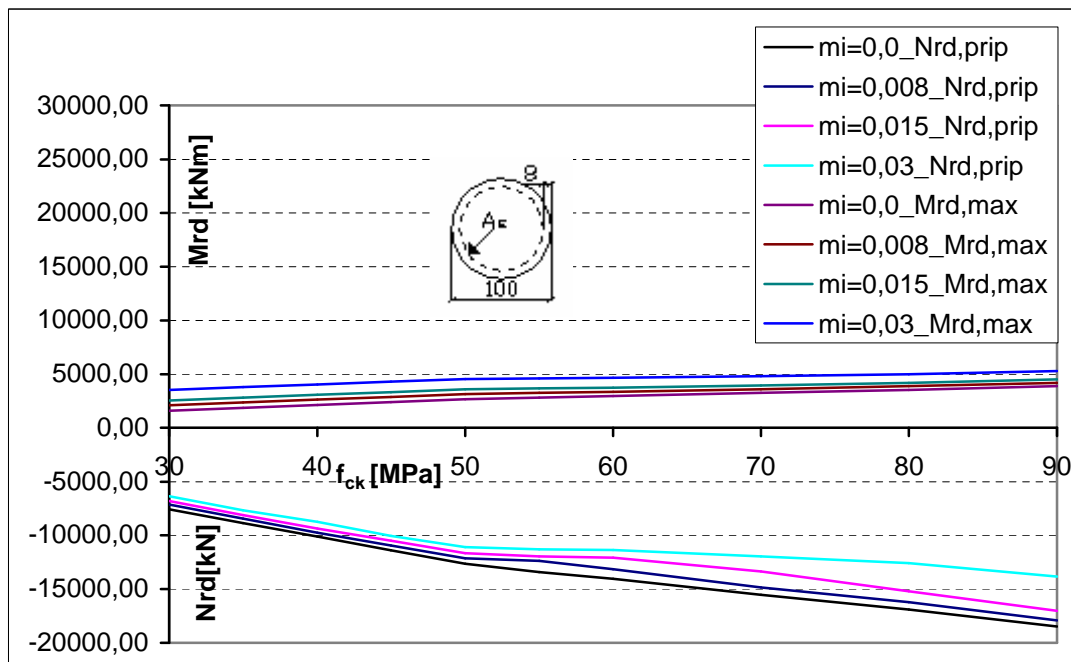
Beton	$M_{rd,max}$ $N_{rd} = -1000 \text{ kN}$ [kNm]	$M_{rd,ci}/M_{rd,C30/37}$ [-]	$\varepsilon_{c,min}$ [prom.]	$\varepsilon_{s,max}$ [prom.]	x [m]
C 30/37	5795,70	1,000	-3,500	10,295	0,360
C 35/45	5902,61	1,018	-3,500	11,272	0,336
C 40/50	5992,63	1,034	-3,500	12,200	0,317
C 45/55	6070,00	1,047	-3,500	13,088	0,300
C 50/60	6137,66	1,059	-3,500	13,929	0,285
C 55/67	6149,44	1,061	-3,100	12,134	0,289
C 60/70	6164,66	1,064	-2,900	11,331	0,289
C 70/85	6204,65	1,071	-2,700	10,795	0,284
C 80/95	6245,55	1,078	-2,600	10,756	0,276
C 90/105	6301,67	1,087	-2,600	11,327	0,265

Preglednica 5: Maksimalne upogibne odpornosti krožnega prereza s tlačno osno silo -10000 kN v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

	<b>Beton:</b> $\phi = 1,50 \text{ m}$ ; $A_c = 1,767 \text{ m}^2$
	<b>Armatura – S 400 (brez utrditve):</b> $A_s = 264,92 \text{ cm}^2$ ; $a_s = 0,008 \text{ m}$ ( $\mu_s = 0,015$ )
	<b>Dodatni pogoji:</b> $\varepsilon_s \leq 20 \text{ prom.}$ ;

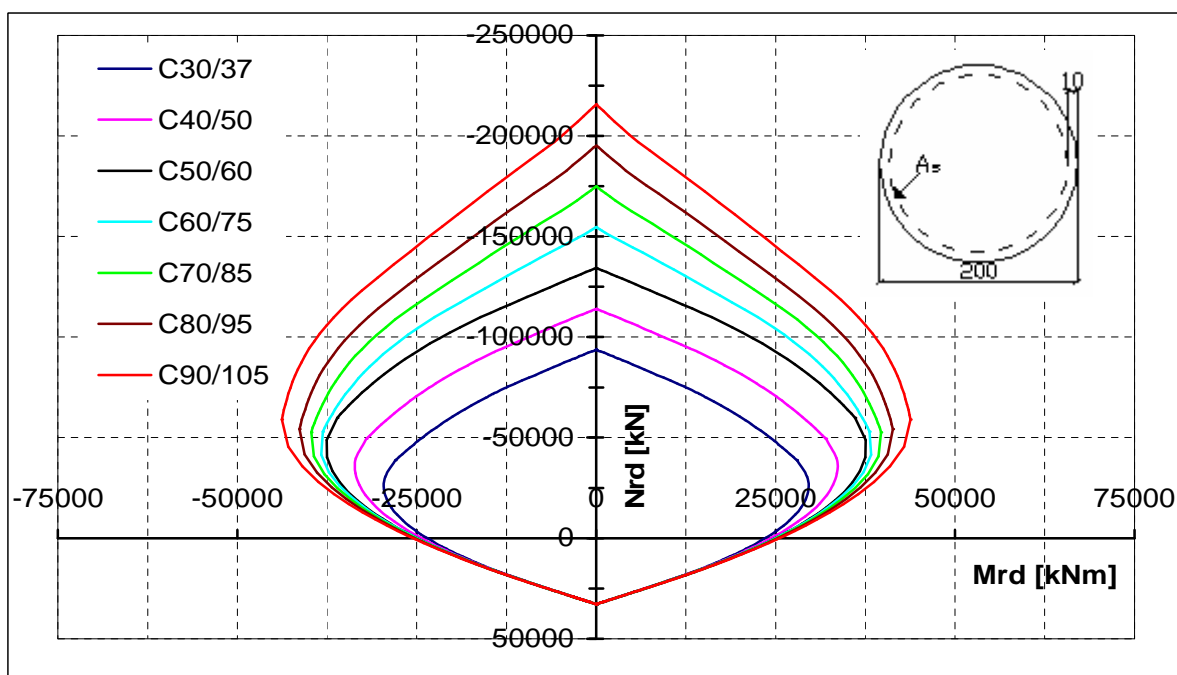
Beton	$M_{rd,max}$ $N_{rd} = -10000 \text{ kN}$ [kNm]	$M_{rd,ci}/M_{rd,C30/37}$ [-]	$\varepsilon_{c,min}$ [prom.]	$\varepsilon_{s,max}$ [prom.]	x [m]
C 30/37	8408,54	1,000	-3,500	4,137	0,651
C 35/45	8845,85	1,052	-3,500	4,786	0,600
C 40/50	9202,76	1,094	-3,500	5,405	0,558
C 45/55	9501,97	1,078	-3,500	5,998	0,523
C 50/60	9757,21	1,130	-3,500	6,568	0,494
C 55/67	9827,64	1,169	-3,100	5,706	0,500
C 60/70	9899,03	1,177	-2,900	5,341	0,500
C 70/85	10063,01	1,197	-2,700	5,158	0,488
C 80/95	10221,74	1,216	-2,600	5,222	0,472
C 90/105	10420,20	1,239	-2,600	5,612	0,450

Opazimo lahko tudi, da se s povečevanjem količine armature maksimalna upogibna odpornost krožnega prečnega prereza sicer povečuje, medtem ko se pripadajoča osna tlačna odpornost prereza zmanjšuje. Upogibna odpornost se manj povečuje pri betonih s tlačnimi trdnostmi, višjimi od 50 MPa, ne glede na količino armature. Z višanjem tlačne trdnosti betona prispevek k tlačni odpornosti prereza hitreje narašča kot prispevek k upogibni odpornosti prereza pri vseh količinah armature (Slika 33).

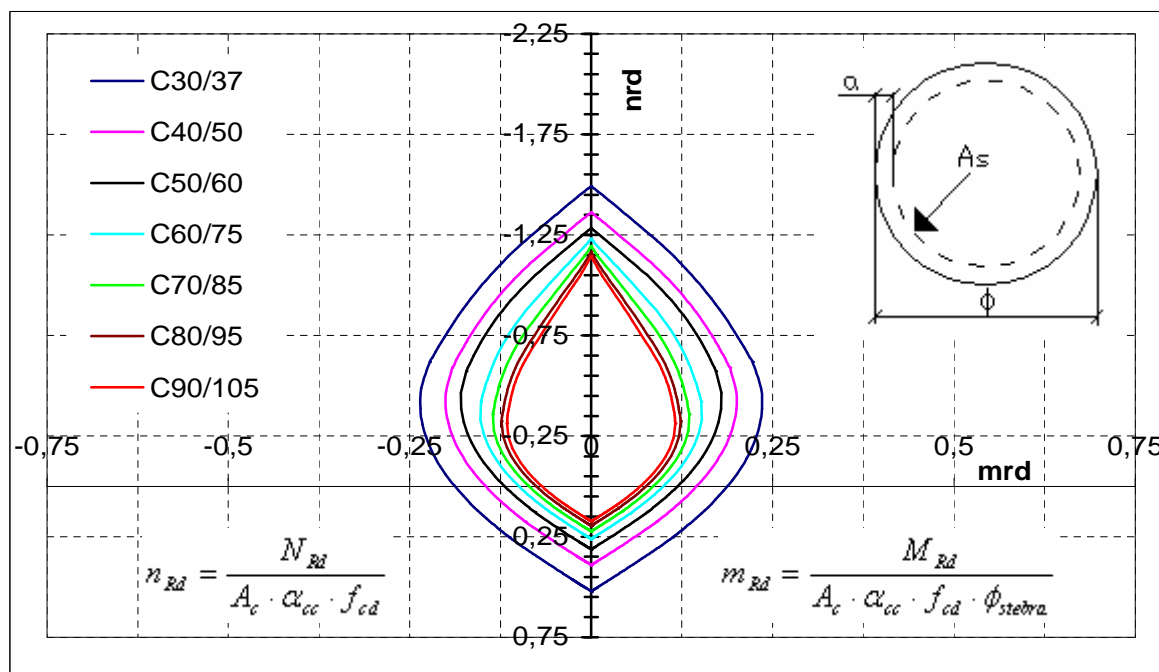


Slika 33: Maksimalne upogibne odpornosti in pripadajoče tlačne odpornosti krožnih prečnih prerezov s premerom  $\phi = 1.0$  m in z različnimi količniki armiranja  $\mu$  v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

Ob isti količini armature v vseh prerezih se z višanjem tlačne trdnosti betona najbolj poveča maksimalna tlačna osna odpornost in manj maksimalna upogibna odpornost. Maksimalna upogibna odpornost nesorazmerno narašča z višanjem tlačne trdnosti betona, in sicer čedalje bolj počasi. Maksimalna natezna osna odpornost se po pričakovanju ne spremeni (Slika 34).



