

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Bulić, N., 2015. Optimalno dimenzioniranje osno-upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 34 str.

Datum arhiviranja: 30-09-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Bulić, N., 2015. Optimalno dimenzioniranje osno-upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 34 pp.

Archiving Date: 30-09-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

NENAD BULIĆ

**OPTIMALNO DIMENZIONIRANJE OSNO-UPOGIBNO
OBREMENJENEGA ARMIRANOBETONSKEGA
NOSILCA**

Diplomska naloga št.: 195/B-GR

**OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE
BEAM WITH RESPECT TO BENDING MOMENT AND
AXIAL FORCE**

Graduation thesis No.: 195/B-GR

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 15. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani **Nenad Bulić** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »**Optimalno dimenzioniranje osno-upogibno obremenjenega armiranobetonskega nosilca**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 9.9.2015

Nenad Bulić

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.072.2(043.2)
Avtor:	Nenad Bulić
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Optimalno dimenzioniranje osno-upogibno obremenjenega armirano betonskega nosilca
Tip dokumenta:	Dipl. nal. – UNI
Obseg in oprema:	VIII, 34 str., 11 pregl., 22 sl., 3 pril.
Ključne besede:	Betonski nosilec, pravokotni prerez, dimenzioniranje, mejno stanje nosilnosti, mejno stanje uporabnosti

Izveček

V diplomski nalogi sem predstavil postopek dimenzioniranja armirano betonskega nosilca. Odpornost betonskega prereza je odvisna od geometrije prereza, vrste betona in količine armature. V praksi pogosto določene parametre vnaprej izberemo in na njihovi osnovi določimo ostale karakteristike. Ta način projektiranja omogoča hitro reševanje problema, ne zagotavlja pa optimalne cene. Če bi želeli poiskati najcenejšo možnost, bi morali za vsak trdnostni razred betona, pri različnih geometrijskih karakteristikah, izračunati potrebno količino armature in med dobljenimi rezultati poiskati najcenejšo možnost. Postopek računanja je obsežen, ker je potrebno narediti veliko ponovitev. V sklopu svoje diplomske naloge sem izdelal aplikacijo v programskem okolju Excel, ki vsebuje modul Solver – Reševalec, s katerim lahko v množici armiranobetonskih prečnih prerezov poiščemo najcenejši element. Uporabnik poda trdnostne razrede betona in cene materialov ter omeji geometrijske lastnosti. Na podlagi izbranih parametrov program poišče najcenejšo rešitev. Rezultati programa so trdnostni razred betona in geometrijske lastnosti prereza: višina, širina, količina armature. V diplomski nalogi nisem upošteval cene opaža pri optimalnem dimenzioniranju elementa.

Omejil sem se na osno-upogibno obremenjen element. Statični model je prostoležeči nosilec. Program je možno nadgraditi za druge modele konstrukcij. Upoštevati moramo predpostavko, da upogibni moment prevladuje in imamo veliko ekscentričnost. Na podlagi obremenitev določimo le vzdolžno armaturo, ne pa tudi strižne. Prerez dimenzioniramo po standardu Evrokod 2. Upoštevajoč navedeni standard, dokazujemo nosilnost prereza v mejnem stanju nosilnosti in mejnem stanju uporabnosti.

Na podlagi izvedenih primerov sem ugotovil, da je za prostoležeče nosilce, katerih prečni prerezi so obremenjeni z velikimi upogibnimi momenti, najboljša rešitev uporaba betonov trdnostnih razredov med C40 in C50.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.072.2(043.2)
Author: Bulić Nenad
Supervisor: Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
Title: Optimal Design of Reinforced Concrete Beam with respect to bending moment and axial force
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: VII, 34 p., 11 tab., 22 fig., 3 ann.
Key words: Concrete beam, rectangular cross-section, design, ultimate limit state, serviceability limit state

Abstract

The thesis paper describes the procedure of designing reinforced concrete sections. Cross section resistance depends on the number of reinforced bars, section dimensions and concrete strength. Usually we choose the type of concrete, the geometry of the section and then determine the number of reinforced bars. This is the fastest way of designing, but not the cheapest. In order to look for the most economical solution, it is necessary to calculate all the parameters for all types of concretes. This way is more complicated and requires more time. Part of my graduation thesis is in Excel, which has an integrated solver application. With this add-in we can find the best solution with less difficulty. Users enter the types of concrete and their prices, limit values of the geometry parameters and loads. Using nonlinear functions to solve equations, solver gives results for every type of concrete, and the number of reinforced bars and section dimensions.

The static model is a simply supported beam. It is possible to modify the program for different types of constructions. The beam is loaded with an axial force and bending moment. The assumption is: the bending moment is significantly larger than the axial force. This state of stress causes large eccentricity. The computer program calculates only longitudinal reinforcement, but not the shear reinforcement. The design procedure is explained in the standard Eurocode 2. It is required to check the ultimate and serviceability limit state. Based on the obtained results, the conclusion is that for construction loaded with a large bending moment and a small axial force, the most economical concrete is between C40 and C50.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
1 UVOD	1
2 LASTNOSTI MATERIALA	3
2.1 Jeklo za armiranje	3
2.2 Beton	4
2.3 Krovni sloj betona	5
3 STATIČNI MODEL KONSTRUKCIJE	6
3.1 Prostoležeči nosilec	6
3.2 Vplivi na konstrukcijo	6
4 MEJNO STANJE NOSILNOSTI	7
4.1 Določitev enojne armature	7
4.2 Določitev dvojne armature	8
4.3 Omejitev količine armature	9
5 MEJNO STANJE UPORABNOSTI	10
5.1 Mejno stanje razpok	11
5.2 Mejno stanje vibracij	12
5.3 Mejno stanje napetosti	12
5.4 Mejno stanje pomikov	14
6 OPTIMIZACIJA	17
7 OPIS PROGRAMA ZA OPTIMALNO DIMENZIONIRANJE ELEMENTOV	18
7.1 Vhodni podatki	18
7.2 Uporabljene funkcije	20
7.3 Primerjanje rezultatov	24

8	RAČUNSKA PRIMERA OPTIMALNEGA DIMENZIONIRANJA NOSILCA	26
8.1	Nosilec konstantne dolžine	26
8.1.1	Upoštevanje vseh kontrol v mejnem stanju nosilnosti in uporabnosti	27
8.1.2	Upoštevanje vseh kontrol v mejnem stanju nosilnosti in uporabnosti, razen kontrole pomikov	28
8.1.3	Upoštevanje vseh kontrol v mejnem stanju nosilnosti in uporabnosti, raze kontrole pomikov in napetosti	29
8.2	Nosilec različnih dolžin	30
9	ZAKLJUČEK	33
VIRI		34

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Parametri konstitutivnega zakona z utrditvijo za armaturo S500 [3]	4
Preglednica 2: Vpis varnostnih in kombinacijskih faktorjev	18
Preglednica 3: Vpis obtežb.....	18
Preglednica 4: Karakteristike armature	18
Preglednica 5: Vpis geometrijskih karakteristik	19
Preglednica 6: Omejitve razpok in povosov	19
Preglednica 7: Cene betonov.....	19
Preglednica 8: Koeficienti lezenja in krčenja.....	20
Preglednica 9: Prikaz izračuna armature po mejnem stanju nosilnosti	22
Preglednica 10: Kontrola mejnega stanja uporabnosti	23
Preglednica 11: Cene obravnavanih nosilcev.....	30

KAZALO SLIK

Slika 1: Delovni diagram jekla [3]	3
Slika 2: Osnovni konstitutivni zakoni [3].....	4
Slika 3: Poenostavljeni bilinearni konstitutivni zakon [3].....	5
Slika 4: Prostoležeči nosilec [7]	6
Slika 5: Obremenitev prereza	7
Slika 6: Izračun tlačne armature	8
Slika 7 : Primerjava naraščanja tlačne trdnosti in modula elastičnosti betona v odvisnosti od trdnostnega razreda betona	11
Slika 8: Izračun povesa [5].....	14
Slika 9: Prikaz funkcije Reševalec	21
Slika 10: Prikaz okna v primeru, da obstaja rešitev.....	21
Slika 11: Splošen prikaz cene nosilcev, izdelanih iz betonov različnih trdnostnih razredov	24
Slika 12: Splošen prikaz količine uporabljenega betona za nosilec	25
Slika 13: Primer uporabljene količine armature	25
Slika 14: Statični model.....	26
Slika 15: Cene nosilca v primeru 1.1	27
Slika 16: Poraba betona v primeru 1.1	27
Slika 17: Cene nosilca v primeru 1.2.....	28
Slika 18: Poraba betona v primeru 1.2	28
Slika 19: Cena nosilca v primeru 1.3.....	29
Slika 20: Poraba betona v primeru 1.3	29
Slika 21: Prikaz cen betonskih nosilcev	31
Slika 22: Indeksni prikaz razlik cen betonov.....	32

1 UVOD

Tema diplomske naloge je dimenzioniranje armirano betonskega nosilca. Nosilec je raven, na obeh koncih vrtljivo podprt in ima pravokotni prečni prerez. Obtežen je s spremenljivo in stalno obtežbo. Na konstrukcijo deluje zvezna navpična obtežba in osna sila. V gradbeništvu je prostoležeči nosilec model, ki se lahko uporabi kot poenostavitev različnih vrst konstrukcij. Modeliramo lahko preklade, navadne nosilce, špirovce in plošče. Pri tem naredimo napake, saj so v naravi zasuki nad podporami delno omejeni. V svoji nalogi določam natezno armaturo v sredini polja, kjer je upogibni moment največji. Zaradi predpostavke o prostoležečem nosilcu je računski upogibni moment večji od dejanskega. Obravnavamo primere, pri katerih je upogibni moment bistveno večji od osne sile – velika ekscentričnost.

Pri dimenzioniranju upoštevamo predpostavke, da je material homogen, izotropen in linearno elastičen. Prerezi, ki so ravni pred nanosom obtežbe, so ravni tudi v deformirani legi. Velja Bernulijeva hipoteza, da so prerezi, ki so pravokotni na težiščno os, pravokotni tudi na deformirano težiščno os. Obravnavamo konstrukcije z majhnimi pomiki in zasuki.

Beton je kompozitni material, ki je sestavljen iz agregata, vode, veziva, zraka in dodatkov. Materialne lastnosti betona vplivajo na lastnosti betonskega elementa. Vse lastnosti se kontrolirajo s standardiziranimi preizkusi, ki jih predpisuje standard. Naloga projektanta je, da izbere ustrezen beton, ki bo imel zadostno nosilnost in odpornost.

V postopku dimenzioniranja je potrebno zadostiti mejnemu stanju uporabnosti in mejnemu stanju nosilnosti. Pri mejnem stanju nosilnosti so glavni parametri tlačna trdnost betona in natezna trdnost armature. Izbira visokotrdnega betona je smiselna, ker lahko z manjšim prečnim presekom prenesemo enako obremenitev in tako zgradimo lažjo konstrukcijo. Visokotrdni betoni so zaradi uporabe dodatkov bistveno dražji, zato je potrebno preveriti, ali je pomembnejše zmanjšanje teže konstrukcije ali povečanje cene zaradi višjega trdnostnega razreda. Mejno stanje uporabnosti zahteva račun maksimalnih povosov, omejitev vibracij, omejitev razpok in omejitev napetosti. Pomiki konstrukcije so odvisni od togosti konstrukcije, in ne toliko od trdnosti. Glavna parametra, ki določata togost konstrukcije, sta modul elastičnosti in prerez betonskega elementa. V primeru, da izberemo beton z najvišjo tlačno trdnostjo, dobimo v računu mejnega stanja nosilnosti najmanjši prerez. Pogosto v računu mejnega stanja uporabnosti ta prerez ne zadošča in ga moramo povečati. Na podlagi velikosti prereza določimo količino armature. Če bi pri računanju uporabili podatke za drugi beton, bi dobili drugačen prečni prerez in posledično drugačno ceno nosilca. Da bi dobili najbolj ekonomičen prerez, je potrebno račun velikokrat ponoviti.

Za izračun sem naredil aplikacijo v programu Microsoft Excel, ki vsebuje modul Solver – Reševalec, s katerim poiščemo najcenejšo možnost za določen obtežni primer. Uporabnik poda obtežbo, dolžino nosilca, omeji geometrijske parametre in program poišče najcenejšo varianto za vsak beton. Rezultat so geometrijske karakteristike prereza (širina in višina), količina armature in trdnostni razred betona. Aplikacija je narejena za izračun vzdolžne armature, ne pa tudi strižne. Omejil sem se na obravnavo prostoležečega nosilca, program pa lahko nadgradim tudi za druge statične modele. Uporabnik mora sam določiti krovni sloj betona in koeficiente lezenja.

Uporabnost programa je predstavljena v opredzadnjem poglavju. Prikazan je primer ponudbe proizvajalca betonov in cene armature. Dokazano je, da je za različne dolžine nosilcev smiselno izbirati različne vrste betonov. Z uporabo programa lahko poiščemo med 5 in 10 odstotki nižje cene obravnavanih elementov. V diplomski nalogi je narejena raziskava smiselnosti uporabe visokotrdnih betonov.

2 LASTNOSTI MATERIALA

Beton je keramični kompozitni material, ki je sestavljen iz veziva, agregata, vode in dodatkov. Kakovost vseh gradnikov vpliva na končne lastnosti kompozita. Pri dimenzioniranju upoštevamo lastnosti kompozita, ne pa posameznih gradnikov. V odvisnosti od količine cementsa, vode, agregata, zraka ter dodatkov dobimo različne vrste betona. V gradbeništvu je beton verjetno najbolj uporabljen material zaradi dobrih mehanskih lastnosti in cenovno razmeroma ugodne gradnje konstrukcij [1].

Glavna pomanjkljivost betona je nizka stopnja prenosa nateznih obremenitev. V območjih, kjer so natezne napetosti, beton razpoka in nima nosilnosti. Zaradi tega pojava se v natezni coni vgradi armaturno jeklo, ki prevzame natezne napetosti. S tem ukrepom bistveno izboljšamo odpornost obremenjenega prereza [6].

