

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Visokošolski program Gradbeništvo,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Leon-Boris Južnič**

# **Analiza in dimenzioniranje nosilcev pri armiranobetonskih ploščah z rebri**

**Diplomska naloga št.: 215**

**Mentor:**  
doc. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 26. 1. 2006

## IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani LEON JUŽNIČ izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

“ANALIZA IN DIMENZIONIRANJE NOSILCEV PRI  
ARMIRANOBETONSKIH PLOŠČAH Z REBRI”

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

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

**UDK:** 624,012,45 : 624.073 (043.2)  
**Avtor:** Leon Južnič  
**Mentor:** doc. dr. Jože Lopatič  
**Naslov:** Analiza in dimenzioniranje armiranobetonskih plošč z rebri  
**Obseg in oprema:** 85 str., 82 pregl., 88 sl., 8 en.  
**Ključne besede:** armirani beton, plošča, T-prerez

### **Izveček**

Diplomsko delo obravnava različne načine modeliranja plošč z rebri, interpretacijo notranjih sil v rebri in plošči, določitev upogibnega momenta in dimenzioniranje nadomestnih T-prerezov z dobljenim upogibnim momentom.

Obravnavani so rebrasti stropovi z različnimi razdaljami med rebri in z različnim številom reber.

Obravnavan je tudi vpliv višine rebra na notranje sile nosilca in na notranje sile plošče.

Programska oprema, ki sem jo uporabil za modeliranje konstrukcije, je sklop programov Sofistik.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 624,012,45 : 624.073 (043.2)  
**Author:** Leon Južnič  
**Supervisor:** Asist. Prof. dr. Jože Lopatič  
**Title** Analysis and design of beams of reinforced concrete slabs with ribs  
**Notes** 85 p., 82tab., 88 fig., 8 eq.  
**Key words** Reinforced concrete, slab, T-beam

### **Abstract:**

The present work focuses on different ways of analysing slabs with ribs, the interpretation of the internal forces in the beam and the slab. It focuses also on defining of the bending moment and design of T-beams according to the bending moment.

There are analysed ribbed slabs, where the distance between the ribs is changing and the number of ribs is changable. Also slabs with beams are analysed. The beams have different height.

The program used for calculating internal forces, were the Sofistik programe modules.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se vsem, ki so mi v času študija stali ob strani.

Hvala mojim domačim. Očetu, ki me je vzpodbujal, dokler je lahko. Mami, ki me vedno podpira.

Terezki za moralno in Gojcu za materialno podporo ob zaključku študija.

Hvala doc. dr. Lopatiču, ki mi je omogočil zanimivo temo diplomske naloge; za njegove nasvete, potrpežljivost in vzpodbudo.

Posebna zahvala gre kolegu Pavlu Pučniku, ki mi je z mnogimi nasveti in pogovori pomagal, pri vsebini in zunanjem videzu naloge.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	Notranje sile v plošči z ekscentrično priključenim nosilcem	2
<b>2</b>	<b>PREDSTAVITEV SKLOPA PROGRAMOV SOFISTIK</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>NAČINI MODELIRANJA KONČNIH ELEMENTOV V SOFIPLUSU</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>NAČINI OBRAVNAVANJA T-PREREZOV S PROGRAMI SOFISTIK</b>	<b>11</b>
4.1	T-nosilec v enostavni ravninski plošči	12
4.1.1	Primer modeliranja centričnega priklopa T-prereza na ploščo	12
4.2	Fizično korektno priključeni elementi	14
4.2.1	Ekscentrična priključitev pravokotnega prereza-primer 2a	17
4.2.2	Ekscentrična priključitev pravokotnega prereza-primer 2b	20
4.2.3	Ekscentrična priključitev pravokotnega prereza-primer 2c	21
4.2.4	Primerjava primerov 2a, 2b in 2c	22
4.3	Ortotropna plošča	23
4.3.1	Ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo-primer 3a	23
4.3.2	Ekscentrična priključitev T-prereza v navadno ploščo-primer 3b	24
4.3.3	Primerjava primerov 3a in 3b	24
4.3.4	Ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo-primer 3a1	26
4.3.5	Ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo-primer 3a2	28
4.3.6	Primerjava primerov 3a1 in 3a2	29
<b>5</b>	<b>PRIMERJALNA ANALIZA REBRASNIH STROPOV RAZLIČNIH DIMENZIJ</b>	<b>31</b>
5.1	Plošča s tremi rebri	31
5.2	Plošča s petimi rebri	34
5.3	Izračun upogibnih momentov	36
5.3.1	Izračun upogibnih momentov peš	36
5.3.2	Določitev upogibnih momentov nadomestnih T-prerezov plošče s tremi rebri z rezultati iz programa	40
5.3.3	Določitev upogibnih momentov nadomestnih T-prerezov plošče s petimi rebri z rezultati iz programa	42
5.4	Primerjava upogibnih momentov	44
5.5	Primerjava rezultatov v grafični obliki	46
5.5.1	Plošča s tremi rebri	46
5.5.2	Plošča s petimi rebri	48
5.5.3	Dimenzioniranje plošče s tremi rebri, $e=1,5m$	50
<b>6</b>	<b>DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH PLOŠČ Z REBRI</b>	<b>57</b>
6.1	Opis konstrukcije	58
6.2	Modeliranje konstrukcije	58
6.2.1	Fizično korektno priključeni elementi (druga metoda)	59
6.2.2	Centrična priključitev T-prereza na ploščo (prva metoda)	62
6.2.3	Ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo (tretja metoda)	65