Slika 34: Interakcijski diagrami odpornosti krožnih prečnih prerezov (absolutne vrednosti) z enakimi stopnjami armiranja  $\mu = 0,03$  pri različnih tlačnih trdnostih betona



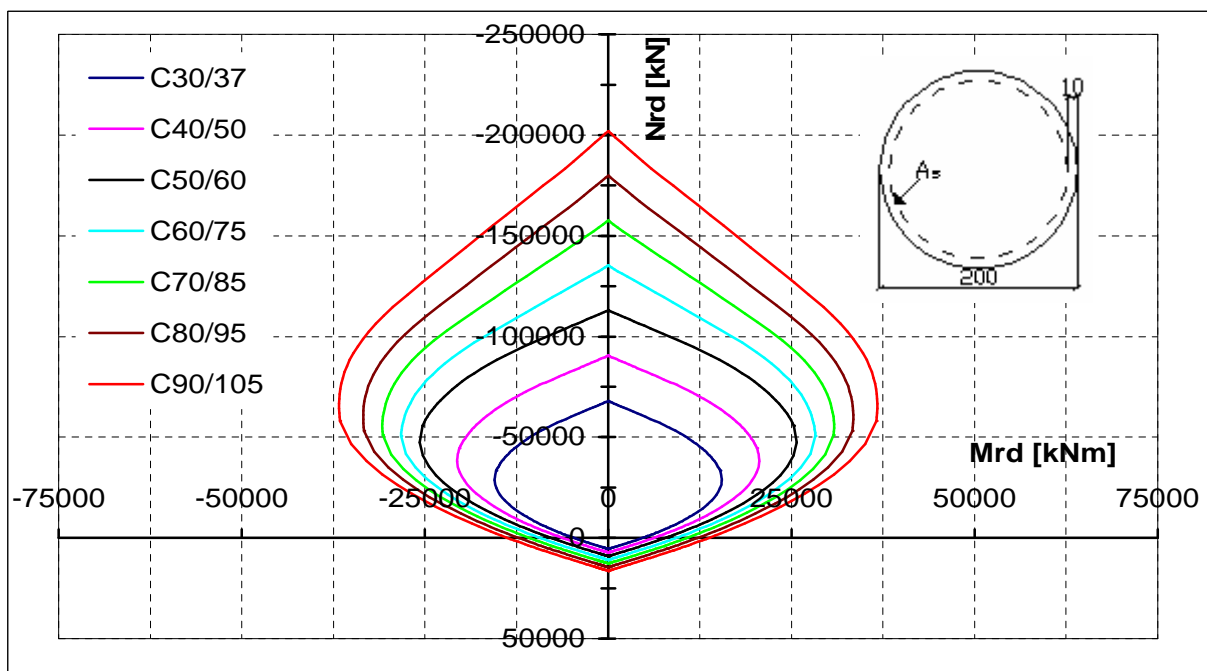
Slika 35: Normirani interakcijski diagrami odpornosti (brezdimenzionalni koeficienti) krožnih prečnih prerezov z enakimi stopnjami armiranja  $\mu = 0,03$  pri različnih tlačnih trdnostih betona

Na diagramih Slike 35 je ravno tako konstantna količina armature, vendar sta vrednosti osne in upogibne odpornosti brezdimezionalni in računani z izrazoma:

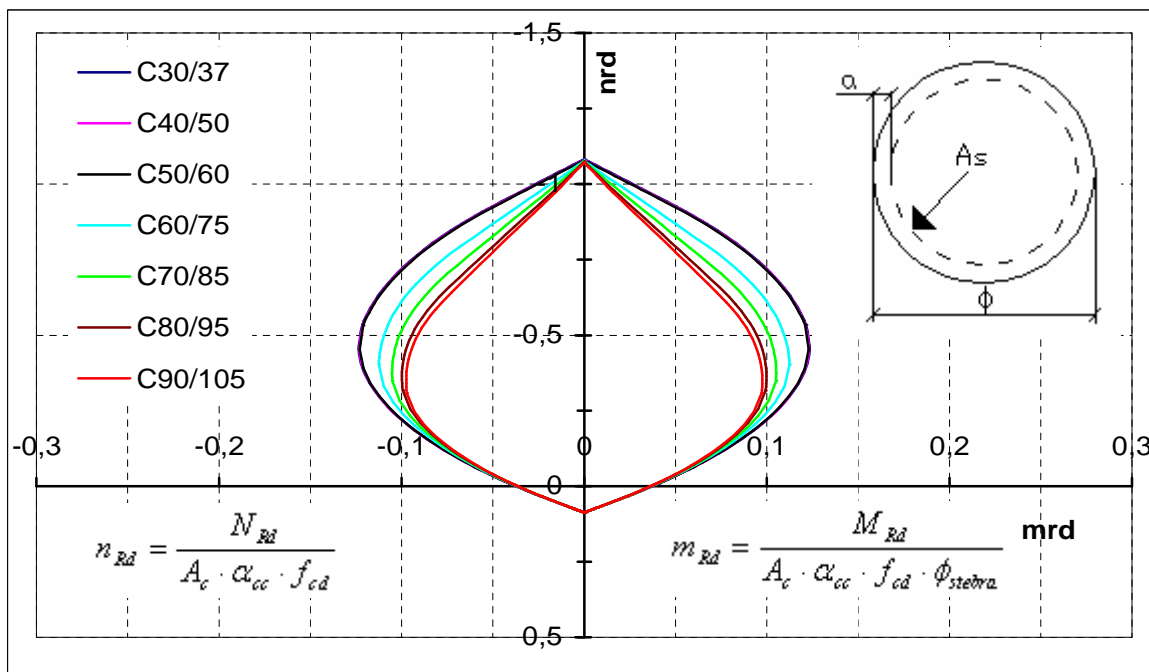
$$n_{Rd} = \frac{N_{Rd}}{A_c \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd}} \quad (63)$$

$$m_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{A_c \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd} \cdot \phi_{stebra}} \quad (64)$$

Območje brezdimezionalne odpornosti prerezov iz betonov višje tlačne trdnosti je potem manjše, saj je količina armature, ki jo uporabimo enaka, čeprav normirano z višjo tlačno trdnostjo betona.



Slika 36: Interakcijski diagrami odpornosti krožnih prečnih prevez (absolutne vrednosti) z enakimi mehanskimi stopnjami armiranja  $\mu_0 = 0,087$  pri različnih tlačnih trdnostih betona



Slika 37: Normirani interakcijski diagrami odpornosti krožnih prečnih prevezov z enakimi mehanskimi stopnjami armiranja  $\mu_0 = 0,087$  pri različnih tlačnih trdnostih betona

Diagrami na Sliki 37 so diagrami krožnih prečnih prevezov z enakimi mehanskimi stopnjami armiranja  $\mu_0$  in so samo normirane vrednosti diagramov s Slike 36, in sicer po izrazih (63) in (64).

V primeru enake mehanske stopnje, je količina armature v betonu z nižjo tlačno trdnostjo manjša, saj je mehanska stopnja

$$\mu_{0i} = \mu_i \times \frac{f_{yd}}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,i}} = \frac{A_s}{A_c} \cdot \frac{f_{yd}}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,i}} = konst. \quad (65)$$

Ker je torej uporabljena enaka vrsta armature, velja

$$\mu_{01} = \mu_{02} \Rightarrow \frac{\mu_1}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,1}} = \frac{\mu_2}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,2}} \rightarrow \mu_1 = \mu_2 \times \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,1}}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,2}} \quad (66)$$

Poglejmo si primer vrednosti koeficienta  $n_{Rd}$  (pri  $m_{Rd}=0$ ). Če je mehanska stopnja konstantna in je tlačna trdnost uporabljenega betona višja, mora biti tudi višja dejanska količina uporabljene armature, če je vrsta armature enaka in betonski prerez enako velik:

$$\mu_{0i} = \frac{A_s}{A_c} \cdot \frac{f_{yd}}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,i}} = konst.1 \Rightarrow konst.2 = \frac{A_s}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd,i}} \Rightarrow A_s = konst.2 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd,i} \quad (67)$$

Zaradi tega je višja vrednost osne odpornosti  $N_{Rd}$ . Ko osno odpornost  $N_{Rd}$  delimo s  $A_a \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd,i}$ , dobimo vrednost  $n_{Rd}$ :