2.1 Jeklo za armiranje

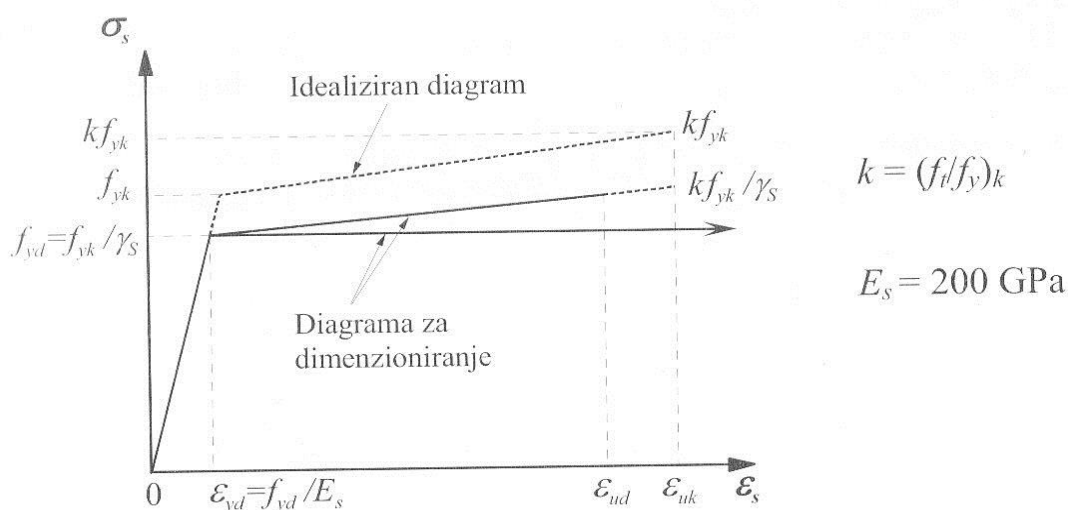
Način obdelave in proizvodnje jekla vpliva na trdnostni in delovni diagram. Vroče obdelano jeklo ima nad mejo elastičnosti izrazit plato – raven del, ki ga hladno obdelana jekla nimajo. Za izračun mejne nosilnosti upoštevamo bilinearni konstitutivni zakon jekla brez utrditve. V tem primeru nimamo omejenih deformacij. Drugi način je upoštevanje utrditve po linearnem zakonu.

- Brez utrditve:

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad \varepsilon_{yd} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud} \rightarrow \sigma_s = f_{yd}$$

- Z utrditvijo:

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad \varepsilon_{yd} \leq \varepsilon_s \rightarrow \sigma_s = f_{yd} \cdot \left[1 + (k - 1) \cdot \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{yd}}{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{yd}} \right]$$



Slika 1: Delovni diagram jekla [3]

V praksi se najpogosteje uporablja armatura S500. Ločimo dva razreda duktilnosti A in B [3].

Preglednica 1: Parametri konstitutivnega zakona z utrditvijo za armaturo S500 [3]

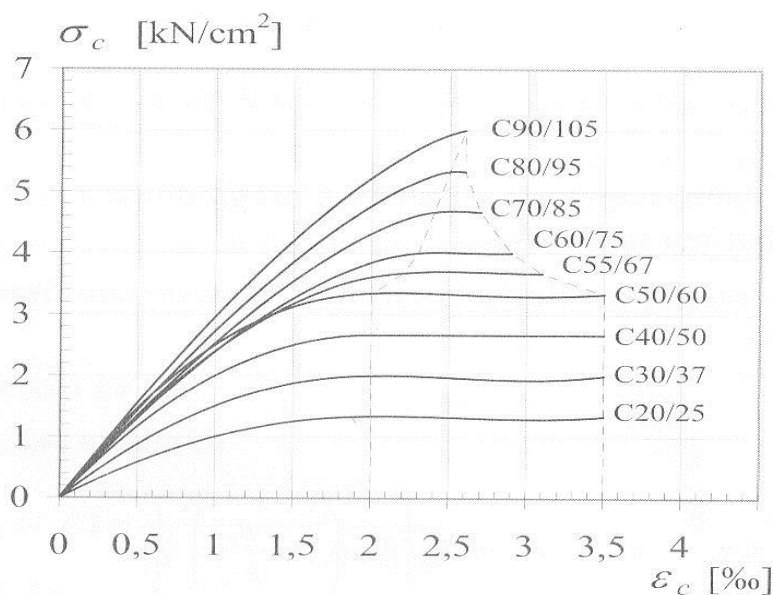
Armaturo	E_s [kN/cm ²]	f_{yk} [kN/cm ²]	f_{yd} [kN/cm ²]	$\sigma_s (\varepsilon_s = \varepsilon_{ud})$ [kN/cm ²]	ε_{ud} [‰]	$\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$ [‰]
S 500-A	20.000	50	43,5	45,4	22,5	2,17
S 500-B	20.000	50	43,5	46,6	45,0	2,17

2.2 Beton

Mešanica agregata, vode, veziva in dodatkov tvori beton. Pri dimenzioniranju upoštevamo lastnosti kompozita, ne pa posameznih gradnikov[1]. V prilogi A so podane mehanske lastnosti betonov, uporabljenih v programu.

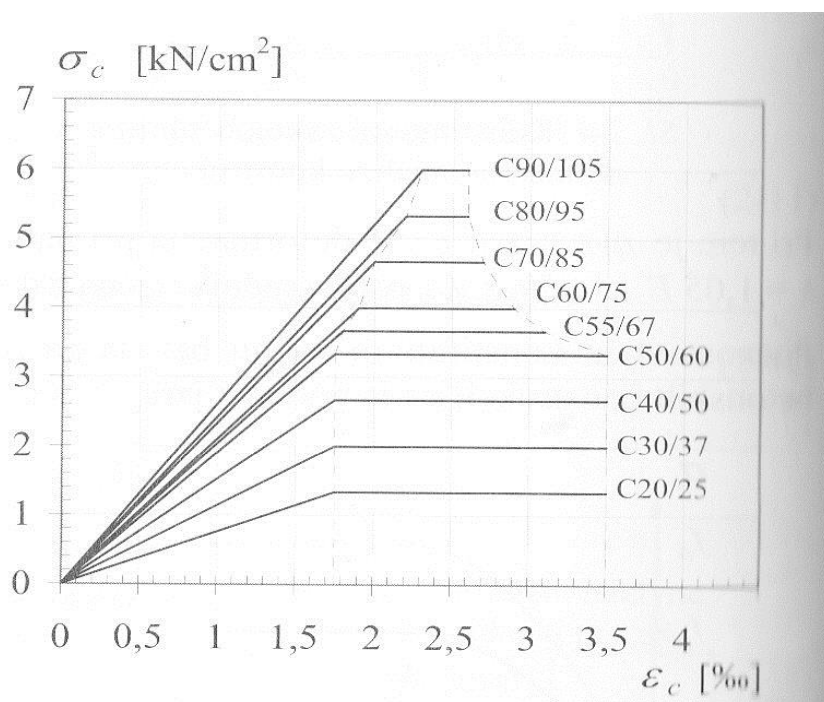
V primerjavi z betoni običajnih trdnosti so parametri, ki opisujejo konstitutivni zakon visokotrdnih betonov, različni za vsako vrsto betona. V skladu s predpisom Evrokod 2 lahko pri dimenzioniranju uporabljamo naslednja delovna diagrama oziroma konstitutivna zakona:

- osnovni konstitutivni zakon: povezava med deformacijami in napetostmi je opisana s kvadratno parabolo in linearnim delom,



Slika 2: Osnovni konstitutivni zakoni [3]

- poenostavljeni bilinearni konstitutivni zakon: prvi del je linearen - nagnjen, drugi pa konstanten do mejne deformacije [3].



Slika 3: Poenostavljeni bilinearni konstitutivni zakon [3]

2.3 Krovni sloj betona

Pri vsakem betonskem elementu je potrebno armaturo zaščititi pred zunanjimi vplivi, da bi povečali njeno trajnost. To lahko naredimo z različnimi premazi ali z ustreznim krovnim slojem. Debelina krovnega sloja je določena po standardu SIST EN 1990. V odvisnosti od projektne življenjske dobe, razreda izpostavljenosti, premera armature in izbrane vrste betona se določi minimalna debelina krovnega sloja. Debelina krovnega sloja mora biti dovolj velika, da prepreči korozijo armature. V primeru, da armatura korodira, ni sposobna prevzeti nateznih napetosti in obstaja nevarnost porušitve konstrukcije [4].

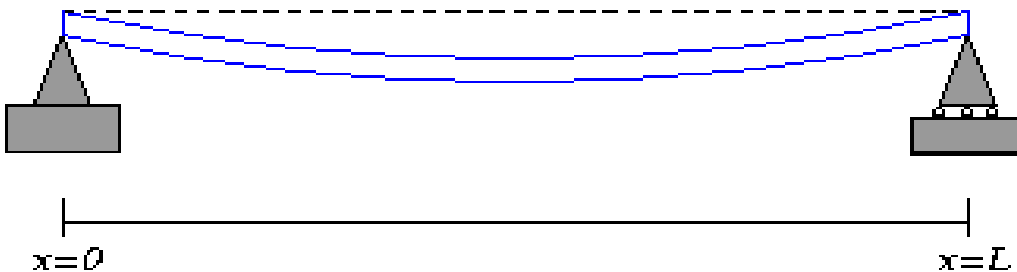
Postopek določanja krovnega sloja je opisan v standardu in ga v diplomski nalogi ne bom podrobno prikazoval. Pri uporabi programa, ki je del diplomske naloge, uporabnik sam določi potrebni krovni sloj in ga vnese v program kot podatek.

3 STATIČNI MODEL KONSTRUKCIJE

V gradbeništvu se pogosto kompleksni statični sistemi dajo razčleniti na bolj enostavne. V svoji diplomski nalogi sem se omejil na statični model prostoležečega nosilca. Program, ki je del diplomske naloge, lahko priredimo tudi za ostale enostavne sisteme, kot so obojestransko vpeti nosilci, previsni nosilci, konzole ipd.

3.1 Prostoležeči nosilec

Prostoležeči nosilec je primer konstrukcijskega elementa, ki se pogosto pojavi v gradbeniški praksi. Omejil sem se samo na ravne nosilce. Robni pogoji so takšni, da so zasuki na obeh koncih dovoljeni, vendar so navpični pomiki preprečeni.



Slika 4: Prostoležeči nosilec [7]

Robni pogoji:

w ... *vertikalni pomik* ; w'' ... *moment*

$$x = 0 \quad w(x) = 0; \quad w''(x) = 0$$

$$x = L \quad w(x) = 0; \quad w''(x) = 0$$

Konstrukcije, ki jih lahko obravnavamo kot prostoležeče nosilce, so običajni nosilci, špirovci, plošče in preklade. Vpetost teh konstrukcij v podpore lahko običajno v računu zanemarimo.

3.2 Vplivi na konstrukcijo

Na prostoležeči nosilec lahko deluje več različnih vplivov oziroma obtežb. V praksi na tako konstrukcijo običajno deluje zvezna navpična obtežba in/ali osna sila. Takšni vplivi v prerezu povzročijo strižne in normalne napetosti, ki so tlačne in natezne. Natezne napetosti v prečnem prerezu moramo prevzeti z vzdolžno armaturo. Predmet diplomske naloge je dimenzioniranje na osno-upogibno obremenitev. Obtežba je lahko spremenljiva in stalna. Stalna obtežba je lastna teža konstrukcije, nekonstrukcijski elementi ter i oprema, ki se ves čas nahaja na konstrukciji. Koristna obtežba je spremenljiva obtežba, ki lahko deluje v nekem trenutku z določeno intenziteto, ni pa vedno prisotna. Pri dimenzioniranju konstrukcije upoštevamo različne faktorje varnosti za posamezne obtežbe [3].

4 MEJNO STANJE NOSILNOSTI

Preverjanje mejnega stanja nosilnosti v sklopu dimenzioniranja elementa je preverjanje dimenzij betonskega prereza in/ali določitev potrebne mehke armature, glede na pogoj varnosti proti porušitvi. Upoštevamo konstitutivne zveze oziroma delovne diagrame betona in jekla. Potrebno je upoštevati varnostne faktorje, predpisane v standardu. Predpostavljamo, da upogibni moment in osna sila delujeta v težišču prereza.

4.1 Določitev enojne armature

Potrebno je določiti koeficient k_d :

$$K_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}$$

Kjer je :

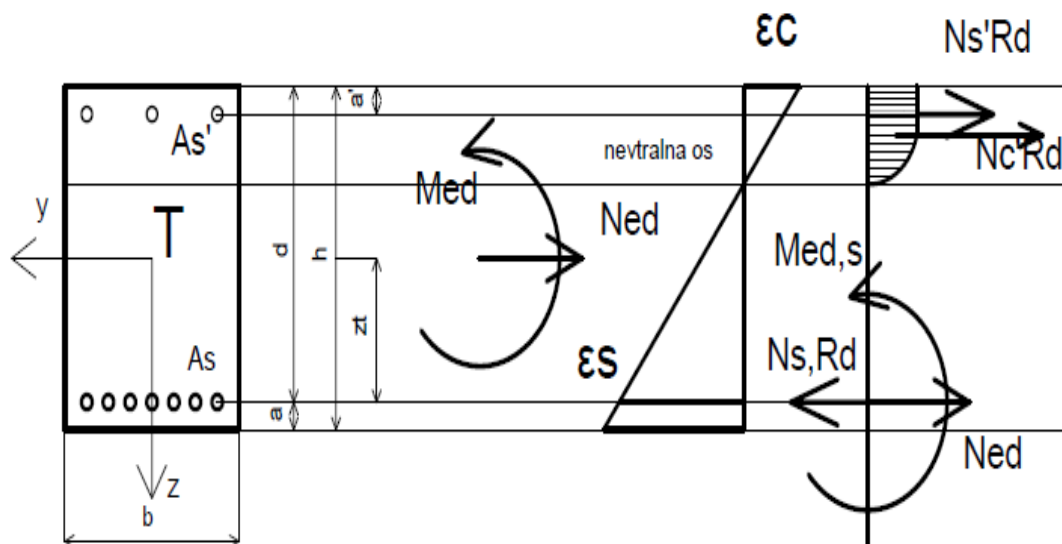
f_{cd} ... projektna tlačna trdnost betona,

b ... širina tlačene cone betonske prereza,

d ... statična višina,

M_{Eds} ... upogibni moment, prestavljen na težišče natezne armature.