<b>6.3</b>	<b>Analiza plošče z rebrom pri različnih višinah rebra</b>	<b>67</b>
6.3.1	Primeri 1a	67
6.3.2	Primeri 1b	68
6.3.3	Primeri 1c	68
6.3.4	Primeri 2a in 2b	69
6.3.5	Primeri 3a	70
6.3.6	Primeri 3c	71
6.3.7	Primerjava rezultatov v grafični obliki	72
6.3.8	Analiza "peš"	78
6.3.9	Primerjava rezultatov	82
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>84</b>
<b>VIRI</b>		<b>85</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava rezultatov	14
Preglednica 2: Rezultati notranjih sil za primer 2a	17
Preglednica 3: Notranje sile in pomiki primera 2b	20
Preglednica 4: Notranje sile in pomiki primera 2c	21
Preglednica 5: Primerjava rezultatov 2a, 2b in 2c	22
Preglednica 6: Rezultati ekscentrično priključenega T-prereza na ortotropno ploščo	24
Preglednica 7: Rezultati ekscentrično priključenega T-prereza na ploščo	24
Preglednica 8: Primerjava rezultatov primerov 3a in 3b	24
Preglednica 9: Primerjava rezultatov primerov 3a1 in 3a2	29
Preglednica 10: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-3-1	32
Preglednica 11: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-3-2	32
Preglednica 12: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-3-3	33
Preglednica 13: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-3-4	33
Preglednica 14: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-5-1	34
Preglednica 15: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-5-2	35
Preglednica 16: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-5-3	35
Preglednica 17: Vrednosti $b_v$ in $b_{sod}$ za primer 10-5-4	35
Preglednica 18: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-1	40
Preglednica 19: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-2	41
Preglednica 20: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-3	41
Preglednica 21: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-4	41
Preglednica 22: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-1	42
Preglednica 23: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-2	42
Preglednica 24: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-3	43
Preglednica 25: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-4	43
Preglednica 26: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri = 1m	44
Preglednica 27: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri = 1,5m	44
Preglednica 28: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri = 2m	45
Preglednica 29: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri = 2,5m	45
Preglednica 30: Upogibni momenti za dimenzioniranje	50
Preglednica 31: Primerjava rezultatov 1a, 1b in 1c	62
Preglednica 32: Potrebna upogibna armatura v posameznih primerih	64
Preglednica 33: Primerjava rezultatov	66
Preglednica 34: Notranje sile plošče v primerih 1a	67
Preglednica 35: Upogibni momenti nosilca v primerih 1a	68
Preglednica 36: Notranje sile plošče v primerih 1b	68
Preglednica 37: Upogibni momenti in pomiki nosilca v primerih 1b	68
Preglednica 38: Notranje sile plošče v primerih 1c	69
Preglednica 39: Upogibni momenti nosilca v primerih 1c	69
Preglednica 40: Notranje sile plošče v primerih 2a in 2b	70
Preglednica 41: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primeri 2a	70
Preglednica 42: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza primeri 2b	70



Preglednica 43: Notranje sile plošče v primerih 3a	71
Preglednica 44: Upogibni momenti nosilca v primerih 3a	71
Preglednica 45: Notranje sile plošče v primerih 3c	71
Preglednica 46: Upogibni momenti nosilca v primerih 3c	71
Preglednica 47: Primerjava "peš" računa in rezultatov programa	82