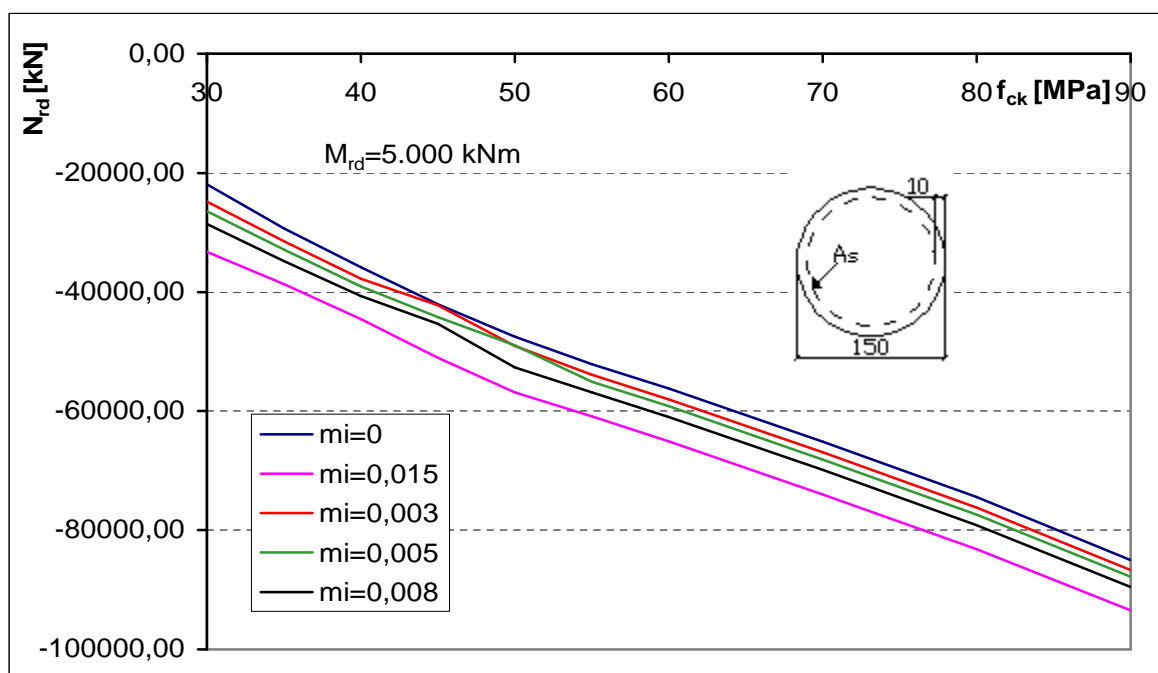
$$n_{Rd} = \frac{N_{Rd}}{A_c \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd}} = \frac{A_c \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd}} = 1 + \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd}} = 1 + \mu_0 = konst. \quad (68)$$

V območju, ko gre  $M_{rd} \rightarrow 0$ , dobimo drugačne oblike diagramov betonov, ki imajo tlačne trdnosti višje od 50MPa. To se zgodi najverjetneje zaradi prirejenih koeficientov pri konstitutivnih zakonih betonov višjih trdnosti:

$$0 \geq \varepsilon_i \geq \varepsilon_{c2} \Rightarrow \sigma_c = -\alpha_{cc} \times f_{cd} \times \left( 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right) \quad (69)$$

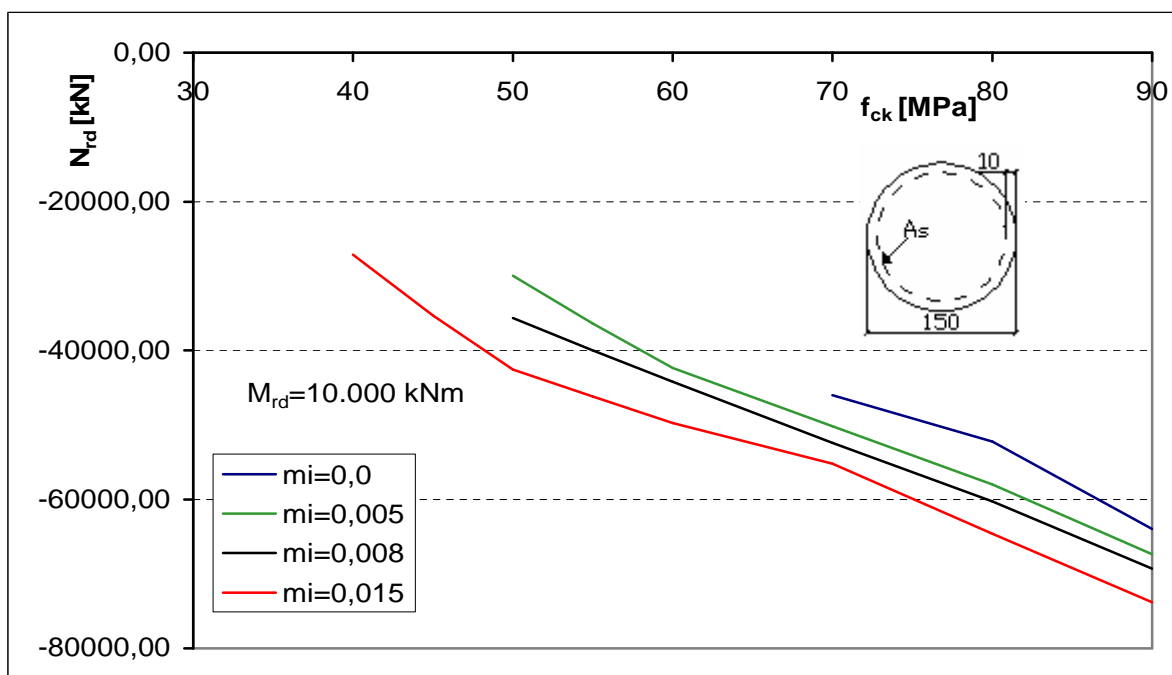
Z višanjem tlačne trdnosti betonov se povečuje deformacija pri največji napetosti in znižuje koeficient n.

Stebri, obremenjeni z določenim upogibnim momentom, v skladu s pričakovanji prenesejo večjo osno tlačno obremenitev, če je v stebru več armature (Slika 38).



Slika 38: Osna tlačna odpornost stebra krožnega prereza s premerom  $\phi = 1.5\text{m}$  pri upogibnem momentu 5000 kNm in različni količini armature

Stebri iz betona višje tlačne trdnosti, so kljub manjši količini armature sposobni prevzeti določene upogibne obremenitve. Krožni prerezi (stebrov) iz betonov nižje tlačne trdnosti pa niso sposobni prevzeti večjih upogibnih momentov, kljub večji količine armature (Slika 39).

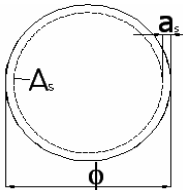


Slika 39: Osna tlačna odpornost stebra krožnega prereza s premerom  $\phi = 1.5\text{ m}$  pri upogibnem momentu 10000 kNm in različni količini armature

Steber, ki je obremenjen z večjim momentom, prenese manjšo osno obremenitev. Če je steber obremenjen z upogibnim momentom 2000 kNm in armiran z minimalno armaturo ( $\mu_s = 0,003$ ), je njegova osna tlačna odpornost trikrat višja če uporabimo beton trdnostnega razreda C90/105 s projektno tlačno trdnostjo  $f_{cd} = 6,0\text{ kN/cm}^2$  kot če uporabimo beton trdnostnega razreda C 30/37 s projektno tlačno trdnostjo  $f_{cd} = 2,0\text{ kN/cm}^2$  (Preglednica 7), saj je toliko višja tudi tlačna trdnost betona. Če uporabimo večjo količino armature, je ta razlika v tlačnih odpornostih prerezov z različnimi tlačnimi trdnostmi betonov že malo nižja – višja za 283,5% (Preglednica 8). Nekateri prerezi z premajhno tlačno trdnostjo betona sploh ne morejo prenesti upogibne obremenitve (Preglednica 9, Preglednica 10)

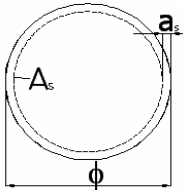


Preglednica 7: Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu=0,003$ ) pri upogibni obremenitvi 2000kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

	<b>Beton:</b> $\phi = 1,50 \text{ m}$ ; $A_c = 1,767 \text{ m}^2$				
	<b>Armatura – S 400 (brez utrditve):</b> $A_s = 53,10 \text{ cm}^2$ ; $a_s = 0,01 \text{ m}$ ( $\mu_s = 0,003$ ) <b>Dodatni pogoji:</b> $\epsilon_s \leq 20 \text{ prom.}$ ;				

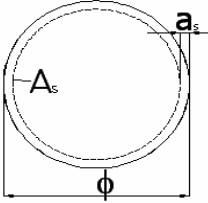
Beton	$N_{rd,min}$ $M_{rd}=2000\text{kNm}[\text{kN}]$	$N_{rd,ci}/N_{rd,C30/37}$ [-]	$\epsilon_{c,min}$ [prom.]	$\epsilon_{s,max}$ [prom.]	X [m]
C 30/37	-32893,96	1,000	-3,265	-0,313	1,500
C 35/45	-38761,66	1,178	-3,178	-0,430	1,500
C 40/50	-44629,69	1,357	-3,106	-0,525	1,500
C 45/55	-50497,94	1,535	-3,046	-0,605	1,500
C 50/60	-56366,37	1,714	-2,996	-0,673	1,500
C 55/67	-61425,25	1,867	-2,678	-1,032	1,500
C 60/70	-66561,26	2,024	-2,574	-1,251	1,500
C 70/85	-77124,92	2,345	-2,512	-1,501	1,500
C 80/95	-87848,35	2,671	-2,533	-1,663	1,500
C 90/105	-99088,53	3,012	-2,600	-1,790	1,500

Preglednica 8: Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu= 0,008$ ) pri upogibni obremenitvi 2000 kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

	<b>Beton:</b> $\phi = 1,50 \text{ m}$ ; $A_c = 1,767 \text{ m}^2$				
	<b>Armatura – S 400 (brez utrditve):</b> $A_s = 141,60 \text{ cm}^2$ ; $a_s = 0,01 \text{ m}$ ( $\mu_s = 0,008$ ) <b>Dodatni pogoji:</b> $\epsilon_s \leq 20 \text{ prom.}$ ;				

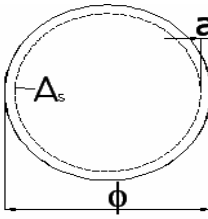
Beton	$N_{rd,min}$ $M_{rd} = 2000 \text{ kNm}$ [kN]	$N_{rd,ci}/N_{rd,C30/37}$ [-]	$\epsilon_{c,min}$ [prom.]	$\epsilon_{s,max}$ [prom.]	X [m]
C 30/37	-35838,32	1	-3,163	-0,450	1,500
C 35/45	-41674,98	1,163	-3,091	-0,546	1,500
C 40/50	-47512,21	1,326	-3,031	-0,625	1,500
C 45/55	-53349,47	1,489	-2,981	-0,692	1,500
C 50/60	-59187,01	1,652	-2,938	-0,750	1,500
C 55/67	-64262,43	1,793	-2,659	-1,078	1,500
C 60/70	-69370,36	1,936	-2,567	-1,277	1,500
C 70/85	-79828,00	2,227	-2,512	-1,506	1,500
C 80/95	-90435,52	2,523	-2,534	-1,659	1,500
C 90/105	-101610,38	2,835	-2,600	-1,785	1,500