$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot (h/2 - a)$$



Slika 5: Obremenitev prereza

Na osnovi izračunanega K_d je potrebno določiti nevtralno os in koeficient K_s . Ta določi potrebno armaturo. Omenjene koeficiente lahko analitično izpeljemo ali uporabimo preglednico Pr.P1-1 v standardu Eurocode 1992-1-1, ki je podana v prilogi B. Upoštevano je, da je beton polno izkoriščen, oziroma da je deformacija betona enaka mejni deformaciji.

Višino tlačne cone x dobimo z izrazom:

$$x = K_x \cdot d.$$

Količino enojne armature A_s določimo z izrazom:

$$A_s = K_s \cdot \frac{M_{Eds}}{\sigma_s \cdot d} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s}.$$

Izračunana armatura mora biti v mejah dovoljene količine armature [6].

4.2 Določitev dvojne armature

V primeru, da preoz z enojno armaturo ne more prevzeti predvidene obremenitve, ga dvojno armiramo. Del tlačnih napetosti prevzame armatura, ki se nahaja v tlačni coni. Če je vrednost brezdimenzionalnega koeficienta K_d večja kot $K_{d, mejni}$, dodamo tudi tlačno armaturo. Postopek določitve dvojne armature je opisan v nadaljevanju:

Najprej izračunamo največji projektni upogibni moment M_{max} , ki ga lahko preoz prevzame, če je le enojno armiran. Nato izračunamo potrebno količino natezne armature, ki ustreza M_{max} .

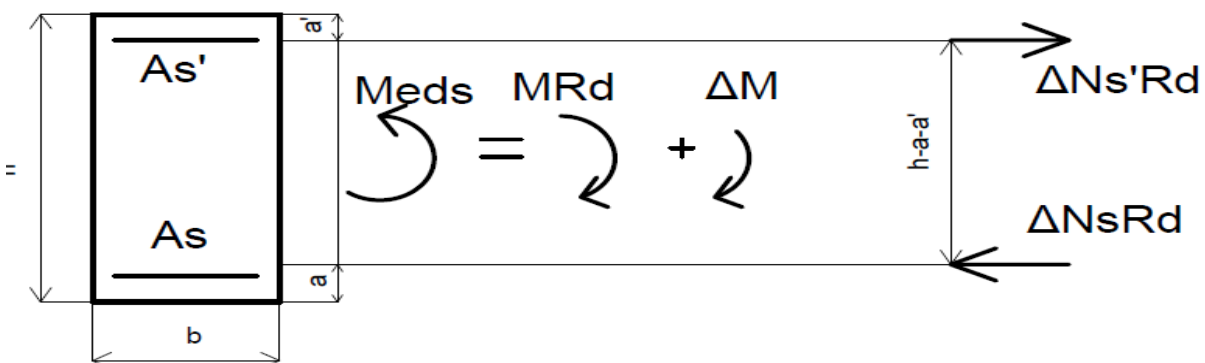
$$M_{max} = K_{d, mejni} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$$

$$A_s(enojno) = K_s \cdot \frac{M_{max}}{f_{yd} \cdot d} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

Razliko med dejanskim momentom M_{Ed} in maksimalnim momentom M_{max} označimo z ΔM .

$$\Delta M = M_{Eds} - M_{max}$$

Razliko momentov ΔM prevzamemo z dvojico sil. Napišemo momentni ravnotežni pogoj na mesto tlačne armature.



Slika 6: Izračun tlačne armature

$$\Delta M = N_s \cdot (d - a')$$

$$N_s = \frac{\Delta M}{(d - a')}$$

$$\Delta A_s \cdot f_{yd} = \frac{\Delta M}{(d - a')}$$

$$\Delta A_s = \frac{\Delta M}{(d - a') \cdot f_{yd}}$$

S pomočjo drugega ravnotežnega pogoja, da je vsota vseh horizontalnih sil enaka nič, dobimo:

$$\Delta A_s = \Delta A_s'$$

Celotna tlačna armatura A_s' je naslednja:

$$A_s' = \Delta A_s'$$

Celotna natezna armatura A_s pa naslednja:

$$A_s = \Delta A_s + A_{s(enojno)}$$

Pri preverjanju dovoljene količine armature upoštevamo celotno količino armature [6].

4.3 Omejitev količine armature

Standard Evrokod predpisuje spodnjo in zgornjo mejo vzdolžne armature v prečnem prerezu. Za primer nosilcev je določena:

- Najmanjša armatura:

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \geq 0,0013 \cdot b_t \cdot d$$

- Največja armatura:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c$$

5 MEJNO STANJE UPORABNOSTI

Pri projektiranju moramo, poleg mejnega stanja nosilnosti, zadostiti tudi mejnemu stanju uporabnosti. Za razliko od mejnega stanja nosilnosti, ki zagotavlja varnost proti porušitvi, v mejnih stanjih uporabnosti dokazujemo uporabnost konstrukcije pri različnih nivojih delovanja obtežb. Pri mejnem stanju uporabnosti poznamo tri kombinacije vplivov:

- karakteristična kombinacija vplivov:

$$E_{d,rare} = E \left\{ \sum G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{q,i} \right\}$$

- pogosta kombinacija vplivov:

$$E_{d,freq} = E \left\{ \sum G_{k,j} + P_k + \Psi_1 \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{q,i} \right\}$$

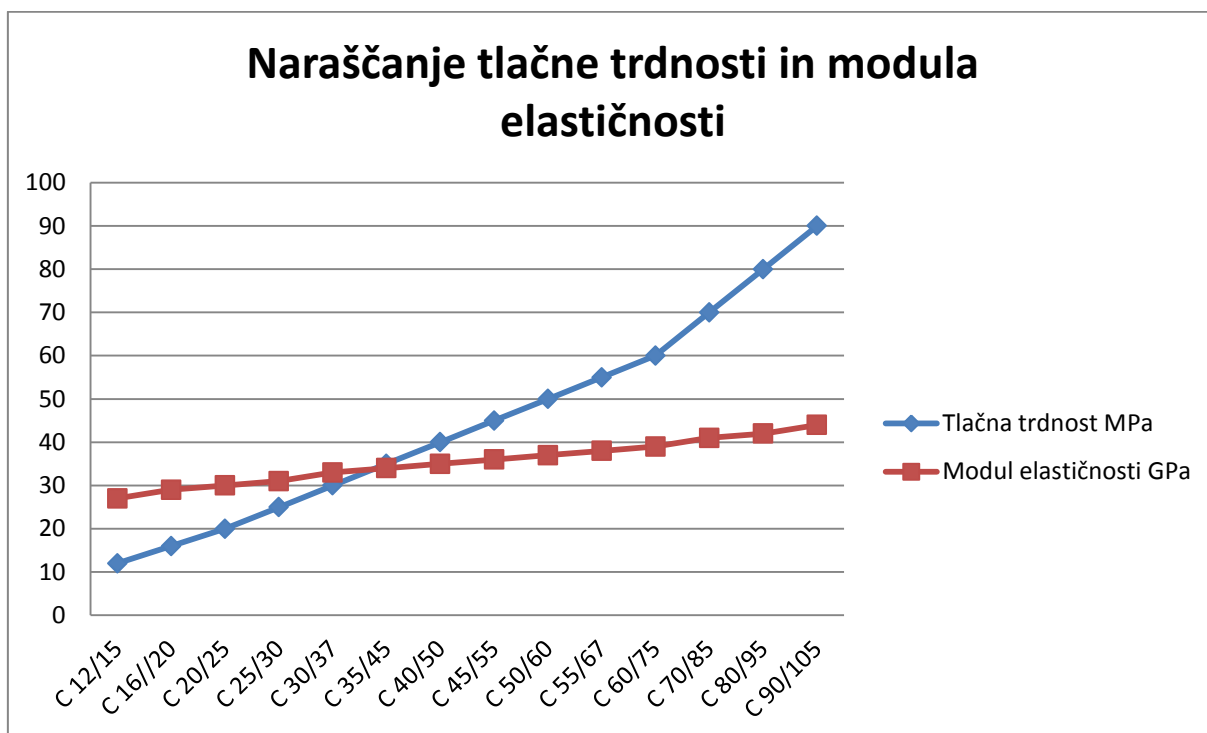
- navidezno stalna kombinacija vplivov:

$$E_{d,perm} = E \left\{ \sum G_{k,j} + P_k + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{q,i} \right\}$$

Oznaka '+' pomeni kombiniranje vplivov. V primeru, da imamo več različnih spremenljivih obtežb in različnih kombinacijskih faktorjev, iščemo najbolj neugodno varianto.

V okviru mejnega stanja uporabnosti je potrebno kontrolirati napetosti, vibracije, pomike in razpoke. V večini primerov sta merodajni mejno stanje napetosti in mejno stanje pomikov.

Današnja tehnologija omogoča proizvodnjo betonov in armature visokih trdnosti. Trdnost materialov se je bistveno spremenila, modul elastičnosti pa se s povečevanjem trdnosti ne povečuje sorazmerno, povečuje se bistveno počasneje. Ker je poveselementa, ki ga je potrebno preveriti v sklopu mejnega stanja uporabnosti, bolj odvisen od njegove togosti, se izkaže, da se dobre lastnosti visokotrdnih betonov, kot je na primer visoka tlačna trdnost, ne morejo v polnosti izkoristiti. Na naslednji sliki je prikazano naraščanje tlačne trdnosti in modula elastičnosti v odvisnosti od trdnostnega razreda betona.



Slika 7 : Primerjava naraščanja tlačne trdnosti in modula elastičnosti betona v odvisnosti od trdnostnega razreda betona

5.1 Mejno stanje razpok

Omejitev razpok je potrebna zaradi preprečevanja neugodnih vplivov okolja na konstrukcijske elemente. Največje širine razpok so določene v odvisnosti od stopnje agresivnosti in vrste konstrukcije [4].

Računsko širino razpoke določimo po naslednjih enačbi:

$$w_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$S_{r,max}$ je največja medsebojna razdalja med razpokami. Odvisna je od krovnega sloja, koeficienta K_1 , s katerim upoštevamo pogoje sidranja, koeficienta K_2 , ki upošteva razporeditev deformacij po prerezu, premera palice in učinkovite stopnje armiranja $\rho_{p,eff}$.

$$S_{r,max} = 3,4 \cdot c + 0,424 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \phi / \rho_{p,eff}$$

Učinkovita stopnja armiranja je definirana kot:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi 1^2 \cdot A_p}{A_{c,eff}}$$

Kjer je:

A_p ... prerez prednapetih kablov v učinkoviti coni dela betonskega prereza A_{ceff} ,

$A_{c,eff}$... učinkoviti del prereza odvisnosti od $h_{c,eff}$,

ξ_1 ... prireditveno razmerje sprejemne trdnosti,

ε_{sm} ... srednja deformacija armature pod vplivom ustrezne obtežbe,

ε_{cm} ... srednja deformacija betona med razpokami,

σ_s ... napetost v natezni armaturi ob predpostavki, da je prerez razpokan,

K_t ... faktor, ki je odvisen od trajanja obtežbe,

$f_{ct,eff}$... učinkovita natezna trdnost betona.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - K_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Razpoke se kontrolirajo pri navidezno stalni obtežni kombinaciji [2].

5.2 Mejno stanje vibracij

Mejno stanje vibracij je lahko merodajno za posebne konstrukcije in v standardu ni dovolj natančno obravnavano [2]. Vibracije lahko povzročijo dve vrsti problemov. V prvem primeru je to občutek nezanesljivosti konstrukcije pri uporabnikih, v drugem primeru lahko imajo vibracije velike vplive na občutljive elemente [5].

5.3 Mejno stanje napetosti

Pri mejnem stanju uporabnosti moramo omejiti tudi napetosti. Z določenimi omejitvami zagotovimo, da veljajo temeljne predpostavke glede računskih modelov, predvsem linearno elastično obnašanje, in da se bistveno ne poslabša stanje elementov zaradi cepljenja betona ali prevelikega razpokanja.

- Omejitev napetosti v betonu:
 - za betone razreda izpostavljenosti XD, XF in XS je potrebno zaradi preprečitve vzdolžnih razpok v betonu, tlačne napetosti pri karakteristični kombinaciji vpliv omejiti do vrednosti: $\sigma_c \leq 0,6 f_{ck}$
 - tlačna napetost v betonu pri navidezno stalni kombinaciji vplivov: $\sigma_c \leq 0,6 f_{ck}$
- Napetosti v jeklu omejimo zato, da preprečimo neelastično razpokanje betona, oziroma ustvarjanje razpok, ki se ne zaprejo po zmanjševanju obtežbe. Napetosti v jeklu preverimo pri karakteristični kombinaciji vplivov. največja napetost v mehki armaturi je omejena z izrazom: $\sigma_s \leq 0,6 f_{yk}$.

Pri analizi največjih napetosti je potrebno izključiti natezno cono betona. Lahko upoštevamo Hookov zakon. V primeru, da imamo samo upogibni moment M_{Ed} , brez osne sile, izračun višine tlačne cone v dvojnarmiranem prerezu določimo z naslednjim izrazom:

$$x = \sqrt{\frac{(\alpha \cdot A_s' + \alpha \cdot A_s)^2}{b^2} + \frac{2 \cdot (\alpha \cdot A_s' \cdot \alpha' + \alpha \cdot A_s \cdot d)}{b}} - \frac{\alpha \cdot A_s' + \alpha \cdot A_s}{b} \quad \alpha = E_s / E_{cm}$$

x ... višina tlačne cone

A_s ... količina natezne armature

A_s' ... količina tlačne armature

b ... širina prereza

α' ... višina krovnege sloja na tlačnem robu

d ... statična višina

E_{cm} ... modul elastičnosti betona

σ_s' ... napetost v tlačni armaturi

σ_s ... napetost v natezni armaturi

Napetost v tlačni armaturi pri znani višini tlačne cone x lahko dobimo po naslednjem izrazu:

$$\sigma_s' = \sigma_s \cdot (x - \alpha') / (d - x)$$

Iz momentnega ravnotežnega pogoja na mesto delovanje tlačne sile dobimo napetost v natezni armaturi σ_s :

$$M_{Ed} = \sigma_s \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3}\right) + \sigma_s' \cdot A_s' \cdot (x/3 - d)$$

$$M_{Ed} = \sigma_s \cdot \left[A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3}\right) + A_s' \cdot \left(\frac{x}{3} - \alpha'\right) \cdot \frac{(x - \alpha')}{(d - x)} \right]$$

$$\sigma_s = 3 \cdot M_{Ed} / \left[A_s \cdot (3d - x) + A_s' \cdot (x - 3\alpha') \cdot \frac{(x - \alpha')}{(d - x)} \right]$$

Tlačno napetost v betonu σ_c dobimo s pomočjo naslednje zveze:

$$\sigma_c = \sigma_s \cdot x / (\alpha \cdot (d - x))$$

V programu sem, za račun napetosti v betonu in armaturi, uporabil predhodno navedene izraze.