## KAZALO SLIK

Slika 1: Potek napetosti v plošči in nosilcu ob vertikalni obremenitvi, če sta elementa ločena	2
Slika 2: Potek napetosti v plošči in v nosilcu, ki sta toga spojena	2
Slika 3: Notranje sile v plošči z rebrom	3
Slika 4: Razlika med vplivno in sodelujočo širino	4
Slika 5: Pogled v program Sofiplus	6
Slika 6: Datoteke, ki se ustvarijo ob definiciji konstrukcije	6
Slika 7: Pogled v program Teddy	7
Slika 8: Pogled v program Ursula	7
Slika 9: Pogled v program WinGraf	8
Slika 10: Pogled v program Soficad	8
Slika 11: Ortogonalna mreža končnih elementov enake velikosti	9
Slika 12: Mreža iz trikotnih končnih elementov	9
Slika 13: Mreža iz štirikotnih končnih elementov	9
Slika 14: Zgostitev končnih elementov nepravilnih oblik	10
Slika 15: Zgostitev ortogonalnih končnih elementov	10
Slika 16: Lastnosti končnih elementov	10
Slika 17: Podatki o geometriji vozlišč izbranega končnega elementa	10
Slika 18: Centrična priključitev nosilca s širino pasnice betona $b$ na ploščo	12
Slika 19: Geometrija obravnavane plošče	12
Slika 20: Dimenzije nosilca in nosilec, centrično priključen na ploščo	13
Slika 21: Obtežba, ki jo upošteva program	13
Slika 22: Ekscentrična priključitev nosilca na ploščo	15
Slika 23: Notranje sile v nadomestnem T-prerezu	15
Slika 24: Sile in ročice v nadomestnem T-prerezu	16
Slika 25: Način priključitve nosilca na ploščo	17
Slika 26: Izračunani upogibni momenti nosilca [kNm]	17
Slika 27: Osnova sila nosilca [kN]	19
Slika 28: Integral membranskih sil v plošči na razdalji $l=1\text{m}$ [kN]	19
Slika 29: Integral upogibnih momentov plošče na razdalji $l=1\text{m}$ [kN]	19
Slika 30: Način priključitve nosilca na ploščo	20
Slika 31: Priključitev nosilca na ploščo	21
Slika 32: Prikaz modeliranja ortotropne plošče	23
Slika 33: Nosilec, ekscentrično priključen na ploščo	23
Slika 34: Skica analizirane plošče	26
Slika 35: Prečni prerez nosilca	26
Slika 36: Ortotropna plošča v območju pasnice T-prereza	26
Slika 37: Membranske sile ortotropni plošči [kN/m]	27
Slika 38: Upogibni momenti plošče $m_x$ [kNm/m]	27
Slika 39: Upogibni momenti plošče $m_y$ [kNm/m]	28
Slika 40: Plošča, upoštevana kot ortotropna v celotnem območju	28
Slika 41: Upogibni momenti plošče $m_y$ [kNm/m]	29
Slika 42: Skica plošče s tremi rebri	31

Slika 43: Skica plošče s petimi rebri	34
Slika 44: Računski model nadomestnega linijskega elementa	36
Slika 45: Prenos obtežbe pri plošči s tremi rebri	36
Slika 46: Prenos obtežbe pri plošči s petimi rebri	37
Slika 47: Notranje sile dela nosilca	38
Slika 48: Skica plošče s koordinatnim sistemom	50
Slika 49: Potek osnih sil v nosilcih [kN]	51
Slika 50: Upogibni momenti nosilcev [kNm]	51
Slika 51: Maksimalni upogibni momenti $m_x$ v plošči	51
Slika 52: Minimalni upogibni momenti $m_x$ v plošči	52
Slika 53: Priporočena spodnja (pozitivna) armatura v plošči	52
Slika 54: Priporočena negativna armatura v plošče	52
Slika 55: Izračunana upogibna armatura v nosilcih [cm <sup>2</sup> ]	53
Slika 56: Upogibni moment $m_y$ plošče [kNm/m]	53
Slika 57: Membranske sile v plošči [kN/m]	53
Slika 58: Dimenzije nadomestnega T-prereza	54
Slika 59: Nosilec, ki ga dimenzionira program	55
Slika 60: Tloris plošče z globalnim k.s.	58
Slika 61: T-prerez z neznano dimenzijo pasnice $b$	59
Slika 62: Ekscentrična priključitev pravokotnega nosilca na ploščo	60
Slika 63: Membranske sile plošče $n_p$ [kN]	60
Slika 64: Membranske sile plošče $n_p$ v dveh prerezih prečno na nosilec [kN]	60
Slika 65: Osne sile nosilca [kN]	61
Slika 66: Integral membranskih sil plošče na razdalji $l=4,1m$ [kN]	61
Slika 67: Prerez nosilca v primeru 1a	62
Slika 68: Prerez nosilca za primer 1b	62
Slika 69: Prerez nosilca za primer 1c	62
Slika 70: Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo	65
Slika 71: Upogibni momenti nosilca [kNm]; primer 3a	65
Slika 72: Pomiki nosilca [mm]; primer 3a	65
Slika 73: Ekscentrična priključitev T-prereza v ploščo; primer 3c	66
Slika 74: Upogibni momenti nosilca; primer 3c [kNm]	66
Slika 75: Pomiki nosilca; primer 3c [mm]	66
Slika 76: Način priključitve T-prereza na ploščo	67
Slika 77: Priključitev T-prereza na ploščo	68
Slika 78: Priključitev T-prereza na ploščo	69
Slika 79: Priključitev nosilca na ploščo in upoštevana širina $b=b_{sod}$ -primer 2a	69
Slika 80: Priključitev nosilca na ploščo in upoštevana širina $b=b_v$ -primer 2b	70
Slika 81: Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo; primeri 3a	70
Slika 82: Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo; primeri 3c	71
Slika 83: Oznaka upogibnih momentov plošče	78
Slika 84: Robni pogoji dela plošče z rebrom	79
Slika 85: Strešno pravilo obtežbe nosilca	80
Slika 86: Obtežba plošče, ki obremenjuje nosilec	80