Preglednica 9: Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu=0,003$ ) pri upogibni obremenitvi 10000kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

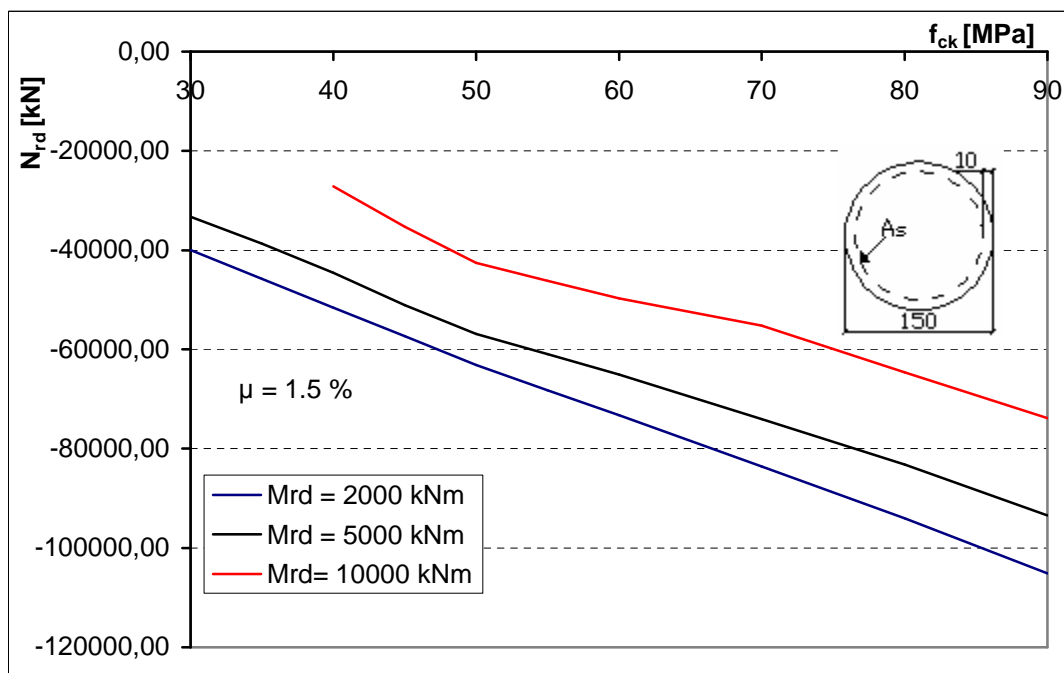
	<b>Beton: <math>\phi = 1,50 \text{ m}</math>; <math>A_c = 1,767 \text{ m}^2</math></b>
	<b>Armatura – S 400 (brez utrditve):</b> $A_s = 53,10 \text{ cm}^2$ ; $a_s = 0,01 \text{ m}$ ( $\mu_s = 0,003$ ) <b>Dodatni pogoji:</b> $\varepsilon_s \leq 20 \text{ prom.}$ ;

Beton	$N_{rd,min}$ $M_{rd} = 10000$ kNm[kN]	$N_{rd,ci}/N_{rd,C70/85}$ [-]	$\varepsilon_{c,min}$ [prom.]	$\varepsilon_{s,max}$ [prom.]	X [m]
C 30/37	----	----	----	----	----
C 35/45	----	----	----	----	----
C 40/50	----	----	----	----	----
C 45/55	----	----	----	----	----
C 50/60	----	----	----	----	----
C 55/67	----	----	----	----	----
C 60/70	----	----	----	----	----
C 70/85	<b>-46009,59</b>	<b>1</b>	-2,700	0,230	1,290
C 80/95	<b>-53658,05</b>	1,166	-2,600	0,000	1,400
C 90/105	<b>-64025,87</b>	1,392	-2,600	-0,050	1,500

Preglednica 10: Maksimalne tlačne osne odpornosti prereza ( $\mu=0,008$ ) pri upogibni obremenitvi 10000 kNm v odvisnosti od tlačne trdnosti betona

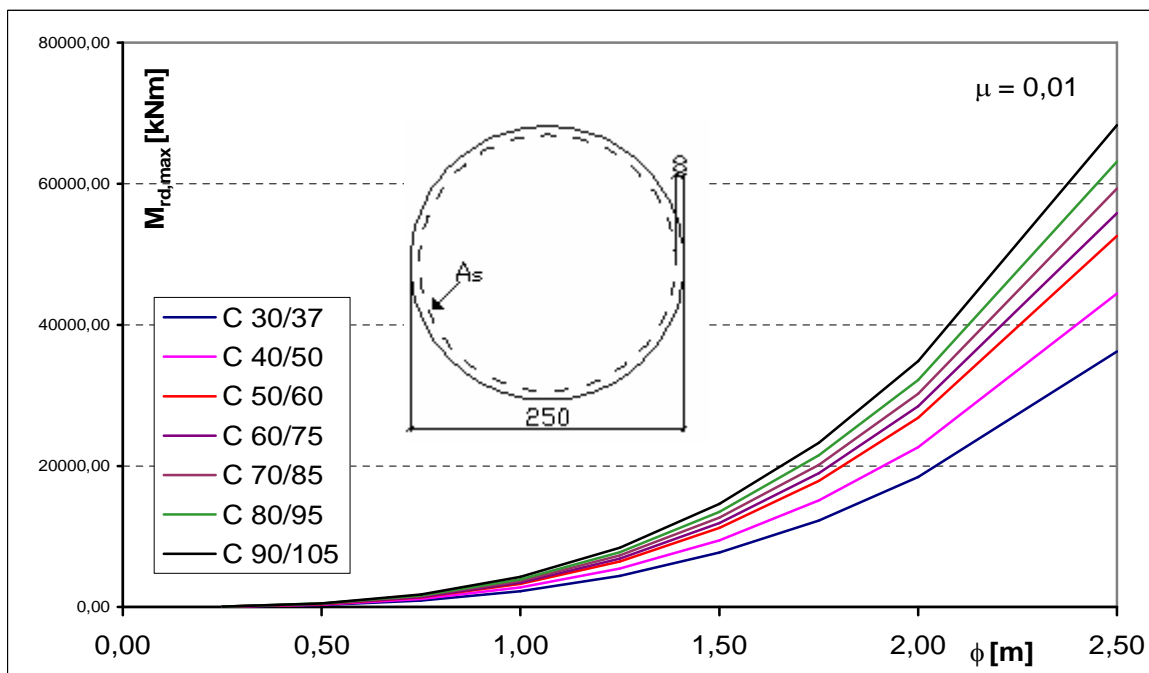
	<b>Beton: <math>\phi = 1,50 \text{ m}</math>; <math>A_c = 1,767 \text{ m}^2</math></b>
	<b>Armatura – S 400 (brez utrditve):</b> $A_s = 141,60 \text{ cm}^2$ ; $a_s = 0,01 \text{ m}$ ( $\mu_s = 0,008$ ) <b>Dodatni pogoji:</b> $\varepsilon_s \leq 20 \text{ prom.}$ ;

Beton	$N_{rd,min}$ $M_{rd} = 10000$ kNm [kN]	$N_{rd,ci}/N_{rd,C50/60}$ [-]	$\varepsilon_{c,min}$ [prom.]	$\varepsilon_{s,max}$ [prom.]	X [m]
C 30/37	----	----	----	----	----
C 35/45	----	----	----	----	----
C 40/50	----	----	----	----	----
C 45/55	----	----	----	----	----
C 50/60	<b>-35615,49</b>	<b>1</b>	-3,500	1,195	1,044
C 55/67	<b>-40006,98</b>	1,123	-3,100	0,665	1,153
C 60/70	<b>-44186,51</b>	1,241	-2,900	0,363	1,244
C 70/85	<b>-52420,09</b>	1,472	-2,700	0,024	1,388
C 80/95	<b>-60280,00</b>	1,693	-2,600	0,000	1,500
C 90/105	<b>-69315,49</b>	1,946	-2,600	-0,156	1,500

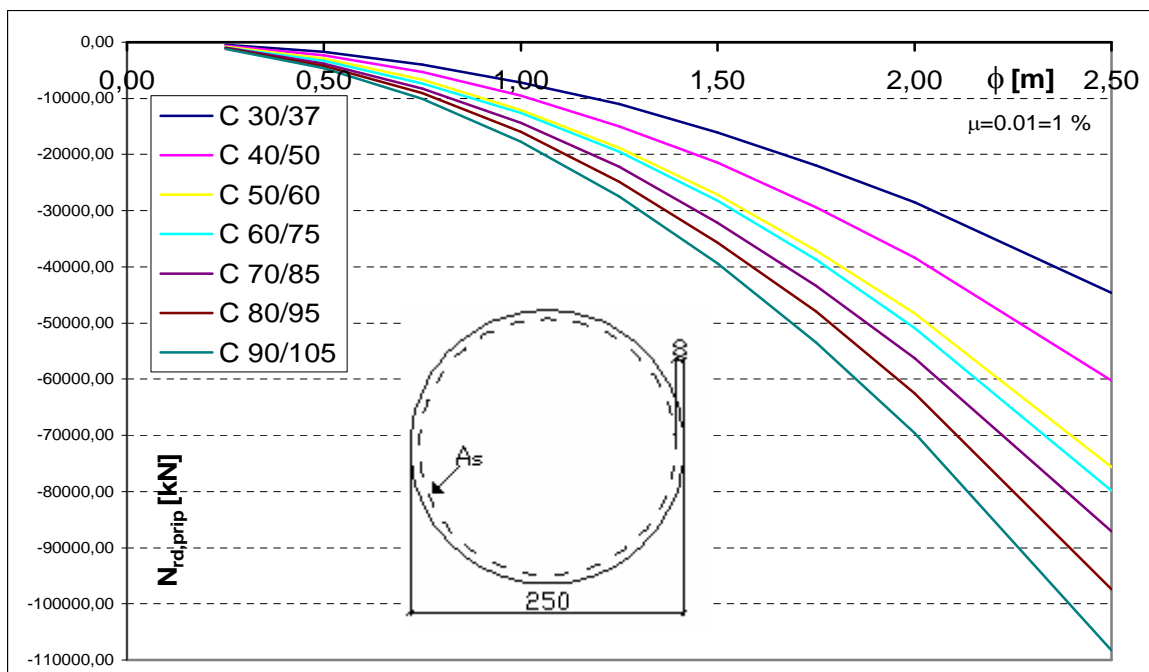


Slika 40: Osnna tlačna odpornost krožnega prečnega prereza stebra s premerom  $\phi = 1.5$  m in količnikom armiranja  $\mu = 0,015$  pri različnih upogibnih obremenitvah