5.4 Mejno stanje pomikov

Pomik oziroma povese je relativen pomik glede na zveznico podpor. Preverjamo samo relativne pomike, ne pa celotne pomike, ki so odvisni od drugih sklopov konstrukcij (npr. skrček stebrov) [2].

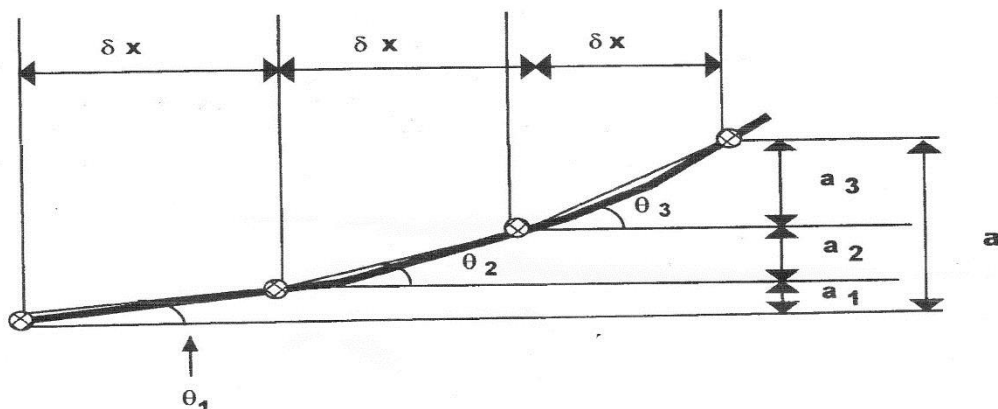
Za omejitev pomikov obstaja več razlogov. Vidni povesi dajejo uporabniku občutek nevarnosti. Funkcionalnost konstrukcije je lahko omejena, če so pomiki preveliki. Nekonstrukcijski elementi so po navadi občutljivi na pomike, ki so večji kot dovoljeni. Nastanek velikih pomikov lahko povzroči vibracije, katere lahko poškodujejo posebne elemente konstrukcije [5].

Mejna vrednost povesev je določena s standardom SIST EN 1992-1-1. Primeren videz in popolno funkcionalnost zagotavlja povese, ki ne preseže 0,4 % dolžine razpona. Pričakuje se, da do poškodb nekonstruktivnih elementov in opreme ne pride v primeru, ko so povesi manjši kot 0,2 % razpetine [2].

Izraz za določitev pomika se izpelje iz ukrivljenosti. Upoštevamo predpostavko, da je material elastičen. Uvedemo parameter K , ki označuje ukrivljenost. K lahko definiramo z največjim radijem, ki ga lahko opišemo v določeni točki:

$$K = 1/r \quad K = M/(E \cdot I)$$

Kot θ je definiran kot integral ukrivljenosti, oziroma sprememba kota med dvema točkama je enaka integralu ukrivljenosti med tema dvema točkama.



Slika 8: Izračun povese [5]

$$\theta = \int \left(\frac{1}{r} \right) dx$$

Če celotno območje razdelimo na enake segmente, vidimo, da je celoten pomik »a« enak seštevku delnih sprememb. Dolžina a_i je enaka produktu dolžine δx in sinusa kota Θ . Upoštevamo predpostavko, da so zasuki in pomiki majhne količine in lahko poenostavimo izraz: $\sin \Theta = \Theta$.

Z upoštevanjem navedenih predpostavk vidimo, da je pomik a_i izražen kot:

$$a_i = \delta x \cdot \theta$$

Celoten pomik lahko zapišemo kot vsoto delnih pomikov :

$$a = \delta x \cdot \theta_1 + \delta x \cdot \theta_2 + \delta x \cdot \theta_3 + \delta x \cdot \theta_4 = \sum_{i=1} \delta x \cdot \theta_i$$

Upoštevamo, da se diferencial δx približuje vrednosti 0, zaradi tega lahko zgornji izraz spremenimo v integral.

$$a = \int (\theta) dx$$

Kot θ smo definirali kot integral ukrivljenosti, upoštevamo zvezo med izrazi in dobimo

$$a = \int \int \left(\frac{1}{r}\right) dx .$$

Upoštevamo predpostavko, da ravni prerezi ostanejo tudi v deformirani legi ravni.

$$1 / R = M / (E \cdot I)$$

Končni pomik je definiran kot:

$$a = \int \int (M / (E \cdot I)) dx .$$

Za primer prostoležečega nosilca je funkcija momenta zapisana kot:

$$M(x) = q \cdot \frac{L \cdot x}{2} - \frac{q \cdot x^2}{2} .$$

Da bi dobili končni pomik, je potrebno enačbo dva krat integrirati z upoštevanjem robnih pogojev. Ta korak je v diplomski nalogi izpuščen. Največji pomik na prostoležečem nosilcu je na mestu največjega momenta in znaša:

$$a_{max} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} .$$

Maksimalni pomik mora biti večji od dovoljenega [5].

Pri računu pomikov je potrebno upoštevati tudi prispevek krčenja betona. Ukrivljenost je odvisna od deformacije krčenja, razmerja modulov elastičnosti jekla in betona, statičnega momenta prereza armature glede na težišče betonskega prereza in vztrajnostnega momenta prereza.

$$\frac{1}{r_{cs}} = \alpha \cdot S \cdot \varepsilon_{cs} / I$$

V primeru, da je natezna napetost v prerezu večja kot natezna trdnost betona, beton razpoka in moramo upoštevati razpokan prerez. Potrebno je izračunati vztrajnostni moment razpokanega prereza. Za element, obremenjen samo z upogibnim momentom, je tlačna cona določena z izrazom:

$$x = \frac{1}{2b} \cdot (-2 \cdot \alpha \cdot (A_s + A_s') + \sqrt{\alpha \cdot [(4 \cdot \alpha \cdot (A_s + A_s'))^2 + 8b \cdot (d \cdot A_s + a' \cdot A_s')]})$$

Vztrajnostni moment razpokanega prereza podaja izraz:

$$I(2) = b \cdot \frac{h^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x)^2 + \alpha_e \cdot A_s' \cdot (x - a')^2$$

Za grobo oceno pomikov lahko uporabimo izraz, ki je podan v standardu SIST EN 1992-1-1,

$$w = \zeta \cdot w(2) + (1 - \zeta) \cdot w(1) \quad \zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}} \right)$$

kjer je indeks 1 oznaka za nerazpokan prerez, indeks 2 pa za razpokan. ζ je razdelitveni koeficient, ki upošteva sodelovanje betona pri prevzemu nateznih napetosti. V primeru nerazpokanega prereza je koeficient ζ enak nič. Koeficient β upošteva vpliv trajanja obtežbe. Upogibni moment, ki povzroči prvo razpoko, je definiran kot M_{cr} [2]. Pri računu pomika je potrebno upoštevati efektivni modul elastičnosti, ki je odvisen od koeficienta lezenja in je določen v standardu SIST EN 1992-1-1v Dodatku B, in sicer v točki B1.

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

Kjer je :

$E_{c,eff}$... efektivni modul elastičnosti,

E_{cm} ... modul elastičnosti,

φ ... koeficient lezenja.

Pomik zaradi krčenja betona je neodvisen od obtežbe.

$$K = \varepsilon_{cs} \cdot A_s \cdot \alpha \cdot (d - x) / I$$

Pomik zaradi krčenja podaja naslednji izraz:

$$w_{krčenja} = l^2 \cdot K / 8 \quad [4]$$

6 OPTIMIZACIJA

Optimalna rešitev problema je tista, ki izmed vseh možnih rešitev, na osnovi predpisanih pogojev mejnega stanja nosilnosti in mejnega stanja uporabnosti, poda najnižjo ceno betonskega nosilca. Rešitev je odvisna od kriterija, ki ga uporabnik poda. Kriterijska funkcija je lahko minimalna cena nosilca, minimalna uporaba armature ali betona, določen pomik ali maksimalna odpornost prereza. V svoji diplomski nalogi sem izbral kriterij minimalne cene celotnega nosilca. Za iskanje rešitev sem uporabil program Microsoft Excel, ki omogoča uporabo dodatka Solver – Reševalec. Le-ta uporablja za reševanje nelinearnih enačb Newtonovo metodo.

Neznanki v enačbah sta širina in višina prereza. Na osnovi teh neznank program določi potrebno armaturo. Končna cena nosilca je odvisna od vgrajenega materiala in količine armature. Funkcijo cene lahko zapišemo na naslednji način:

$$C = F (\text{tip konstrukcije, obtežbe, dolžine nosilca, višine in širine prereza, količine armature})$$

Rešitev sistema mora biti takšna, da je nosilnost prereza večja od obremenitve.

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \text{ in } N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

Odpornost prereza je odvisna od dimenzij betonskega prereza, mehanskih lastnosti betona in armature in količine armature. Potrebno odpornost AB prereza lahko zagotovimo na več načinov. Za vsako rešitev dobimo ustrezen volumen betona in količino armature. Na osnovi kriterijske funkcije Reševalec prikaže »najboljšo« rešitev. Iščemo takšno rešitev funkcije, da je izpolnjen pogoj :

$$Cena \rightarrow \min$$

Za vsak trdnostni razred betona rešujemo problem. Končna cena elementa je odvisna od cene betona in cene armature. Izraz lahko napišemo kot:

$$Cena = V_b [m^3] \cdot C_b \left[\frac{\text{€}}{m^3} \right] + K_a [kg] \cdot C_a \left[\frac{\text{€}}{kg} \right]$$

Kjer je:

V_b – volumen betona

C_b – cena betona

K_a – količina armature

C_a – cena armature

Na osnovi izračunanih rezultatov za posamezen beton lahko naredimo posplošitev in ugotovimo za določen primer nosilca, katera rešitev je na osnovi kriterijske funkcije - minimalne cene najbolj ekonomična. Rezultati analize so dimenzije prečnega prereza betona, količina potrebne armature in trdnostni razred betona.

7 OPIS PROGRAMA ZA OPTIMALNO DIMENZIONIRANJE ELEMENTOV

Pri svojem programiranju sem v okviru ponudbe računalniškega okolja "Microsoft Office" uporabil program Excel. Zaradi določenih predpostavk, omenjenih predhodno, s katerimi sem poenostavil izračun, je zmogljivost programa Excel primerna za reševanje določenih problemov. Če bi želeli problem bolj natančno reševati, bi bilo potrebno uporabiti ustreznejše programe.

7.1 Vhodni podatki

Na začetku reševanja problema je potrebno v program podati ustrezne faktorje varnosti, obtežbo, lastnosti armature, dimenzije prečnega prereza, omejitve razpok in pomikov, cene betonov in koeficiente lezenja in krčenja.

Faktorji varnosti so predpisani za tip konstrukcije v standardu.

Preglednica 2: Vpis varnostnih in kombinacijskih faktorjev

Faktorji varnosti		
Faktor za stalno obtežbo	γ_g	1,35
Faktor za spremenljivo obtežbo	γ_q	1,5
Kombinacijski faktor za karakteristično kombinacijo	Ψ_0	0,7
Kombinacijski faktor za pogosto kombinacijo	Ψ_1	0,6
Kombinacijski faktor za navidezno stalno kombinacijo	Ψ_2	0,3
Faktor varnosti za beton	γ_c	1,5
Faktor varnosti za jeklo	γ_s	1,15

Vrste obtežb.

Preglednica 3: Vpis obtežb

Obtežba, ki deluje na konstrukcijo			
Stalna obtežba	g	10	kN/m
Spremenljiva obtežba	q	12	kN/m
Stalna osna sila	G	100	Kn
Spremenljiva osna sila	Q	120	Kn

Lastnosti armature.

Preglednica 4: Karakteristike armature

Armatura S500			
Modul elastičnosti	E_s	200000	Mpa
Karakteristična natezna trdnost	f_{yk}	500	Mpa
Projektna natezna trdnost	f_{vd}	434,78	Mpa
Cena kilograma armature	C_a	1,2	EUR/kg

Določimo dolžino nosilca in maksimalne dimenzije prečnega prereza.

Preglednica 5: Vpis geometrijskih karakteristik

Geometrija konstrukcije			
Dolžina nosilca	l	5	m
Minimalna širina	b_{min}	0,1	m
Maksimalna širina	b_{max}	0,4	m
Minimalna višina	h_{min}	0,1	m
Maksimalna višina	h_{max}	0,6	m
Spodnji krovni sloj	a	0,05	m
Zgornji krovni sloj	a'	0,04	m

Omejitev maksimalnih razpok in maksimalnih povosov.

Preglednica 6: Omejitve razpok in povosov

Omejitve za mejna stanja uporabnosti			
Maksimalna razpoka		0,3	mm
Maksimalen povos L/X	$X=$	250	/

Cene betonov je potrebno določiti na osnovi ponudbe na trgu. V naslednji preglednici je primer ponudbe.

Preglednica 7: Cene betonov

Cena betona		
C 12/15	57,48	EUR/m ³
C 16/20	63,72	EUR/m ³
C 20/25	66,24	EUR/m ³
C 25/30	72,6	EUR/m ³
C 30/37	82,44	EUR/m ³
C 35/45	88,8	EUR/m ³
C 40/50	94	EUR/m ³
C 45/55	100,44	EUR/m ³
C 50/60	108	EUR/m ³
C 55/67	125	EUR/m ³
C 60/75	142	EUR/m ³
C 70/85	159	EUR/m ³
C 80/95	176	EUR/m ³
C 90/105	193	EUR/m ³

V standardu Evrokod 2 je definirano, kako določimo koeficiente lezenja in krčenja. V splošnem jih je potrebno določiti. V tej prilogi so podatki, prevzeti iz vaj [6].