Južnič, L. 2005, Analiza in dimenzioniranje nosilcev pri armiranobetonskih ploščah z rebri.  
Dipl. nal.-VSS, Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

XII

Slika 87: Lastna teža nosilca

80

Slika 88: Račun reakcij in notranjih sil nosilca

81

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava rezultatov 3a1 in 3a	30
Grafikon 2: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-1	46
Grafikon 3: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-2	46
Grafikon 4: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-3	47
Grafikon 5: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-4	47
Grafikon 6: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-1	48
Grafikon 7: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-2	48
Grafikon 8: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-3	49
Grafikon 9: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-4	49
Grafikon 10: Primerjava upogibnih momentov v sredini nosilca; primeri 1a, 1b in 1c	73
Grafikon 11: Primerjava upogibnih momentov, ki delujejo na nadomestni T-prerez ; primera 2a in 2b	73
Grafikon 12: Upogibni momenti T-prereza; primera 3a in 3c	74
Grafikon 13: Upogibni momenti pri širini pasnice $b=b_{sod}$	74
Grafikon 14: Upogibni momenti pri širini pasnice $b=b_v$	75
Grafikon 15: Primerjava pomikov v sredini razpona; primeri 1a, 2a, 3a	75
Grafikon 16: Upogibni momenti plošče $m_x$ [kNm/m]	76
Grafikon 17: Upogibni momenti plošče $m_x$	76
Grafikon 18: Minimalni upogibni momenti plošče $m_y$	77
Grafikon 19: Minimalni upogibni momenti plošče $m_y$	77

## 1 UVOD

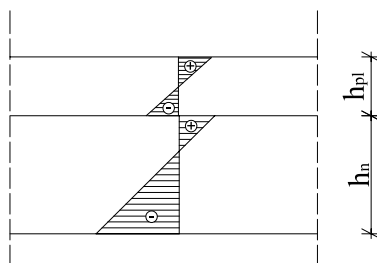
Pri armiranobetonskih konstrukcijah so nosilci in stropne plošče običajno izvedene skupaj. Med seboj so monolitno povezane, pri čemer se oblikuje T-prerez. Take plošče imenujemo plošče z rebri. Če je stropna plošča z nosilci toga spojena, pride pri obtežbi na stiku med ploščo in gredo, do enake deformacije. Pri pozitivnem upogibnem momentu in zgoraj ležeči plošči, je le-ta v tlačni coni. Ko sta plošča in greda monolitno povezani med seboj, sodeluje pri prevzemu obtežbe tudi plošča. Tukaj obstaja za betonsko gradnjo idealna nosilna oblika (T-prerez) z veliko površino betona v tlačni coni (kjer napetosti prevzame beton) in majhno (tudi ne nosilno) površino betona v natezni coni, kjer pa napetosti prevzame armatura. Do sodelovanja nosilca in plošče kot T-prereza lahko pride, ko je plošča debeline najmanj 7 cm (Avak,1994)

Ko izvajamo nosilce in plošče, ki so monolitno izvedene na način, da se težišče plošče ne ujema s težiščem nosilca, govorimo o ekscentrični priključitvi nosilca na ploščo. V tem primeru prihaja znotraj t.i. T-prereza do dodatnih notranjih sil, ki pa jih z enostavnim izračunom "peš" ne moremo določiti. Le-te lahko izračunamo z različnimi računalniškimi programi ob ustreznem modeliranju konstrukcije.