Iz naslednjih grafov se vidi, da so razlike med upogibnimi in osnimi odpornostmi betonov do tlačne trdnosti 50 MPa večje kot razlike med odpornostmi betonov višje tlačne trdnosti. Razberemo pa lahko hkrati, da je potreben premer krožnega prečnega prereza elementa iz betona C 90/105, ki je obremenjen z upogibnim momentom npr. 20000 kNm, približno 1,7 m. Če je tako obremenjen gradbeni element iz betona C 30/37, je potreben premer krožnega prečnega prereza približno 2,1 m. Vendar je ob tem drugačna tudi tlačna osna odpornost krožnega prečnega prereza, in sicer je pri krožnem prečnem prerezu s premerom 1,7 m iz betona trdnostnega razreda C 90/105 -470.000 kN, pri krožnem prečnem prerezu s premerom 2,1 m iz betona trdnostnega razreda C 30/37 pa je osna tlačna odpornost -310.000 kN. Torej je premer krožnega prečnega prereza še večji, če uporabljamo betone različnih tlačnih trdnosti in želimo doseči enako tlačno osno odpornost gradbenega elementa krožnega prečnega prereza. Da dosežemo npr. osno tlačno odpornost -400.000 kN, moramo pri uporabi betona trdnostnega razreda C 90/105 narediti element s krožnim prečnim prerezom 1,5 m, pri uporabi betona trdnostnega razreda C 30/37 pa element s krožnim prečnim prerezom približno 2,35-2,40m. V slednjem primeru je višja pripadajoča upogibna odpornost elementa.



Slika 41: Upogibne odpornosti krožnega prečnega prereza s količnikom armiranja  $\mu = 0,01$  pri različnih tlačnih trdnostih betona



Slika 42: Maksimalnemu upogibnemu momentu pripadajoče osne tlačne odpornosti krožnega prečnega prereza s količnikom  $\mu = 0,01$  pri različnih tlačnih trdnostih betona

## 5.2 Ekonomska ocena

Daljša doba služenja, nižji stroški vzdrževanja in manj popravil bi lahko pomenilo nižjo skupno ceno skozi celotni življenjski cikel konstrukcije iz betona visoke trdnosti kot če uporabimo beton običajne trdnosti [*Susan C. McCraven, 30.09.2006*]. Vendar so začetni stroški za tak beton običajno višji, odvisno od materialov, velikosti projekta in pogajanja med dobaviteljem betona in izvajalcem.

### 5.2.1 Ekonomska ocena mešanic

Pri svoji ekonomski oceni začetnih stroškov za materiale sem ocenila razliko v ceni enote betona običajne trdnosti in betona visoke trdnosti. Upoštevala sem cene cementov, ki jih kupi betonarna SCT-ja v Črnučah od Salonita Anhovo in cene agregata, ki jih ta betonarna dobi iz kamnoloma Kresnic. Cene dodatkov iz TKK Srpenica, sem znižala za 10%, kolikor so sami rekli, da ponujajo popusta v velikoprodaji.

Cementi Salonit Anhovega:

- Portlandski mešani cement z najmanj dvema mineralnima dodatkoma (M), trdnostnega razreda 42,5 in običajnih zgodnjih trdnosti (N) - CEM II/B-M 42,5 N → 18.700,00 SIT/t oziroma 78,04 €/t
- Specialni cement 42,5 je portlandski cement z dodatkom žindre (S), trdnostnega razreda 42,5, z visoko zgodnjo trdnostjo - CEM II/A-S 42,5R → 21.900,00 SIT/t oziroma 91,39 €/t

Superplastifikatorji TKK Srpenice:

- Superplastifikator Cementol ETA-S – namenjen je za uvajanje zračnih mehurčkov v svež beton, uporabljajo ga predvsem pri izdelavi vseh betonskih objektov in prefabrikatov, ki so izpostavljeni delovanju mraza,

soli ipd. (cestišča, letališke piste, mostovi, jezovi, kanali, pločniki, robniki, strešniki itd.) → 0,95 €/kg (cena za betonarne)

- Superplastifikator Cementol Zeta Super S → 1,88 €/kg (maloprodajna cena) oziroma 1,60 €/kg (količinski popust 15%)

-

Drugi dodatki TKK Srpenice:

- TKK Mikrosilika → 0,90 €/kg (maloprodajna cena) oziroma 0,765 €/kg (količinski popust 15%)
- Antikorodin (mešanica superplastifikatorja naftalenskega tipa v suhem stanju in mikrosilike) → 1,14 €/kg (maloprodajna cena) oziroma 0,97€/kg (količinski popust 15%).

-

Agregat iz Kresnic:

- frakcija 0-4 → 1.904,00 SIT/m<sup>3</sup> oziroma 7,95 €/m<sup>3</sup>
- frakcija 4-8 → 1.643,24 SIT/m<sup>3</sup> oziroma 6,86 €/m<sup>3</sup>
- frakcija 8-16 → 1.654,00 SIT/m<sup>3</sup> oziroma 6,90 €/m<sup>3</sup>
- frakcija 16-32 → 1.632,07 SIT/m<sup>3</sup> oziroma 6,81 €/m<sup>3</sup>

Mivka:

- IGM Zagorje → 3.255,00 SIT/m<sup>3</sup> oziroma 13,58 €/m<sup>3</sup>

Cene prostorninske enote različnih betonskih mešanic sem lahko določila le glede na ceno sestavin. Glede na obratovalne stroške bi lahko pričakovali tudi določene razlike, vendar so mi v SCT-jevi betonarni v Črnučah zatrdili, da razlike v proizvodni stroških betona ni pri različnih trdnostih betona. Na ekonomičnost proizvodnje betona vpliva tudi to ali imajo izdelavo betona visoke trdnosti že utečeno ali je potrebno še marsikaj pripraviti in prirediti glede na proizvodnjo betona običajne trdnosti.

Preglednica 11: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice A betona visoke trdnosti ( $f_{cm} = 76,7 \text{ MPa} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 68,7 \text{ MPa}$ ) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti

SESTAVINE	BETON OBIČAJNE TRDNOSTI $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$				BETON VISOKE TRDNOSTI $f_{cm}^* = f_{cm} = 76,7 \text{ MPa}, f_{ck} = 68,7 \text{ MPa}$			
	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3 \text{ bet.}$	CENA / $\text{m}^3 \text{ BET.}$	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3 \text{ bet.}$	CENA / $\text{m}^3 \text{ BET.}$
<b>Cement</b>	CEM II/ B-M 42,5N	78,04 €/t	330 kg	25,75€	CEM II/ A-S 42,5R	91,39 €/t	475 kg	43,41€
<b>Mivka</b>	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,611m <sup>3</sup>	8,302€	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,103m <sup>3</sup>	1,40 €
<b>Agregat 0-4</b>	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,245m <sup>3</sup>	1,944€	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,297m <sup>3</sup>	2,365€
<b>Agregat 4-8</b>	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,045m <sup>3</sup>	0,309€	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,094m <sup>3</sup>	0,65 €
<b>Agregat 8-16</b>	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,121m <sup>3</sup>	0,835€	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,156m <sup>3</sup>	1,078€
<b>Agregat 16-31</b>	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,211m <sup>3</sup>	1,437€	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,0 m <sup>3</sup>	0,0€
<b>Superplas.</b>			————	————	Cementol Zeta Super S	1,60 €/kg	10,25 kg	16,4 €
<b>Mikrosilika</b>			————	————	TKK Mikrosilika	0,765 €/kg	25,0 kg	19,13€
<b>SKUPAJ</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>38,58 €</b>		<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>84,43 €</b>	

razmerje tlačnih trdnosti:

$$\frac{f_{ck, \text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{f_{ck, \text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{68,7 \text{ MPa}}{25 \text{ MPa}} = 2,75 \quad (70)$$

razmerje cen m<sup>3</sup> betona:

$$\frac{cena_{\text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{cena_{\text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{84,43}{38,58} = 2,19 \quad (71)$$

Preglednica 12: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice B betona visoke trdnosti ( $f_{cm} = 81,4 \text{ MPa} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 73,4 \text{ MPa}$ ) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti

SESTAVINE	BETON OBIČAJNE TRDNOSTI $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$				BETON VISOKE TRDNOSTI $f_{cm}^* = f_{cm} = 81,4 \text{ MPa}, f_{ck} = 73,4 \text{ MPa}$			
	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3 \text{ bet.}$	CENA / $\text{m}^3 \text{ BET.}$	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3 \text{ bet.}$	CENA / $\text{m}^3 \text{ BET.}$
<b>Cement</b>	CEM II/ B-M 42,5N	78,04 €/t	330 kg	25,75€	CEM II/ A-S 42,5R	91,39 €/t	360 kg	32,9 €
<b>Mivka</b>	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,611m <sup>3</sup>	8,302€	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,107m <sup>3</sup>	1,452€
<b>Agregat 0-4</b>	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,245m <sup>3</sup>	1,944€	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,321m <sup>3</sup>	2,549€
<b>Agregat 4-8</b>	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,045m <sup>3</sup>	0,309€	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,101m <sup>3</sup>	0,694€
<b>Agregat 8-16</b>	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,121m <sup>3</sup>	0,835€	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,169m <sup>3</sup>	1,163€
<b>Agregat 16-31</b>	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,211m <sup>3</sup>	1,437€	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,0 m <sup>3</sup>	0,0 €
<b>Superplas.</b>			————	————	Cementol Zeta Super S	1,60 €/kg	8,20 kg	13,12€
<b>Mikrosilika</b>			————	————	TKK Mikrosilika	0,765 €/kg	40,0 kg	30,6 €
<b>SKUPAJ</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>			<b>38,58 €</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>			<b>82,48 €</b>

razmerje tlačnih trdnosti:

$$\frac{f_{ck, \text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{f_{ck, \text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{73,4 \text{ MPa}}{25 \text{ MPa}} = 2,94 \quad (72)$$

razmerje cen m<sup>3</sup> betona:

$$\frac{cena_{\text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{cena_{\text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{82,48}{38,58} = 2,14 \quad (73)$$