Preglednica 8: Koeficienti lezenja in krčenja

Koeficient lezenja za beton		Koeficient krčenja	
C 12/15	2,3	C 12/15	0,00033
C 16/20	2,3	C 16/20	0,00033
C 20/25	2,3	C 20/25	0,00033
C 25/30	2,3	C 25/30	0,00033
C 30/37	2,3	C 30/37	0,00033
C 35/45	2,3	C 35/45	0,00033
C 40/50	2,3	C 40/50	0,00033
C 45/55	2,3	C 45/55	0,00033
C 50/60	2,3	C 50/60	0,00033
C 55/67	2,3	C 55/67	0,00033
C 60/75	2,3	C 60/75	0,00033
C 70/85	2,3	C 70/85	0,00033
C 80/95	2,3	C 80/95	0,00033
C 90/105	2,3	C 90/105	0,00033

7.2 Uporabljene funkcije

Za vsak beton je izdelan program, ki preverja mejna stanja nosilnosti in mejna stanja uporabnosti. Vpisati je bilo potrebno vse funkcije za izračun predpisanih kontrol. Uporabljene so enačbe, ki so razložene v prvem delu diplomske naloge. Na začetku računa sta višina in širina neznana parametra. Uporabljamo funkcijo Solver – Reševalec, s katero določimo ustrezno višino in širino prečnega prereza. Cilj reševanja enačb je določitev minimalne cene celotnega nosilca. Ciljno funkcijo lahko spremenimo tako, da omejimo napetost, pomik ali razpoko elementa. Tema diplomske naloge je določitev minimalne cene celotnega elementa. Rešitve sistema omejimo z naslednjimi pogoji:

$$A_{s,min} \leq A_s \text{ dejansko}$$

$$A_s \text{ dejansko} \leq A_{s,max}$$

$$h \leq H_{max}$$

$$h \geq H_{min}$$

$$b \leq B_{max}$$

$$b \geq B_{min}$$

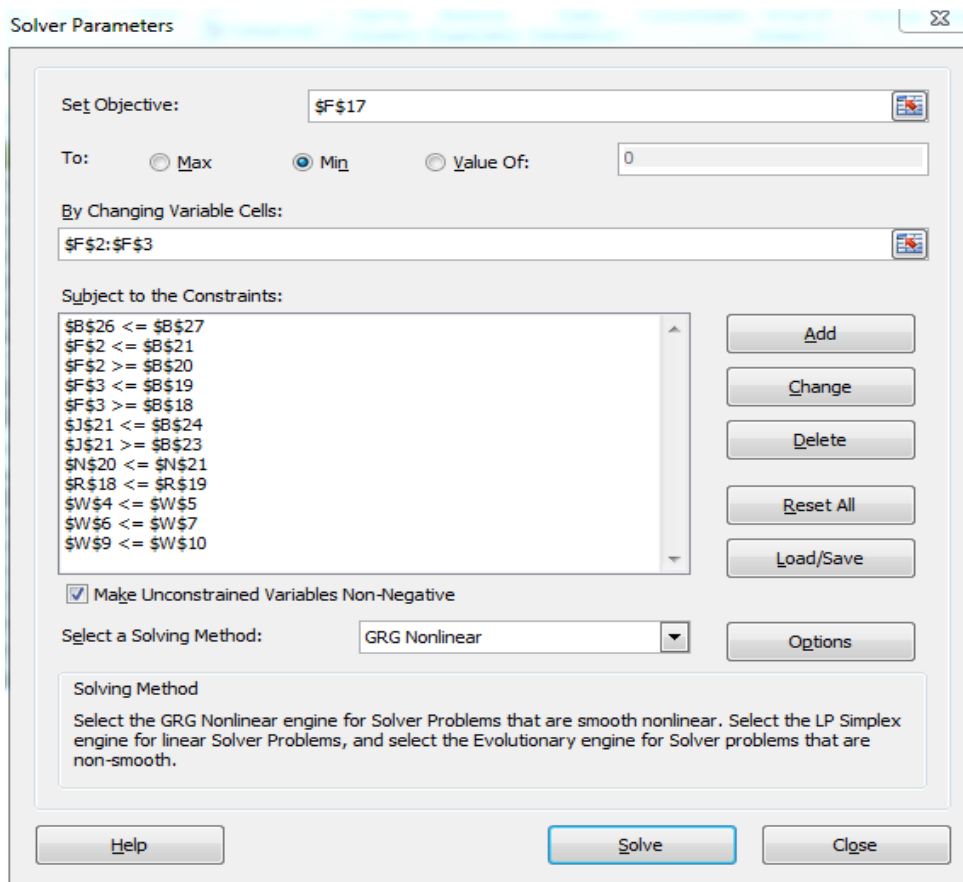
$$w \text{ dejanski pomik} \leq w \text{ dovoljeno}$$

$$\text{razpoka} \leq \text{dovoljena razpoka}$$

$$\text{napetost v armaturi} \leq \text{dovoljena napetost v armaturi}$$

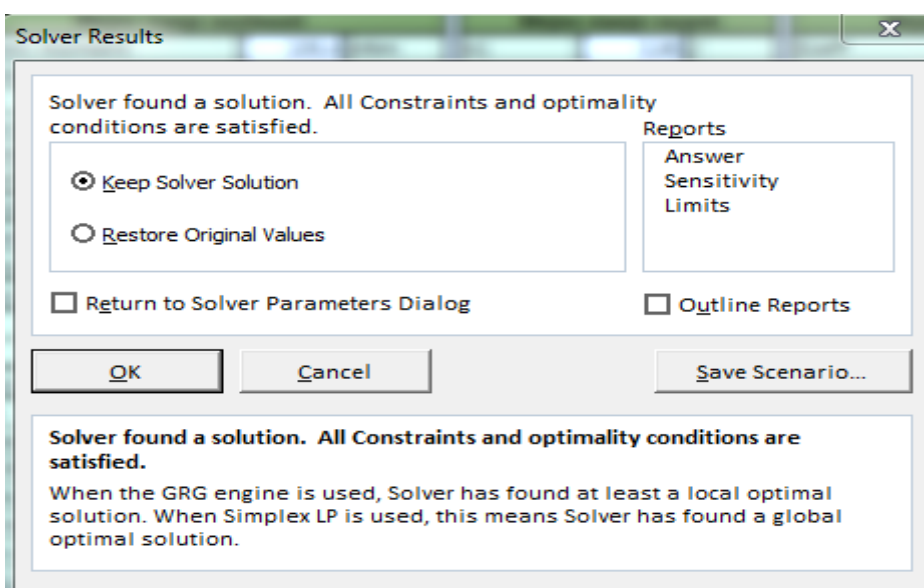
$$\text{napetost v betonu pri navidezno stalni komb.} \leq \text{dovoljena napetost}$$

$$\text{napetost v betonu pri karakteristični komb.} \leq \text{dovoljena napetost}$$



Slika 9: Prikaz funkcije Reševalec

Reševalec išče minimum funkcije, in to so rešitve sistema. V primeru, da Reševalec poišče rešitve sistema, dobimo obvestilo, da so vsi pogoji izpolnjeni.



Slika 10: Prikaz okna v primeru, da obstaja rešitev

Kontrola mejnega stanja nosilnosti je prikazana v posebni preglednici. V prvem koraku program izračuna projektni upogibni moment, v katerem upošteva tudi lastno težo nosilca. Na osnovi tlačne trdnosti betona določimo ustrezne koeficient K_d , ki pokaže, ali je potrebna enojna ali dvojna armatura. Zaradi omejitve deformacije jekla moramo izbrati odgovarjajoč koeficient, ki je manjši ali enak mejnemu koeficientu K_d . Na podlagi ustreznega koeficienta K_s določimo potrebno količino armature. Postopek za izračun dvojne armature je detajlno prikazan v poglavju 4.

Preglednica 9: Prikaz izračuna armature po mejnem stanju nosilnosti

Mejno stanje nosilnosti			
Projektni moment	M_{Ed}	60,7	kNm
Projektna osna sila	N_{Ed}	0,0	kN
Projektni moment na mesto armature	M_{Eds}	60,7	kNm
Tlačna trdnost betona	f_{ck}	30,0	MPa
Projektna trdnost jekla	f_{yd}	434,8	Mpa
K_d koeficient		0,1352	/
Če je K_d večji kot K_d , rabimo dvojno armaturo			
Kd mejni za to vrsto betona:		0,2765	/
Rabimo :		enojno armaturo	
Izračun enojne armature			
K_s		1,121	/
A_s		4,9	cm ²
Izračun dvojne armature			
M_{max}		0	kNm
A_s		0,0	cm ²
ΔM		0,0	kNm
ΔA_s		0,0	cm ²
Natezna armatura	A_s	4,9	cm ²
Tlačna armatura	A_s'	0,0	cm ²
Skupaj armature		4,9	cm ²

Kontrole mejnega stanja uporabnosti so razdeljene v posamezne preglednice. Vsako kontrolo lahko izklopimo. Tako vidimo, katera kontrola je dejansko merodajna za določen beton. V primeru, da nas ne zanima pomik nosilca, lahko izklopimo kontrolo pomikov. Na podlagi enačb, ki so opisane v poglavju 5, so določene velikosti razpok, pomikov in napetosti. Pri svojih analizah sem vpliv osne sile zanemaril, ker imamo opravka z veliko ekscentričnostjo in zato je vpliv osne sile bistveno manjši kot vpliv upogibnega momenta.

Preglednica 10: Kontrola mejnega stanja uporabnosti

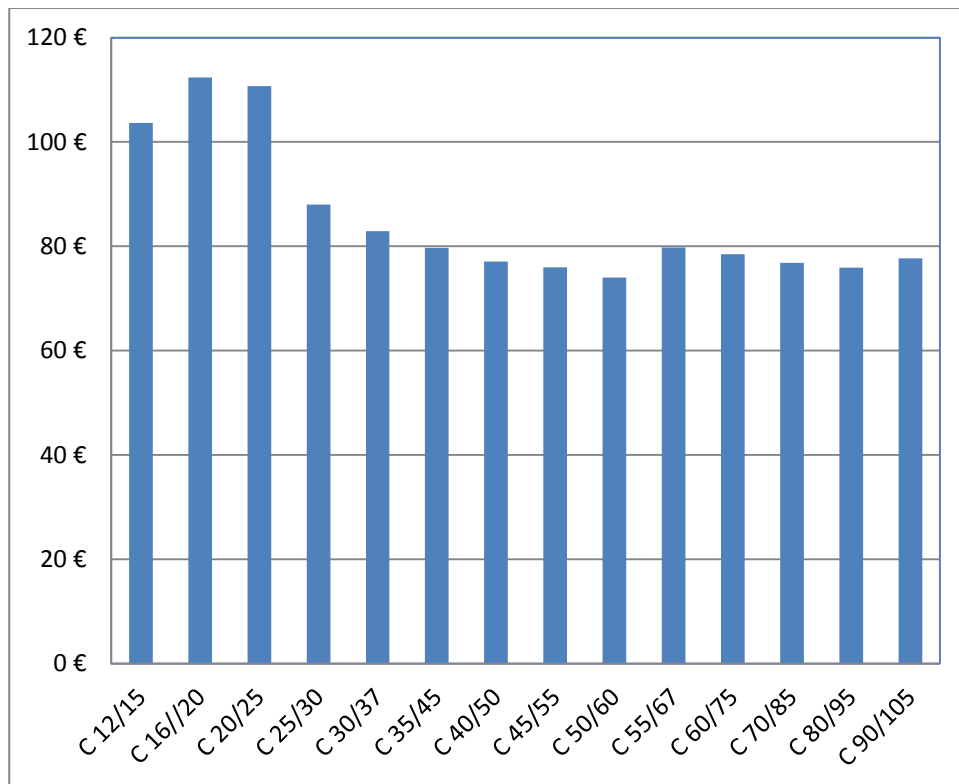
Mejno stanje razpok			Mejno stanje pomikov		
K_1	0,80	/	$E_{c,eff}$	1090,91	kN/cm ²
K_2	0,50	/	q_{ed}	13,86	kN/m
E_s	20000,00	kN/cm ²	M_{Ed}	27,72	kNm
E_c	3600,00	kN/cm ²	M_{cr}	12,68	kNm
α	5,56	/	β	0,50	/
ϕ	16,00	mm	ζ	0,90	/
c	4,20	cm	α	18,33	/
x	9,16	cm	x	14,54	cm
h_{ceff}	9,23	cm	I nerazpokan	77704,59	cm ⁴
A_{ceff}	136,04	cm ²	I razpokan	30754,56	cm ⁴
ρ_{eff}	0,04	/	w lezenja	1,29	cm
S_{rmax}	217,98	mm	ε_{sc}	0,000330	/
$M_{Ed,msu}$	27,72	kNm	K nerazpokano	0,000005	1/r
σ_s	19,60	kn/cm ²	K razpokano	0,000017	1/r
K_t	0,60	/	K celoten	0,000016	1/r
$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sc}$	0,0006	/	pomik krčenja	0,31	cm
$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sc}$	0,0006	/	celoten pomik	1,60	cm
$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sc} Max$	0,0006	/	dovoljen pomik	1,60	cm
razpoka	0,13	mm	Upoštevaj kontrolo		da
dovoljena	0,30	mm			
Upoštevaj kontrolo		da			

Omejitev napetosti		
M_{Ed} , navidezno stalna	27,72	kNm
Nevtralna os pri (nav. stal. obte)	9,16	cm
Napetost v armaturi (nav. stal. obte)	25,96	kn/cm ²
Maksimalna napetost v armaturi (nav. stal. obte)	40,00	kn/cm ²
Napetost v betonu (nav.stal. obt)	1,89	kn/cm ²
Maksimalna nap v betonu (nav. stal. obt)	2,03	kn/cm ²
M_{Ed} , karakteristično	36,72	kNm
Napetost v betonu (karakter.)	2,50	kn/cm ²
Maksimalna nap v betonu (karakter)	2,70	kn/cm ²
Upoštevaj prvo kontrolo	da	
Upoštevaj drugo kontrolo	da	
Upoštevaj tretjo kontrolo	da	

7.3 Primerjanje rezultatov

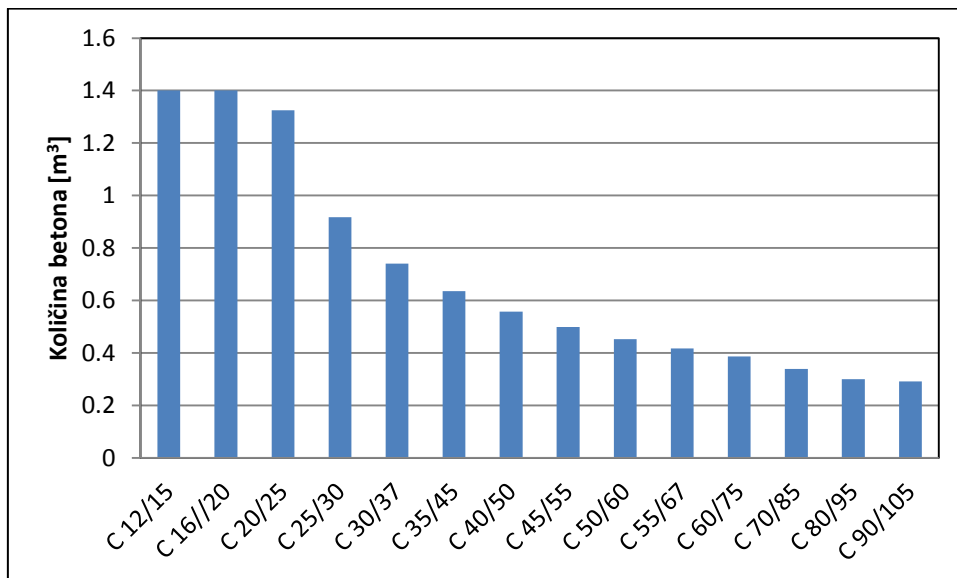
Za vsak trdnostni razred betona dobimo geometrijske karakteristike in potrebno količino armature. Na podlagi prereza izračunamo količino uporabljenega materiala. Ceno jekla računamo na kilogram materiala, ceno betona definiramo na osnovi prostornine. Za vsak beton je potrebno določiti nabavno ceno, ki jo vpišemo v prvi del programa. V ceno betona je lahko všteti transport, opaževanje in nega betona. V primeru, ki sem ga predstavil, je podana samo cena proizvodnje betona. Pomembno je, da primerjamo enake ponudbe, kar pomeni, da ne moremo pri ceni enega trdnostnega razreda betona upoštevati samo proizvodnjo, pri drugem pa na primer tudi transport in vgradnjo.

V diplomski nalogi so predstavljene cene s trga. Določene cene so iz dejanskih cenikov enega od proizvajalcev. Skupna cena nosilca je sestavljena iz stroška armature in betona. Na sliki 10 lahko vidimo, kateri beton je najbolj ekonomičen glede na izbrano dolžino nosilca in obtežni primer.



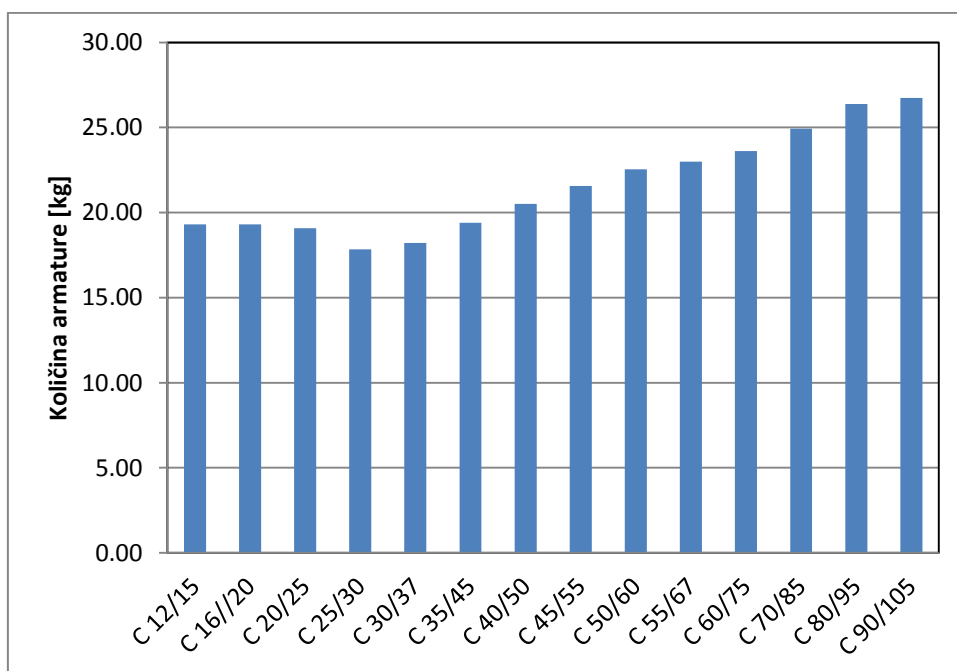
Slika 11: Splošen prikaz cene nosilcev, izdelanih iz betonov različnih trdnostnih razredov

V primerih, ko nas cena ne zanima, želimo pa uporabiti čim manj materiala, pogledamo, pri kateri vrsti betona je količina uporabljenega materiala najmanjša.



Slika 12: Splošen prikaz količine uporabljenega betona za nosilec

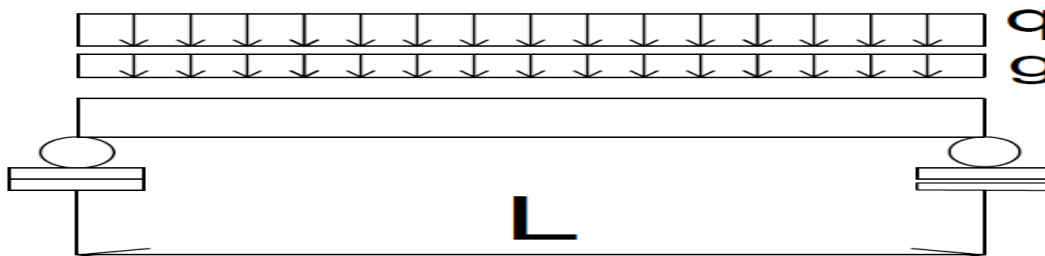
Potrebna količina armature se lahko prikaže na podoben način. V primerih, da je cena armature bistveno drugačna, se količina uporabljenega betona in armature spremeni.



Slika 13: Primer uporabljene količine armature

8 RAČUNSKA PRIMERA OPTIMALNEGA DIMENZIONIRANJA NOSILCA

V tem poglavju sta predstavljena dva računski primera. V enem je podan prostoležeči nosilec s konstantno dolžino. V drugem primeru obravnavamo enak obtežni primer, le da spreminjamo dolžino nosilca od 4 do 10 metrov. Statični model je prikazan na naslednji sliki.



Slika 14: Statični model

8.1 Nosilec konstantne dolžine

Obravnavamo nosilec, za katerega podamo vse parametre, razen višine in širine prečnega prereza. Prikazal bom, kako določena kontrola mejnega stanja uporabnosti vpliva na ceno celotnega nosilca.

Podatki:

$$l = 5m$$

$$g = 10 \frac{kN}{m}$$

$$q = 12 \frac{kN}{m}$$

$$h_{max} = 0,7m$$

$$h_{min} = 0,1m$$

$$b_{max} = 0,4m$$

$$b_{min} = 0,1m$$

$$\frac{h}{b} max = 3$$

$$a = 0,04m$$

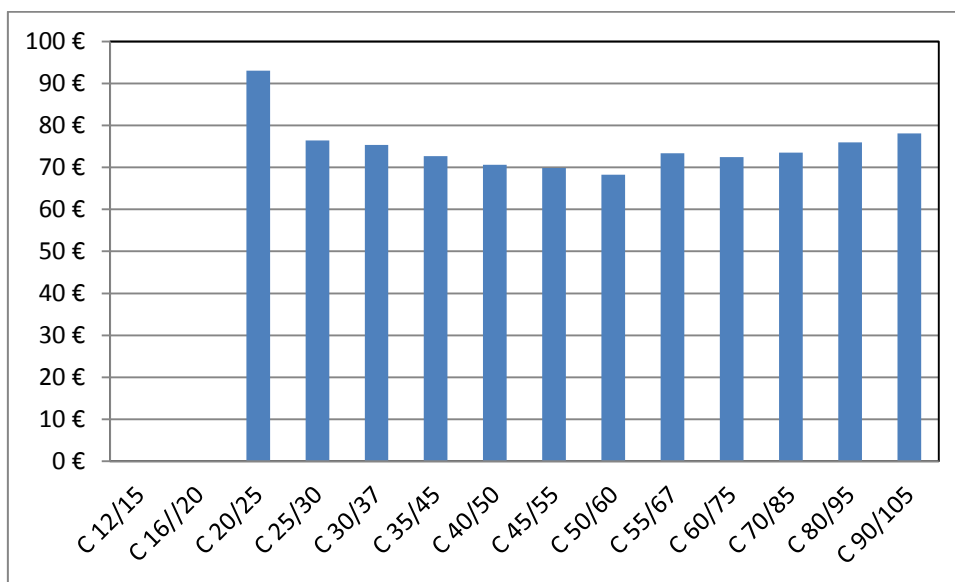
$$a' = 0,03m$$

$$cena \text{ kilograma armature} = 1,2 \frac{\text{€}}{kg}$$

Cene vseh betonov so podane v prilogi C. Cene visokotrdnih betonov niso navedene v ceniku. Na osnovi raziskav, prevzetih iz vira št. 8, je cena visokotrdnega betona C90 2,03 krat večja od običajnega betona. Na podlagi tega sem določil ceno betona trdnostnega razreda C90. Cene ostalih visokotrdnih betonov sem interpoliral[8].

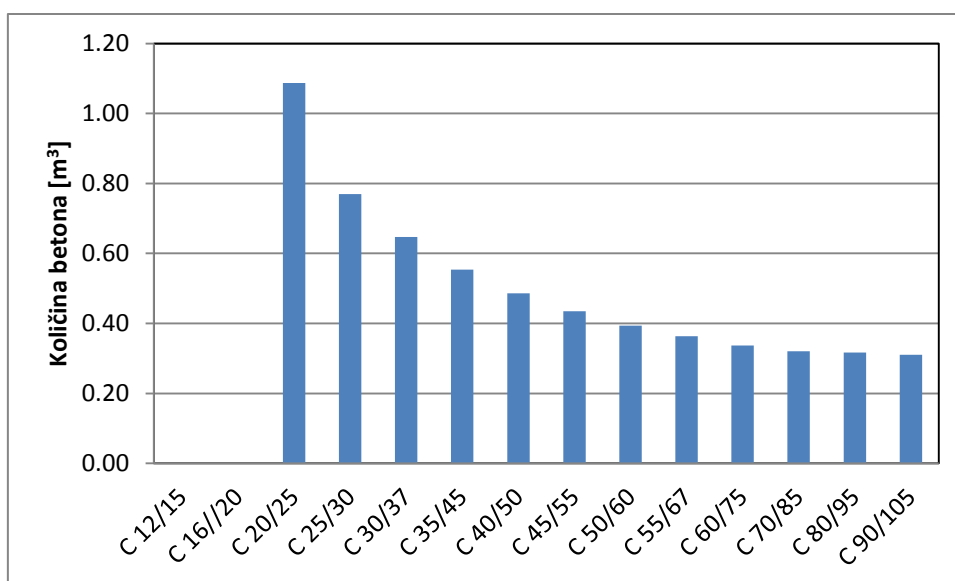
8.1.1 Upoštevanje vseh kontrol v mejnem stanju nosilnosti in uporabnosti

Kontroliramo mejno stanje nosilnosti, mejno stanje pomikov, razpok in napetosti. Upoštevamo tudi maksimalno razmerje širine in višine. Zaradi omejitve maksimalne višine in maksimalnih napetosti v mejnem stanju uporabnosti z betoni C12/15 in C16/20 tako obremenjenega nosilca ne moremo izvesti. Izkaže se, da je najbolj ekonomična uporaba betona C50/C60.



Slika 15: Cene nosilca v primeru 1.1

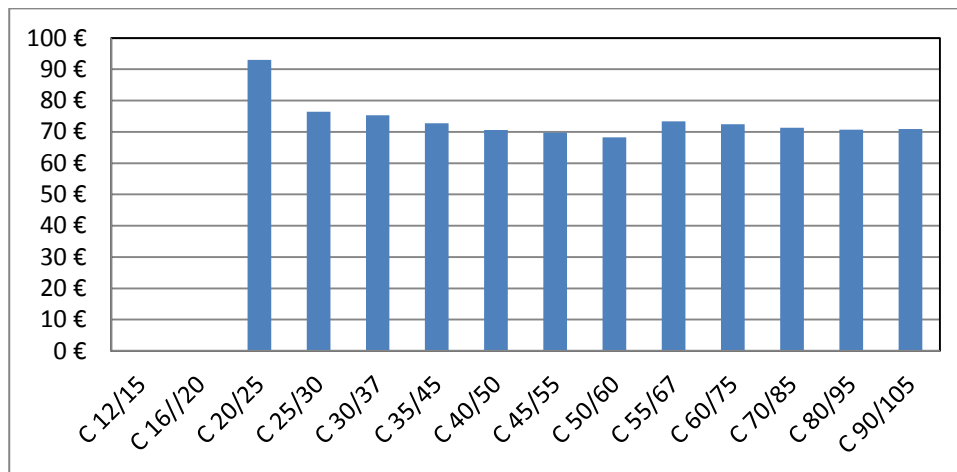
V ceni nosilca ni velike spremembe, ampak je količina uporabljenega materiala bistveno manjša, če uporabljamo visokotrde betone.



Slika 16: Poraba betona v primeru 1.1

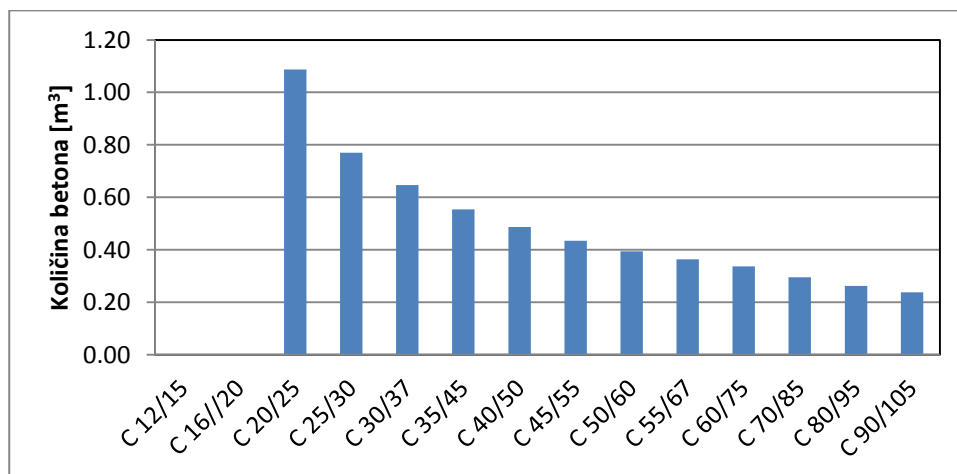
8.1.2 Upoštevanje vseh kontrol v mejnem stanju nosilnosti in uporabnosti, razen kontrole pomikov

Kontroliramo mejno stanje nosilnosti, mejno stanje razpok, napetosti in upoštevamo maksimalno razmerje širine in višine. V tej točki ne kontroliramo pomikov in izkaže se, da se je cena nosilca, narejenega iz visokotrdnega betona (npr. C90/105), znižala za 10 % v primerjavi s primerom iz točke 8.1.1.