Preglednica 13: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice C betona visoke trdnosti ( $f_{cm} = 48,4 \text{ MPa} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 40,4 \text{ MPa}$ ) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti

SESTAVINE	BETON OBIČAJNE TRDNOSTI $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$				BETON VISOKE TRDNOSTI $f_{cm}^* = f_{cm} = 48,4 \text{ MPa}, f_{ck} = 40,4 \text{ MPa}$			
	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3$ bet.	CENA / $\text{m}^3$ BET.	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3$ bet.	CENA / $\text{m}^3$ BET.
<b>Cement</b>	CEM II/ B-M 42,5N	78,04 €/t	330 kg	25,75€	CEM II/ A-S 42,5R	91,39 €/t	400 kg	32,9 €
<b>Mivka</b>	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,611m <sup>3</sup>	8,302€	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,099m <sup>3</sup>	1,452€
<b>Agregat 0-4</b>	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,245m <sup>3</sup>	1,944€	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,298m <sup>3</sup>	2,549€
<b>Agregat 4-8</b>	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,045m <sup>3</sup>	0,309€	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,094m <sup>3</sup>	0,694€
<b>Agregat 8-16</b>	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,121m <sup>3</sup>	0,835€	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,157m <sup>3</sup>	1,08 €
<b>Agregat 16-31</b>	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,211m <sup>3</sup>	1,437€	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,0 m <sup>3</sup>	0,0 €
<b>Superplas.</b>			_____	_____	Cementol Zeta Super S	1,60 €/kg	0,0 kg	0,0 €
<b>Mikrosilika</b>			_____	_____	TKK Mikrosilika	0,765 €/kg	0,0 kg	0,0 €
<b>SKUPAJ</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>			<b>38,58 €</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>			<b>42,00 €</b>

razmerje tlačnih trdnosti:

$$\frac{f_{ck, \text{beton\_višje\_trdnosti}}}{f_{ck, \text{beton\_nižje\_trdnosti}}} = \frac{40,4 \text{ MPa}}{25 \text{ MPa}} = 1,62 \quad (74)$$

razmerje cen m<sup>3</sup> betona:

$$\frac{cena_{\text{beton\_višje\_trdnosti}}}{cena_{\text{beton\_nižje\_trdnosti}}} = \frac{42,00}{38,58} = 1,081 \quad (75)$$

Preglednica 14: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice D betona visoke trdnosti ( $f_{cm} = 90,0 \text{ MPa} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 82,0 \text{ MPa}$ ) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti

SESTAVINE	BETON OBIČAJNE TRDNOSTI $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$				BETON VISOKE TRDNOSTI $f_{cm}^* = f_{cm} = 90,0 \text{ MPa}, f_{ck} = 82,0 \text{ MPa}$			
	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3 \text{ bet.}$	CENA / $\text{m}^3 \text{ BET.}$	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3 \text{ bet.}$	CENA / $\text{m}^3 \text{ BET.}$
<b>Cement</b>	CEM II/ B-M 42,5N	78,04 €/t	330 kg	25,75€	CEM II/ A-S 42,5R	91,39 €/t	492 kg	44,96€
<b>Mivka</b>	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,611m <sup>3</sup>	8,302€	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,07 m <sup>3</sup>	0,95 €
<b>Agregat 0-4</b>	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,245m <sup>3</sup>	1,944€	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,214m <sup>3</sup>	1,70 €
<b>Agregat 4-8</b>	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,045m <sup>3</sup>	0,309€	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,14 m <sup>3</sup>	0,96 €
<b>Agregat 8-16</b>	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,121m <sup>3</sup>	0,835€	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,234m <sup>3</sup>	1,61 €
<b>Agregat 16-31</b>	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,211m <sup>3</sup>	1,437€	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,0 m <sup>3</sup>	0,0 €
<b>Superplas.</b>			—————	—————	Cementol Zeta Super S	1,60 €/kg	5,18 kg	8,29 €
<b>Mikrosilika</b>			—————	—————	TKK Mikrosilika	0,765 €/kg	26,0 kg	19,89€
<b>SKUPAJ</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>38,58 €</b>		<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>78,36 €</b>	

razmerje tlačnih trdnosti:

$$\frac{f_{ck, \text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{f_{ck, \text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{82,0 \text{ MPa}}{25 \text{ MPa}} = 3,28 \quad (76)$$

razmerje cen m<sup>3</sup> betona:

$$\frac{cena_{\text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{cena_{\text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{78,36}{38,58} = 2,03 \quad (77)$$

Preglednica 15: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice E betona visoke trdnosti ( $f_{cm} = 100,0 \text{ MPa} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 92,0 \text{ MPa}$ ) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti

SESTAVINE	BETON OBIČAJNE TRDNOSTI $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$				BETON VISOKE TRDNOSTI $f_{cm}^* = f_{cm} = 100 \text{ MPa}, f_{ck} = 92,0 \text{ MPa}$			
	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3$ bet.	CENA / $\text{m}^3$ BET.	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3$ bet.	CENA / $\text{m}^3$ BET.
<b>Cement</b>	CEM II/ B-M 42,5N	78,04 €/t	330 kg	25,75€	CEM II/ A-S 42,5R	91,39 €/t	532,5 kg	48,96€
<b>Mivka</b>	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,611m <sup>3</sup>	8,302€	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,067m <sup>3</sup>	0,91 €
<b>Agregat 0-4</b>	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,245m <sup>3</sup>	1,944€	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,20 m <sup>3</sup>	1,59 €
<b>Agregat 4-8</b>	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,045m <sup>3</sup>	0,309€	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,14 m <sup>3</sup>	0,96 €
<b>Agregat 8-16</b>	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,121m <sup>3</sup>	0,835€	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,234m <sup>3</sup>	1,61 €
<b>Agregat 16-31</b>	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,211m <sup>3</sup>	1,437€	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,0 m <sup>3</sup>	0,0 €
<b>Superplas.</b>			_____	_____	Antikorodin-Mikrosilika + naftalenski superpl.	0,97 €/kg	27,80 kg	26,97€
<b>Mikrosilika</b>			_____	_____				
<b>SKUPAJ</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>38,58 €</b>		<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>81,00 €</b>	

razmerje tlačnih trdnosti:

$$\frac{f_{ck, \text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{f_{ck, \text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{92,0 \text{ MPa}}{25 \text{ MPa}} = 3,68 \quad (78)$$

razmerje cen m<sup>3</sup> betona:

$$\frac{\text{cena}_{\text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{\text{cena}_{\text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{81,0}{38,58} = 2,1 \quad (79)$$

Preglednica 16: Izračun skupne cene materialov za pripravo mešanice F betona visoke trdnosti ( $f_{cm} = 100,0 \text{ MPa} \rightarrow f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} = 92,0 \text{ MPa}$ ) in primerjava le te s skupno ceno materialov za pripravo betona običajne trdnosti

SESTAVINE	BETON OBIČAJNE TRDNOSTI $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$				BETON VISOKE TRDNOSTI $f_{cm}^* = f_{cm} = 100 \text{ MPa}, f_{ck} = 92,0 \text{ MPa}$			
	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3$ bet.	CENA / $\text{m}^3$ BET.	VRSTA	CENA	Kol. v $\text{m}^3$ bet.	CENA / $\text{m}^3$ BET.
<b>Cement</b>	CEM II/ B-M 42,5N	78,04 €/t	330 kg	25,75€	CEM II/ A-S 42,5R	91,39 €/t	419,5 kg	38,34€
<b>Mivka</b>	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,611m <sup>3</sup>	8,302€	Mivka IGM Zagorje	13,58 €/m <sup>3</sup>	0,08 m <sup>3</sup>	1,09 €
<b>Agregat 0-4</b>	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,245m <sup>3</sup>	1,944€	Agregat Kresnice	7,95 €/m <sup>3</sup>	0,25 m <sup>3</sup>	1,99 €
<b>Agregat 4-8</b>	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,045m <sup>3</sup>	0,309€	Agregat Kresnice	6,86 €/m <sup>3</sup>	0,14 m <sup>3</sup>	0,96 €
<b>Agregat 8-16</b>	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,121m <sup>3</sup>	0,835€	Agregat Kresnice	6,90 €/m <sup>3</sup>	0,234m <sup>3</sup>	1,615€
<b>Agregat 16-31</b>	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,211m <sup>3</sup>	1,437€	Agregat Kresnice	6,81 €/m <sup>3</sup>	0,0 m <sup>3</sup>	0,0 €
<b>Superplas.</b>			————	————	Antikorodin- Mikrosilika + naftalenski superpl.	0,97 €/kg	30,10 kg	29,20€
<b>Mikrosilika</b>			————	————				
<b>SKUPAJ</b>	<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>38,58 €</b>		<b>Cena m<sup>3</sup> betona</b>		<b>73,20 €</b>	

razmerje tlačnih trdnosti:

$$\frac{f_{ck, \text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{f_{ck, \text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{92,0 \text{ MPa}}{25 \text{ MPa}} = 3,68 \quad (80)$$

razmerje cen m<sup>3</sup> betona:

$$\frac{cena_{\text{beton}_{\text{višje\_trdnosti}}}}{cena_{\text{beton}_{\text{nižje\_trdnosti}}}} = \frac{73,20}{38,58} = 1,90 \quad (81)$$

V te začetne stroške sodi tudi cena za vgradnjo, kar obsega črpanje betona, cena ure delavca in čas, ki ga porabi za vgradnjo betona ter kvaliteta cementa. Beton visoke trdnosti po trditvah in raziskavah zveznega avtocestnega združenja FHWA<sup>10</sup>, ki so jih opravili leta 2000, zahteva manj časa in dela za vgradnjo ter stane manj na količino betona, saj ima manj okvar in vizualnih napak. [*Structural designer's guide, marec 2005*]

Pri odločitvah in ocenah kakšno nosilno konstrukcijo in kateri material bomo uporabili, je potrebno upoštevati tudi investicije, potrebne za vzdrževanje, popravila in obnove v času služenja konstrukcije. Zaenkrat nam teh podatkov o stroških v času življenjske dobe konstrukcije primanjkuje. V Združenih državah Amerike so že osnovali obrazce o poročilih opisa popravil in vzdrževanja mostov.

### **5.3 Primeri uporabe betonov visoke trdnosti**

#### **5.3.1 Izvedeni mostovi v ZDA**

##### **Avtocesta 199 v Alabami preko Uphapee zaliva, Macon County**

Most preko zaliva Uphapee, preko katerega poteka avtocesta 199, je dolg 245 m. Promet preko njega je bil odprt aprila 2000. Celoten most je sestavljen iz sedmih enako dolgih polj razpona 35 m. Konstrukcija je izvedena s T-nosilci na osnem razmaku 3 m. Iz betona visoke trdnosti so narejeni elementi podporne konstrukcije, nosilci in voziščna plošča. Cena T-nosilcev je bila 394 \$/m, cena podporne konstrukcije (stebri) je bila 266 \$/m<sup>2</sup> (voziščne plošče) in cena zgornje konstrukcije – voziščne plošče je bila 182 \$/m<sup>2</sup>.

Projektna rešitev izvedbe nosilcev z betonom tlačne trdnosti 69 MPa je omogočila izvedbo petih namesto šestih vrst nosilcev. S tem so se zmanjšali stroški za 100.000 \$. Pri podporni konstrukciji je zaradi zmanjšanja števila potrebnih stebrov zaradi uporabe visokotrdnega

---

<sup>10</sup> Federal Highway Administration, ZDA

betona prihranek znašal ravno tako 100.000 \$. Nadaljni pričakovani prihranki na predmetni konstrukciji bodo zaradi odpornejšega betona manjši vzdrževalni stroški ter daljša življenska doba konstrukcije.

Za nosilce je bila dovoljena uporaba elektrofiltrskega pepela razreda C do 35% teže cementnega materiala in uporaba mikrosilike do 15% teže cementnega materiala. Za voziščno ploščo je bila določena uporaba elektrofiltrskega pepela razreda C do 30% in mikrosilike do 15% teže cementnega materiala. Zato ni bila določena meja prepustnosti kloridov. Zahtevana je bila nega z vlaženjem voziščne plošče najmanj sedem dni.

Za nosilce je izvajalec uporabil 447 kg cementa na m<sup>3</sup> betona in 79 kg elektrofiltrskega pepela na m<sup>3</sup> betona. Povprečna vrednost pri testiranju tlačne trdnosti nosilcev pri 28-ih dneh starosti je bila 68 MPa. Povprečna tlačna trdnost voziščne plošče je bila 51 MPa pri starosti 28 dni z uporabo 390 kg cementa na m<sup>3</sup> betona in 98 kg elektrofiltrskega pepela na m<sup>3</sup> betona.

[*Structural designer's guide, marec 2005*]

### **Avtocesta SR920 (Jonesboro Road) v Georgia-i preko I-75, Henry County**

Most preko reke v sklopu avtoceste SR920 je dolg 108 m in širok 27,5 m. Konstrukcijo sestavljajo štiri razponi dolgi 16 m, 2 x 39 m in 14 m. Za večja dva razpona so uporabili nosilce tipa IV AASHTO<sup>11</sup>-ja, osno razmaknjene po 2 m. Nosilci in voziščna plošča so izvedeni iz betona visoke trdnosti.

Uporaba betona visoke trdnosti je bila nujno potrebna, saj je omogočila uporabo 39 m dolgih AASHTO nosilcev tipa IV. To je zmanjšalo celotno debelino prekladne konstrukcije. Beton visoke trdnosti je bil uporabljen tudi za optimizacijo razmaka med prečniki. Nosilci iz betona običajne trdnosti bi zahtevali uporabo pet dodatnih nosilcev. Zaradi nižje propustnosti betona visoke trdnosti se pričakuje večja trajnost konstrukcije z daljšo življensko dobo in z manjšimi vzdrževalnimi stroški. Celotna cena konstrukcije je bila 632 \$/m<sup>2</sup> voziščne površine.

---

<sup>11</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials – Ameriški urad združenja državnih cest in transporta

Za nosilce in voziščno ploščo je bila dovoljena uporaba elektrofiltrskega pepela razreda C do 15% in mikrosilike od 5-10% teže cementa. Za voziščno ploščo je bila zahtecana nega betona sedem dni z neprestanim vlaženjem ter pokrivanjem s PE folijo.

Izvajalec je za nosilce uporabil 480 kg cementa, 44.5 kg mikrosilike in 60 kg elektrofiltrskega pepela razreda C na m<sup>3</sup> betona. S tem so dosegli mnogo manjšo propustnost za kloride. Za voziščno ploščo so naredili beton s 366 kg cementa, 15.5 kg mikrosilike in 62 kg elektrofiltrskega pepela razreda C za m<sup>3</sup> betona. [*Structural designer's guide, marec 2005*]

### **Avtocesta Old Route 66 v New Mexico-u preko reke Puerco, Albuquerque**

Za promet je bila odprta decembra 2000. Most preko reke Puerco je dolg 89,5 m. Sestavljajo ga trije razponi s 29,35 m, 30,8 m in 29,35 m s 63 T-nosilci, osno razmaknjenimi za 3.8 m. Elementi iz visokotrdnega betona so nosilci in voziščna plošča. Skupni stroški izvedbe mostu so bili 2.896.701 \$.

Cilj oddelka za transport v New Mexico-u je bil vpeljati uporabo betona visoke trdnosti v njihovo državo. Kot rezultat tega uspeha, se sedaj prednapeti betonski nosilci izdelujejo s projektirano trdnostjo 50 MPa. Pred tem je bila ta trdnost 40 MPa. Primerjave cen so pokazale, da bi sedem vrst nosilcev iz betona visoke trdnosti omogočilo prihranek 7-10 % pri izvedbi zgornjega ustroja mostu v primerjavi z osmimi vrstami betonskih nosilcev iz betona običajne trdnosti.

Za nosilce je izvajalec uporabil 502 kg cementa in 75 kg elektrofiltrskega pepela razreda C za m<sup>3</sup> betona. Montažno betonski nosilci so bili narejeni za projektno trdnost 48 MPa. Dejanska dosežena tlačna trdnost po 56-tih dneh je bila 71,3 MPa.. Za doseganje takšnih trdnosti je bila zahtevana tridnevna nega. [*Structural designer's guide, marec 2005*]

### 5.3.2 Izvedbe projektov v Sloveniji

Za zaključek svojega preučevanja sem preverila še dejansko stanje glede uporabe betona visoke trdnosti v Sloveniji. Najvišja tlačna trdnost betona, ki je bil izdelan v laboratoriju, je bila 100 MPa. V obratu IGM Prevent Hoče in v betonarni SCT v Črnučah uporabljajo betone različnih tlačnih trdnosti, tudi visokih, predvsem v montažnih izdelkih kot so elementi hal, montažni stebri, nosilci, betonske varnostne ograje za avtoceste itd.

Ga. Zemljič iz obrata IGM Prevent Hoče je povedala, da višje tlačne trdnosti betona včasih ne uporabijo zaradi konstrukcijske potrebe, torej zahteve projektanta, ampak zaradi tehnologije dela. Ta zahteva visoke začetne tlačne trdnosti, da je možno hitrejšo razopaževanje, kar izvedejo včasih že po enem dnevu. To je možno zaradi večje količine uporabljenega cementa ali uporabo hiperplastifikatorja Zeta Super S. Na Štajerskem področju se betoni visoke tlačne trdnosti v visokogradnji širše še ne uporabljajo. Z betonom visoke tlačne trdnosti so zaradi velikih obremenitev leta 1999 izvedli montažne stebre nakupovalnega centra Europark v Mariboru, in sicer je bila tlačna trdnost tega betona 60-90 MPa. Beton so naredili z mineralnim dodatkom mikrosiliko ( 30 kg/m<sup>3</sup> betona), s superplastifikatorjem in agregatom z maksimalnim zrnem 16 mm. Na avtocestnem programu se je do sedaj uporabljal beton z višjimi tlačnimi trdnostmi na prekladnih konstrukcijah mostov in viaduktov, vendar se je uporabljal tudi tu le beton med razredoma C30/37 in C 40/50. Zopet lahko potrdim dejstvo, da je vsaka priprava betona s posebnimi lastnostmi in višjo tlačno trdnostjo specifična, saj so tudi v Hočah menda sestavili posebno recepturo betona C 45/50 za Puchov most v Ptujju. Zahtevnost in posebnost tega projekta je predvsem zaradi dolge transportne poti, ki zahteva od betona dolgo obdelavnost. Zgornja konstrukcija mostu je zelo vitka in ima veliko armature.

Ga. Martina Jakovac mi je podala informacije o uporabi betonov višjih trdnosti, ki so jih izdelali v betonarni SCT v Črnučah. V tunelih Kastelec, Trojane, Dekani so uporabili za voziščno ploščo in robnike beton trdnostnega razreda C 35/45, za prekladno konstrukcijo viadukta Bonifika leta 2006 so uporabili beton trdnostnega razreda C 40/50. Za viadukt Ljubno, hangar Brnik ter bazene, gnilišča in zgoščevalce blata čistilne naprave Ljubljana so ravno tako uporabili beton trdnostnega razreda C 35/45, medtem ko je bil očitno za ploščo



garažne hiše Brnik dovolj trden beton trdnostnega razreda C 30/37. Betone višje trdnosti, ki pa še vedno ne spadajo med visokotrdne betone, so uporabili zaradi zahtev projekta oz. večjih obremenitev. Po njihovih izkušnjah uporaba teh betonov ne pomeni hitrejšega napredovanja izvajanja gradnje zaradi hitrejšega strjevanja, za kar lahko iščemo razlog v uporabi še ne dovolj visokih tlačnih trdnosti betona. Od dodatkov uporabljajo le plastifikatorje in superplastifikatorje, ki jim omogočajo lažjo vgradnjo in povišujejo trdnost. Tlačno trdnost betona regulirajo še z granulacijo in čistočo agregata ter vsebnostjo cementa.

## 6 ZAKLJUČKI

Skozi zgodovino so beton razvijali v smeri pridobivanja višje trdnosti in izboljšanja drugih mehanskih lastnosti. Z novimi dodatnimi materiali, novi načini priprave in ustreznimi razmerji med sestavinami betona so uspeli močno povečati končno tlačno trdnost betona. Za kvaliteto izdelanega betona ni pomembna samo uporaba primernih materialov, temveč tudi medsebojno sodelovanje različnih sestavin betona, razmerja med njimi in način priprave betona ter njegova nega po vgradnji.