Slika 17: Cene nosilca v primeru 1.2

Sprememba pri uporabi materiala se opazi samo pri visokotrdnih betonih. V primeru, ko ne kontroliramo mejnega stanja pomikov, lahko imamo manjši prerez, kar pomeni, da je ta kontrola merodajna. Pri običajnih betonih kontrola pomikov ni merodajna.

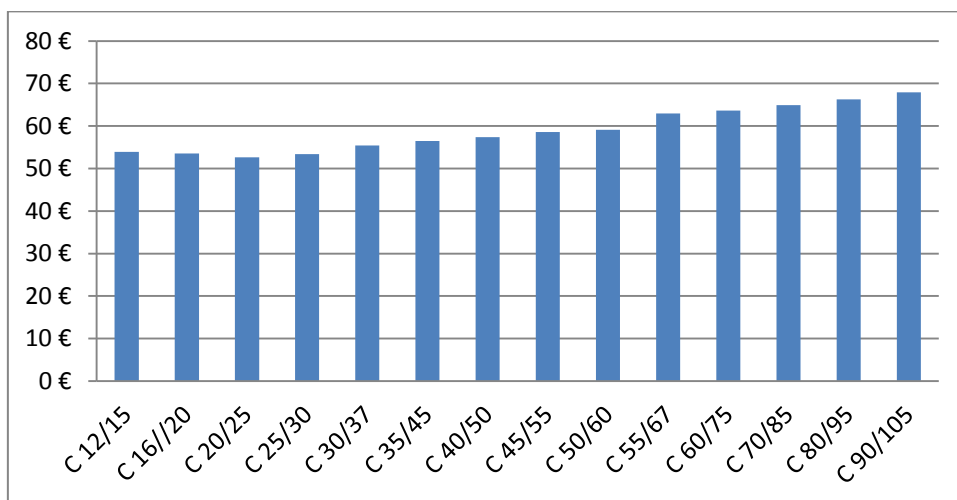


Slika 18: Poraba betona v primeru 1.2

Za beton trdnostnega razreda C 90/105 je potrebna količina betona za 23 % manjša, kot če bi upoštevali še kontrolo mejnega stanja pomikov.

8.1.3 Upoštevanje vseh kontrol v mejnem stanju nosilnosti in uporabnosti, raze kontrole pomikov in napetosti

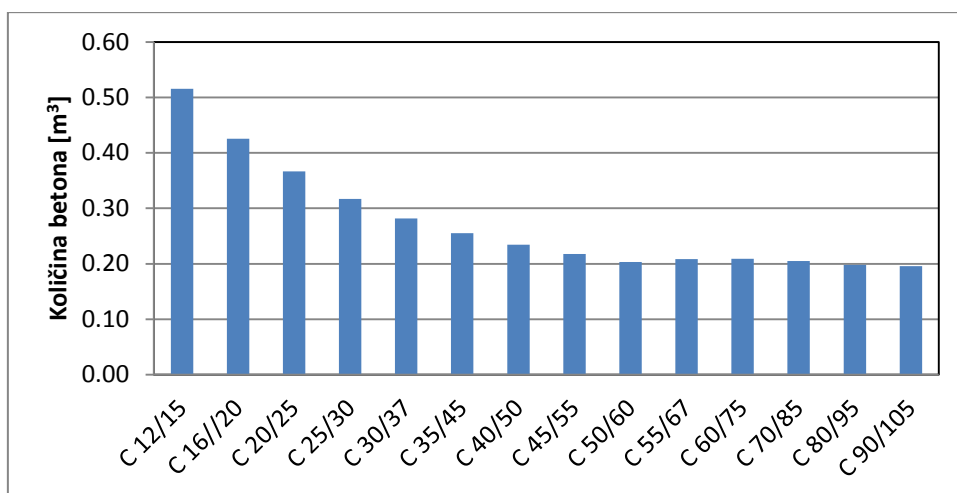
Upošteevamo mejno stanje nosilnosti in omejitev razmerja višine in širine. Kontrolo maksimalnih napetosti v mejnem stanju uporabnosti smo izklopili. V prejšnjih primerih so bile pri dimenzioniranju nosilca te kontrole merodajne pri betonih nižjih trdnosti. Če izklopimo kontrolo napetosti se izkaže, da je najbolj ekonomično uporabiti beton trdnostnega razreda C20/25.



Slika 19: Cena nosilca v primeru 1.3

Cene nosilca, narejenega iz visokotrdnih betonov, so enake kot v primeru 2, kar pomeni, da ta kontrola ni merodajna za določitev dimenzij prečnega prereza.

Količina materiala pri betonih nizkih tlačnih trdnosti se, v primeru, da ne upoštevamo kontrole napetosti in pomikov, bistveno zmanjša. Betone C12/15 in C16/20 v prejšnjih primerih nismo mogli uporabiti, zdaj pa so ena izmed bolj ekonomičnih rešitev.



Slika 20: Poraba betona v primeru 1.3

8.2 Nosilec različnih dolžin

V tem poglavju analiziramo več nosilcev različnih dolžin. Vsak nosilec je obtežen z enako obtežbo. Podatki:

$$g = 10 \frac{kN}{m}$$

$$q = 12 \frac{kN}{m}$$

$$h_{max} = L/10$$

$$h_{min} = 0,1m$$

$$b_{max} = 0,4m$$

$$b_{min} = 0,1m$$

$$\frac{h}{b} max = 3$$

$$a = 0,04m \quad a' = 0,03m$$

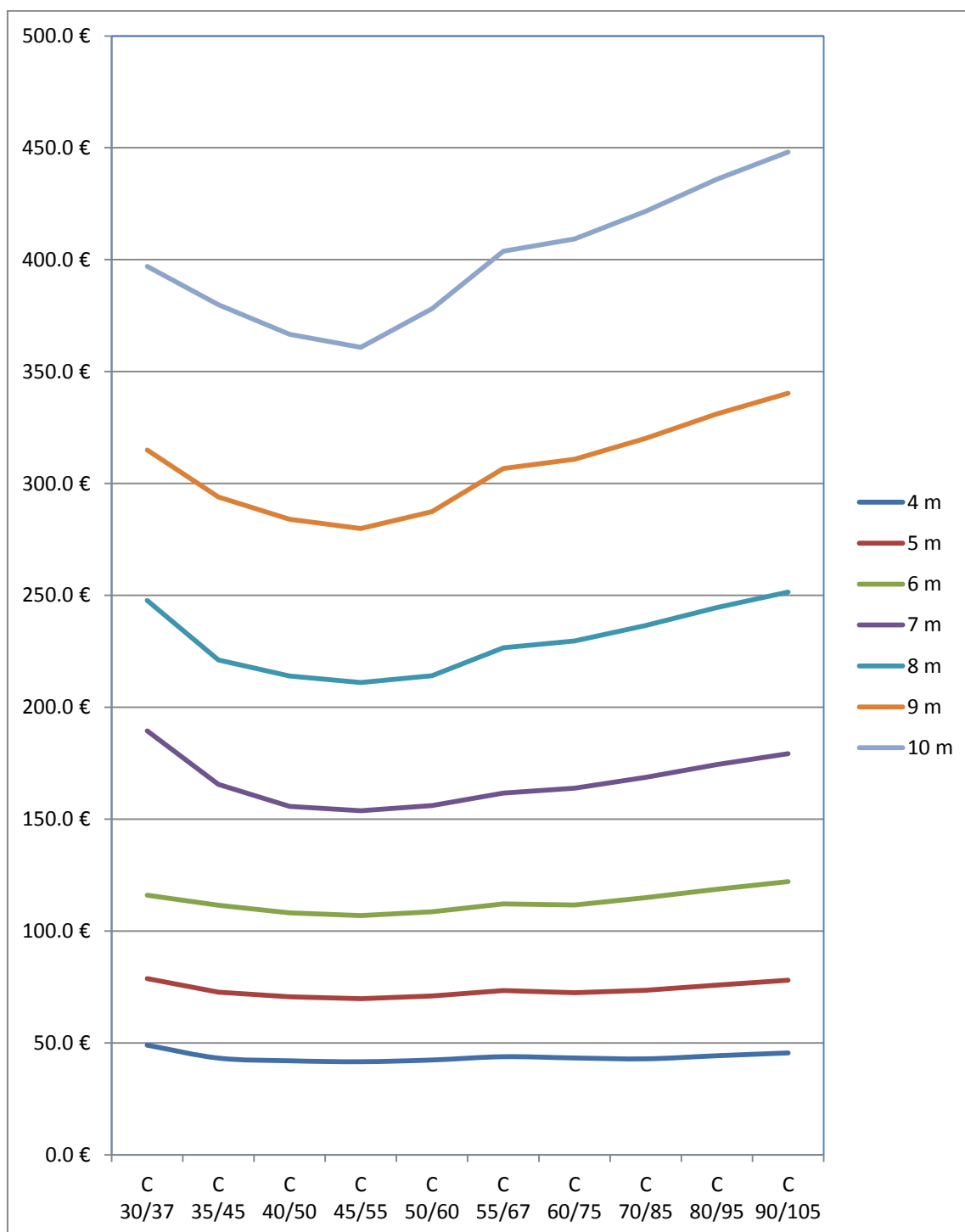
$$cena \text{ kilograma armature} = 1,2 \frac{\text{€}}{kg}$$

Za vsak primer sem omejil maksimalno dovoljeno višino nosilca na desetinko razpona. V preglednici so nekateri rezultati označeni z »/«, kar pomeni, da s tem betonom ne moremo narediti nosilca, ki bi izpolnil vse zahtevane pogoje.

Preglednica 11: Cene obravnavanih nosilcev

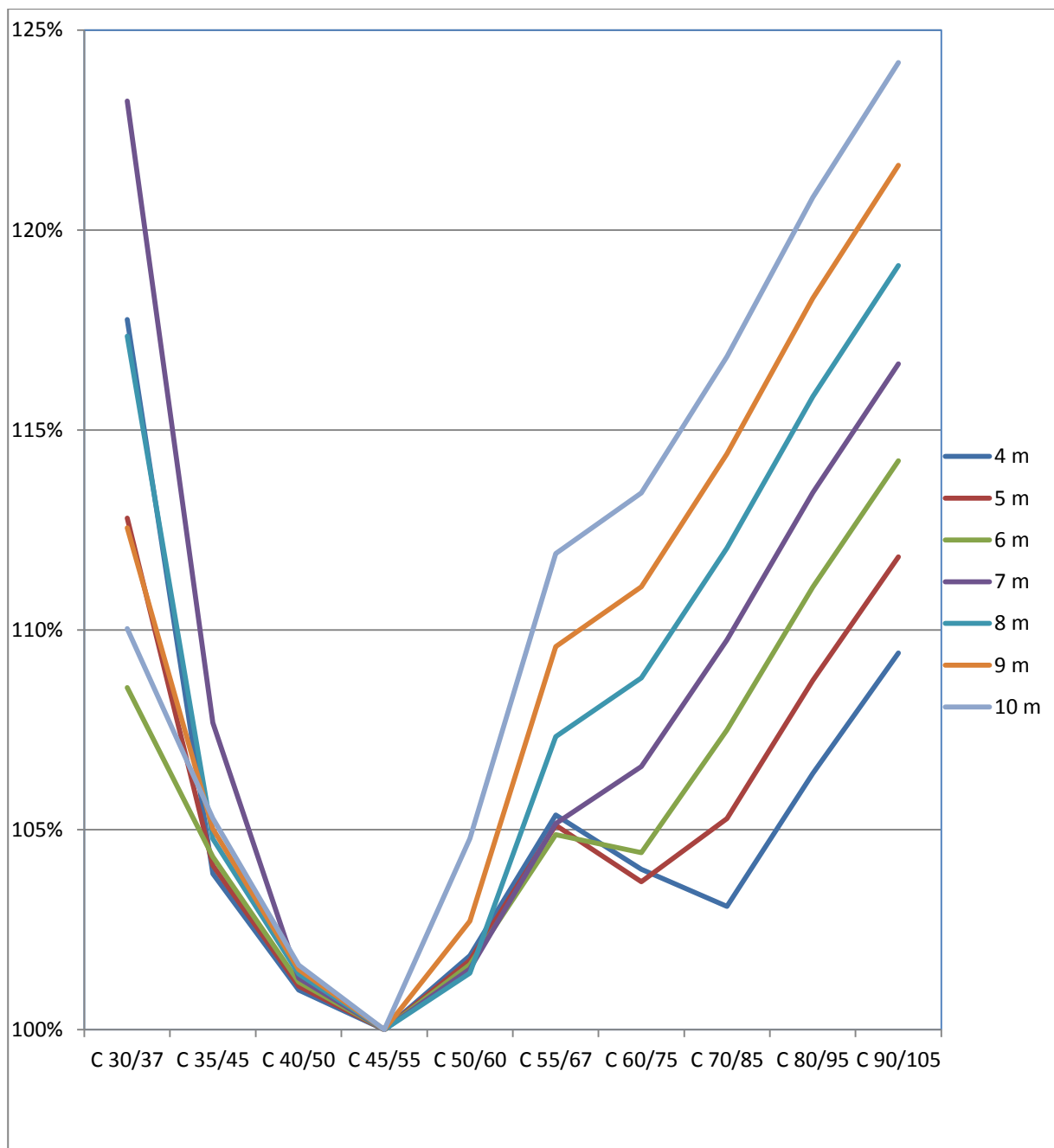
Beton	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
C 12/15	/	/	/	/	/	/	/
C 16/20	/	/	/	/	/	/	/
C 20/25	/	/	/	/	/	/	/
C 25/30	55,0 €	88,7 €	131,2 €	/	/	/	454,2 €
C 30/37	49,0 €	78,8 €	116,1 €	189,4 €	247,7 €	315,0 €	397,1 €
C 35/45	43,3 €	72,7 €	111,5 €	165,5 €	221,2 €	293,9 €	379,9 €
C 40/50	42,0 €	70,6 €	108,2 €	155,7 €	214,0 €	284,1 €	366,7 €
C 45/55	41,6 €	69,8 €	106,9 €	153,7 €	211,1 €	279,9 €	360,9 €
C 50/60	42,4 €	71,0 €	108,7 €	156,1 €	214,1 €	287,5 €	378,1 €
C 55/67	43,9 €	73,4 €	112,1 €	161,7 €	226,6 €	306,7 €	403,8 €
C 60/75	43,3 €	72,4 €	111,6 €	163,9 €	229,7 €	310,8 €	409,3 €
C 70/85	42,9 €	73,5 €	114,9 €	168,7 €	236,5 €	320,2 €	421,6 €
C 80/95	44,3 €	75,9 €	118,7 €	174,4 €	244,5 €	331,1 €	436,0 €
C 90/105	45,6 €	78,1 €	122,1 €	179,3 €	251,4 €	340,4 €	448,2 €

Izkazalo se je, da je za vse nosilce najbolj ekonomična uporaba betona trdnostnega razreda C45/55. Rezultati so dobljeni na osnovi cenika, ki je uporabljen v prvem primeru, v poglavju 8.1. Rezultati izračuna podani v preglednici, so odvisni od nabavne cene betona in armature. Na naslednji sliki je grafični prikaz rezultatov.



Slika 21: Prikaz cen betonskih nosilcev

Prikaz rezultatov je predstavljen tudi na drugačen način. Za nosilec določene dolžine smo najbolj ekonomično vrednotili kot 100%. Cene nosilcev narejenih iz drugih betonov so prikazane tudi v odstotkih. Takšen način prikaza rezultatov nam poda jasn vpogled na najbolj ekonomične rešitve. Vidimo, da je najcenejša rešitev uporaba betonov C40, C45 in C50. Če uporabljamo betone, ki so bolj odaljeni od tega trdnostnega razreda, je razlika v ceni bistveno večja.



Slika 22: Indeksni prikaz razlik cen betonov

9 ZAKLJUČEK

Na podlagi različnih primerov sem prikazal, kako se glede na trdnostni razred betona in glede na prečni prerez spreminja cena konstrukcijskega elementa. Razlog za uporabo visokotrdnih betonov je zmanjševanje dimenzij prereza in posledično tudi količine vgrajenega materiala. Dokazano je, da je za večino visokotrdnih betonov kritično mejno stanje pomikov. Za betone najnižjih trdnostnih razredov je merodajno mejno stanje napetosti. Zaradi zahteve, da so napetosti v mejnem stanju uporabnosti po prečnem prerezu nižje ali enake 45% vrednosti karakteristične tlačne trdnosti, so za betone nižjih trdnostnih razredov potrebne velike statične višine. Z uporabo nelinearne analize, ki pa v program še ni vgrajena, bi dokazali, da zadoščajo manjše dimenzije prečnega prereza elementa.

V diplomski nalogi je prikazan primer nosilca, za katerega računamo potrebne dimenzije prečnega prereza. S klasičnim izračunom se nam lahko zgodi, da izberemo beton, ki bo najmanj ekonomičen. Z uporabo mojega programa se to ne more zgoditi, ker dobimo podatek za vsak beton. Razlika med najbolj ekonomičnim betonom in večino ostalih betonov ni velika. Lahko pa se zgodi, da je uporaba določenega trdnostnega razreda bistveno manj ekonomična in to program prikaže. Na podlagi tega uporabnik razbere, katerega betona naj ne uporablja za določen primer.

Na podlagi rezultatov primera, ko obravnavamo isti obtežni primer, spreminjamo pa dolžino nosilca, sklepamo, da je za določen cenik smiselna uporaba določenega betona, in sicer betona C45/55. Statični model je bil prostoležeči nosilec in te rešitve so povezane z eno vrsto obtežbe. Konstrukcijski elementi, obremenjeni z drugačno obtežbo, bi bili najbolj ekonomični iz betona drugega trdnostnega razreda – pri stebrih: najvišjega trdnostnega razreda. Aplikacija, opisana v moji diplomski nalogi, se lahko uporabi kot hitra ocena za izbiro trdnostnega razreda betona. Na podlagi aplikacije, določene geometrije prereza in količine armature lahko projektant določi strižno armaturo.

Na podlagi narejenih analiz sem dokazal, da izbira visokotrdnih betonov ni vedno najboljša rešitev. Elastični modul takšnih betonov ni bistveno večji od elastičnega modula betonov običajne trdnosti. S povečanjem trdnostnega razreda se elastični modul ne povečujejo sorazmerno. Tehnologija proizvodnje betona se z razvojem spreminja in verjetno je, da se bodo cene visokotrdnih betonov zmanjševale, kar bo vplivalo na optimalno izbiro lastnosti in dimenzij armiranobetonskega elementa. Naloga projektanta je, da analizira cene betona in armature na trgu, zahteve naročnika in veljavne predpise ter določi najboljšo rešitev.

VIRI

- [1] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje material in konstrukcij, str. 110–127.
- [2] Lopatič, J. 2012. Betonske konstrukcije II B-UNI. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, str. 50–116.
- [3] Beg, D. (ur.) in Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: poglavje 1 str. 19–21, poglavje 2, str. 11–14, 79.
- [4] Saje, D. 2015. Vaje pri predmetu Betonske konstrukcije II. 1., 2., 3. Vaja. 3. letnik GR UNI-B. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: loč. Pag.
- [5] International Federation for Structural Concrete: 1999: fib Bulletin 2: Structural Concrete – Textbook on Behavior, Design and Performance, Volume 2: str. 104–110.
- [6] Saje, D. 2014. Vaje pri predmetu Betonske konstrukcije I. 3. Vaja, 2. letnik GR UNI-B. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: loč. Pag.
- [7] Geometry center calculus team. 2015. Boundary conditions.
<http://www.geom.uiuc.edu/education/calc-init/static-beam/boundary.html>
(Pridobljeno 15.8.2015.)
- [8] Zalatel, Š. 2007. Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Zalatel): 90 str.
http://drugg.fgg.uni-lj.si/410/1/GRU_2962_Zalatel.pdf
(Pridobljeno, 22.08.2015)

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Mehanske lastnosti betonov, različnih trdnostnih razredov	A
Priloga B: Koeficienti za veliko ekscentričnost	B
Priloga C: Cene betona podjetja Projekt beton	C

Priloga A: Mehanske lastnosti betonov, različnih trdnostnih razredov

Trdnostni razredi betona															
	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
f_{tk} (MPa)															
$f_{ck,ube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	
f_{cm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	
$f_{tk,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	
$f_{tk,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	
ϵ_{e1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	
ϵ_{en1} (‰)					3,5					3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	
ϵ_{e2} (‰)					2,0					2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	
ϵ_{en2} (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	
n					2,0					1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	
ϵ_{e3} (‰)					1,75					1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	
ϵ_{en3} (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	

Priloga B: Koeficienti za veliko ekscentričnost

Armatura			ε_s [%]	Beton						
S 500-A	S 500-B	S 500		\leq C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	
σ_s [kN/cm ²]	σ_s [kN/cm ²]	σ_s [kN/cm ²]		ε_1 [%]						
				-3,5	-3,1	-2,9	-2,7	-2,6	-2,6	
30,00	30,00	30,00	1,5	k_x	0,700	0,674	0,659	0,643	0,634	0,634
				k_y	1,411	1,359	1,331	1,303	1,290	1,288
				k_d	0,402	0,368	0,344	0,314	0,295	0,287
43,48	43,48	43,48	2,17	k_x	0,617	0,588	0,572	0,554	0,545	0,545
				k_y	1,345	1,299	1,275	1,251	1,240	1,238
				k_d	0,371	0,336	0,312	0,282	0,263	0,257
43,56	43,54	43,48	3	k_x	0,538	0,508	0,492	0,474	0,464	0,464
				k_y	1,289	1,249	1,228	1,207	1,197	1,196
				k_d	0,338	0,302	0,278	0,250	0,232	0,226
43,65	43,61	43,48	4	k_x	0,467	0,437	0,420	0,403	0,394	0,394
				k_y	1,241	1,206	1,188	1,171	1,162	1,162
				k_d	0,304	0,269	0,246	0,219	0,203	0,198
43,75	43,68	43,48	5	k_x	0,412	0,383	0,367	0,351	0,342	0,342
				k_y	1,207	1,176	1,161	1,145	1,138	1,137
				k_d	0,276	0,241	0,220	0,195	0,180	0,175
43,84	43,76	43,48	6	k_x	0,368	0,341	0,326	0,310	0,302	0,302
				k_y	1,181	1,154	1,140	1,127	1,120	1,119
				k_d	0,253	0,219	0,199	0,176	0,162	0,158
43,94	43,83	43,48	7	k_x	0,333	0,307	0,293	0,278	0,271	0,271
				k_y	1,161	1,137	1,124	1,112	1,106	1,106
				k_d	0,232	0,200	0,181	0,159	0,147	0,143
44,03	43,90	43,48	8	k_x	0,304	0,279	0,266	0,252	0,245	0,245
				k_y	1,145	1,123	1,112	1,101	1,095	1,095
				k_d	0,215	0,185	0,166	0,146	0,134	0,131
44,13	43,97	43,48	9	k_x	0,280	0,256	0,244	0,231	0,224	0,224
				k_y	1,132	1,112	1,101	1,091	1,086	1,086
				k_d	0,200	0,171	0,154	0,135	0,124	0,120
44,22	44,05	43,48	10	k_x	0,259	0,237	0,225	0,213	0,206	0,206
				k_y	1,121	1,102	1,093	1,083	1,079	1,079
				k_d	0,187	0,159	0,143	0,125	0,115	0,112
44,70	44,41	43,48	15	k_x	0,189	0,171	0,162	0,153	0,148	0,148
				k_y	1,085	1,072	1,065	1,059	1,055	1,055
				k_d	0,141	0,119	0,106	0,092	0,084	0,082
45,18	44,77	43,48	20	k_x	0,149	0,134	0,127	0,119	0,115	0,115
				k_y	1,066	1,055	1,050	1,045	1,042	1,042
				k_d	0,113	0,094	0,084	0,073	0,066	0,064
45,41	44,96	43,48	22,5	k_x	0,135	0,121	0,114	0,107	0,104	0,104
				k_y	1,059	1,050	1,045	1,040	1,038	1,038
				k_d	0,103	0,086	0,076	0,066	0,060	0,058
-	45,50	43,48	30	k_x	0,104	0,094	0,088	0,083	0,080	0,080
				k_y	1,045	1,038	1,035	1,031	1,029	1,029
				k_d	0,081	0,067	0,059	0,051	0,047	0,045
-	46,23	43,48	40	k_x	0,080	0,072	0,068	0,063	0,061	0,061
				k_y	1,035	1,029	1,026	1,023	1,022	1,022
				k_d	0,063	0,052	0,046	0,039	0,036	0,035
-	46,59	43,48	45	k_x	0,072	0,064	0,061	0,057	0,055	0,055
				k_y	1,031	1,026	1,023	1,021	1,020	1,020
				k_d	0,057	0,047	0,041	0,035	0,032	0,031

Priloga C: Cene betona podjetja Projekt beton

BETONARNA VEROVŠKOVA

Zap.št.	Številka Recepture	VRSTA BETONA	MOŽNOST ČRPANJA	BREZ DDV EUR/m ³	Z DDV 20% EUR/m ³
1	1p10	C12/15 -X0-CI 0,10- S2 - D _{max} 32		47,90	57,48
2	1p11	C12/15 -X0-CI 0,10- S2 - D _{max} 16		51,00	61,20
3	1p16	C16/20 -X0-CI 0,10-S2-D _{max} 32		53,10	63,72
4	1p17	C16/20 -X0-CI 0,10- S2 - D _{max} 16		55,20	66,24
5	1p25	C20/25 -XC1-CI 0,10- S2 - D _{max} 32		55,20	66,24
6	1p26	C20/25 -XC1-CI 0,10- S2 - D _{max} 16		56,20	67,44
7	1p28	C20/25 -XC2-CI 0,10- S3 - D _{max} 32	DA	58,30	69,96
8	1p29	C20/25 -XC2-CI 0,10- S3 - D _{max} 16	DA	60,30	72,36
9	1p35	C25/30 -XC4-PV I-CI 0,10- S2 - D _{max} 32		60,50	72,60
10	1p36	C25/30 -XC4-PV I-CI 0,10- S2 - D _{max} 16		62,40	74,88
11	1p37	C25/30 -XC4-PV I-CI 0,10- S3 - D _{max} 8	DA	73,00	87,60
12	1-44	C30/37 -XC3-XD1-XA1-PV II-CI 0,10- S2 - D _{max} 32		68,70	82,44
13	1-45	C30/37 -XC4-XD2-XA1-XM1-PV II-CI 0,10- S2 - D _{max} 16		70,70	84,84
14	1p47	C30/37 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S3 - D _{max} 32	DA	73,90	88,68
15	1p48	C30/37 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S3 - D _{max} 16	DA	76,00	91,20
16	1h53	C35/45 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S2 - D _{max} 32		74,00	88,80
17	1h54	C35/45 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S2 - D _{max} 16		76,00	91,20
18	1-56	C35/45 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S3 - D _{max} 32	DA	74,90	89,88
19	1z57	C35/45 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S3 - D _{max} 16	DA	78,00	93,60
20	1-58	C35/45 -XC4-XD3-PV II-CI 0,10- S4 - D _{max} 32	DA	79,00	94,80
21	1h59	C35/45 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S4 - D _{max} 16	DA		0,00
22	1-71	C45/55 -XC3-XD1-PV II-CI 0,10- S4 - D _{max} 16	DA	83,70	100,44
23	1p76	C50/60 -XC4-XD2-XA1-PV II-CI 0,10- S4 - D _{max} 32	DA	86,50	103,80
24	1-77	C50/60 -XC3-XD1-PV II-CI 0,10- S4 - D _{max} 16	DA	86,50	103,80
25	1-81	C55/67 -XC3-XD1-PV II-CI 0,10- S4 - D _{max} 16	DA	104,20	125,04