Zaradi gostejše strukture cementnega kamna je beton visoke trdnosti tudi bolj odporen na vremenske in druge vplive okolja. Z nizkim vodo-vezivnim razmerjem in dodajanjem mikrosilike se poveča vodonepropustnost. S tem se zmanjša sposobnost transporta kloridov v notranjost betonskega elementa, poveča se odpornost na zmrzovanje, zmanjša nevarnost luščenja betona in nevarnost korozije armature.

Beton visoke trdnosti ima veliko dobrih lastnosti, zaradi česar je uporaben v različnih okoljih. Zaradi visokih končnih tlačnih trdnosti betona se zmanjšajo potrebne dimenzije konstruktivnih elementov in s tem lastna teža konstrukcij, kar je pomembno pri mostovih. S primerno sestavo in dodatki lahko dosežemo zgodnje visoke tlačne trdnosti, ki so ugodne predvsem za hitrejše izvajanje in za elemente iz prednapetega betona. To nam tudi omogoča oblikovanje elegantnejših gradbenih konstrukcij. Na manjše izgube pri prednapetju vpliva tudi manjša deformabilnost, ki pa predstavlja težavo pri potresni gradnji. Betonarnam lahko razvoj izdelave betona višje trdnosti zagotovi višjo konkurenčnost na tržišču.

Za presojo smotrnosti uporabe betonov visoke trdnosti v konstrukcijah je odločilnega pomena njegov delovni diagram. Ta se bistveno razlikuje od delovnega diagrama betona običajne trdnosti. Višja je tlačna trdnost betona, manj izrazita je padajoča veja njegovega delovnega diagrama. Rastoča veja konstitutivnih zakonov betonov visokih trdnosti je veliko manj ukrivljena kot pri betonih običajne trdnosti.

Za škatlasto prekladno konstrukcijo mostov, ki se najpogosteje uporablja, in za okrogle stebre, ki so v uporabi v visokogradnji, sem primerjala mejne upogibno-osne odpornosti. Za izračun nosilnosti prekladne konstrukcije mostov sem uporabila in priredila že narejen računalniški program. Tega so že predhodno izdelali na Katedri za masivne in lesene konstrukcije. Program za izračun odpornosti stebrov sem razvila v okolju Microsoft Excel. Ta vključuje preračunavanje osnovnih preglednic programa, programsko kodo napisano v programskem jeziku Visual Basic in makro ukaze. Za reševanje nelinearnih problemov uporabimo programski dodatek Solver, s katerim iščemo optimalne rešitve.

Z računalniškim programom za prekladne konstrukcije je bilo že predhodno dokazano, da za zmanjšanje višine prekladne konstrukcije uporaba betonov visoke trdnosti ni smotrna. Z višjo trdnostjo ne pridobimo veliko ali skoraj nič zaradi ogromne količine armature, ki bi jo bilo potrebno uporabiti, da bi lahko izkoristili tlačno trdnost betona [Franc Saje in sod., 2005]. Glede na moje ugotovitve se s povečevanjem tlačne trdnosti betona povečuje tlačna osna in upogibna nosilnost škatlastega prereza, vendar slednja počasneje.

Ker je bilo v preučevanju prekladne mostne konstrukcije že opravljenega veliko raziskovalnega dela, sem podrobneje preučila, kako različni parametri vplivajo na nosilnost okroglih stebrov. Višja tlačna trdnost betona omogoča večjo upogibno odpornost stebra. Upogibno odpornost stebra lahko povečamo, če ga hkrati tlačno obremenimo. Te razlike v upogibnih nosilnostih so manjše pri stebrih z večjo količino armature. Naraščanje upogibne nosilnosti prerezov je počasnejše, če se povečuje tlačna trdnost betona nad 50 MPa. Na povečanje osne nosilnosti stebrov pa vpliva predvsem tlačna trdnost betona.

V slovenski literaturi nisem zasledila natančnih navodil za sestavo mešanice betona visoke trdnosti. Zato sem se oprla na tuja priporočila in raziskave, ki so jih pred nekaj leti izvajali na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, na Katedri za masivne in lesene konstrukcije.

V betonarni in pri proizvajalcih dodatkov betonom sem poizvedla, kakšne so velikoprodajne cene vseh potrebnih sestavin za izdelavo betona visoke trdnosti. Glede na podatke o pripravljenih mešanicah v laboratoriju in glede na navodila za sestavljanje mešanic sem izbrala šest mešanic betona za ekonomsko oceno. Upoštevala sem zahtevano uporabljeno

količino posameznih materialov. Primerjala sem, kakšna je razlika v skupni ceni vseh materialov za pripravo mešanic za betone različnih trdnosti. Ugotovila sem, da povečana uporaba cementa, uporaba dodatnih cementnih materialov (predvsem mikrosilike) in superplastifikatorjev, za doseganje primerne obdelovalnosti, poveča ceno enote betona za skoraj sorazmerni delež povečanja trdnosti. Groba ocena je, da je razmerje cen za pripravo betona običajne trdnosti in betona visoke trdnosti približno 1:2. Vendar ugotavljam, da priprava betona s tlačno trdnostjo 50 MPa ne stane veliko več od priprave betona običajne trdnosti. Hkrati je povišanje njegove nosilnosti dovolj veliko glede na betone nižje trdnosti.

Pri oceni smotrnosti uporabe betona visoke trdnosti moramo upoštevati, za kakšne namene in v kakšnih pogojih želimo beton uporabiti in kaj želimo z njim doseči. Ugotovila sem, da bi bilo za pravilnejše zaključke in spoznanja potrebno vzpostaviti sistem spremljanja gradbenih konstrukcij iz različnih trdnosti betona skozi njihovo celotno življenjsko dobo ali daljše časovno obdobje ter primerjati stroške obratovanja in trajnost konstrukcije. Na skupno ceno konstrukcije namreč ne vplivajo samo začetni gradbeni stroški. Zasedila sem, da je bil v Sloveniji izveden dvoletni projekt ugotavljanja trajnosti betonov visoke trdnosti [Trajnost betonov visoke trdnosti in konvencionalnih betonov, 1999].

Glede na opazovanja in preučevanja lastnosti lahko ugotovim, da ima beton visoke trdnosti nekaj prednosti in pomanjkljivosti. Ena izmed pomembnejših prednosti je večja trajnost zaradi manj propustne strukture. Posledično je potrebna manj vzdrževanja. Uporaba industrijskih odpadnih materialov za izdelavo betona visoke trdnosti ima tudi pozitiven vpliv na okolje. Tlačna trdnost betona se povečuje hitreje kot cena materialov za pripravo betona, s čimer dosežemo veliko povečanje tlačne osne odpornosti. Če so gradbeni elementi obremenjeni z večjo tlačno osno silo, se hitreje povečuje upogibna odpornost prereza z višanjem trdnosti betona, saj je v tem primeru prispevek betona k upogibni odpornosti prereza večji. Beton visoke trdnosti ima pa tudi nekaj slabosti, saj je njegova priprava težja in dražja ter potrebujemo zanjo več znanja. Poleg tega naraščanje upogibnih odpornosti prerezov iz betonov, ki dosegajo tlačno trdnost nad 50 MPa, ni več tako občutno.

## VIRI

Aitcin, P.-C. 1998. High-performance concrete. London: 591 str.

STRUCTURAL CONCRETE: Textbook on Behaviour, Design and Performance. 1999. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990: Volume 1. International Federation for Structural concrete (fib): 224 f.

EUROCODE 2, Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1, december 2003.

EVROKOD 2, Projektiranje betonskih konstrukcij – Del 1-1: Splošna pravila in pravila za stavbe. SIST EN 1992-1-1, 2004.

Saje, D. Julij 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 157 f.

Saje, D. December 1997. Posebnosti betonov visokih trdnosti. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 90 f.

Saje F., Lopatič J., Saje D., Bratina S., Valjavec I. Ljubljana 2005. Prečni prerezi armiranobetonskih prednapetih razponskih konstrukcij grednih in okvirnih premostitvenih objektov s tehnologijo gradnje. Razvojno-raziskovalna naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za masivne in lesene konstrukcije: f.1-f.28

Neville, A.M. 1999. Properties of concrete: Fourth and Final Edition. England, London.

Žarnić, Roko, 2000. Osnovne lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij.

Look smart, Find articles, Susan C. McCraven:

[http://www.findarticles.com/p/articles/mi\\_m0NSX/is\\_6\\_47/ai\\_91040214](http://www.findarticles.com/p/articles/mi_m0NSX/is_6_47/ai_91040214) (30.09.2006)

U.S.Department of Transportation, Federal Highway Administration. High Performance Concrete:

[http://knowledge.fhwa.dot.gov/cops/hpcx.nsf/All+Documents/A10B9708BF2C9D3D85256FD2007403A5/\\$FILE/Final%20HPC%20Structural%20Designers%20Guide.pdf](http://knowledge.fhwa.dot.gov/cops/hpcx.nsf/All+Documents/A10B9708BF2C9D3D85256FD2007403A5/$FILE/Final%20HPC%20Structural%20Designers%20Guide.pdf)  
(05.11.2006)

Portland Cement Association. 2006. Bridges, Count on Concrete:

[http://www.cement.org/bridges/br\\_PL700.asp](http://www.cement.org/bridges/br_PL700.asp) (16.11.2006)

Portland Cement Association. 2006. Cement & Concrete Basics, Chemical Admixtures:

[http://www.cement.org/basics/concretebasics\\_chemical.asp](http://www.cement.org/basics/concretebasics_chemical.asp) (17.1.2006)

Trajnost betonov visoke trdnosti in konvencionalnih betonov, trajanje raziskave:

01.01.1999 – 30.06.2000:

<http://www.ist-world.org/ProjectDetails.aspx?ProjectId=ab792421fd0a46099915ac0a1f4ce330&SourceDatabaseId=46e96d6073af41ccb77444d086415117> (20.03.2007)

Zemljič, T., Prevent gradnje d.o.o. Re: Betoni visoke trdnosti. Message sent to: Zaletel, S.  
13. april 2007. Osebna komunikacija

From: Jakovac, M., SCT d.d. Uporaba betonov visoke trdnosti. Message sent to: Zaletel, S.  
30. maj 2007. Osebna komunikacija