Namen moje diplomske naloge je opozoriti na interpretacijo notranjih sil v ploščah z rebri, izračunanih z računalniškimi programi. Vsak računalniški program ima svoje značilnosti in pristop k računanju notranjih sil v ploščah z rebri; posledično pa tudi drugačno dimenzioniranje konstrukcijskih elementov. Predvsem je pomembno, da projektant dobro pozna načine, kako posamezen računalniški program obravnava različne vrste konstrukcijskih zasnov in računskih modelov, da se lahko po svoji presoji odloči, kako bo modeliral konstrukcijo in na kakšen način bo v poznejši fazi uporabil dobljene notranje sile za dimenzioniranje posameznih konstrukcijskih elementov.

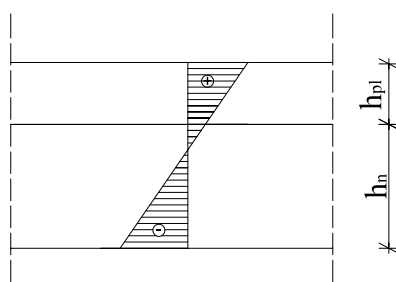
### 1.1 Notranje sile v plošči z ekscentrično priključenim nosilcem

Če opazujemo napetosti v plošči in v nosilcu, ko nista spojena, so pri vertikalni obtežbi tako v plošči, kot tudi v nosilcu prisotne natezne napetosti spodaj in tlačne napetosti zgoraj.



Slika 1: Potek napetosti v plošči in nosilcu ob vertikalni obremenitvi, če sta elementa ločena

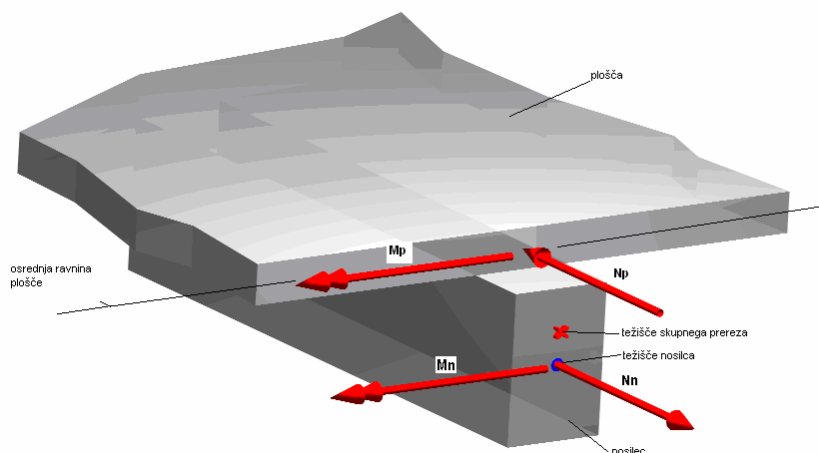
Če pa sta nosilec in plošča tega spojena, so napetosti na vrhu nosilca enake napetostim na spodnjem robu plošče (v primeru na sliki so te napetosti tlačne):



Slika 2: Potek napetosti v plošči in v nosilcu, ki sta toga spojena

Ker se v plošči (ko je nevtralna os v nosilcu-primer slike 2), ali pa v nosilcu (ko je nevtralna os v plošči), spremeni predznak napetosti glede na prejšnje stanje po togi povezavi med ploščo in rebrom, se v plošči in nosilcu pojavijo dodatne osne sile, ki so odvisne zgolj od zunanje vertikalne obtežbe. Osnim silam v plošči rečemo membranske sile. Določevanje velikosti membranskih sil je možno z računalniškim programom ob ustreznem modeliranju plošče z rebrom.

V primeru pravokotne plošče z rebrom, ki je na vseh robovih vrtljivo podprta, so membranske sile največje na sredini razpona tik nad nosilcem. Potem pa se zmanjšujejo tako v smeri nosilca, kot tudi v smeri pravokotno na nosilec.



Slika 3: Notranje sile v plošči z rebrom

Na sliki so opisane notranje sile, ki se pojavijo v plošči in v nosilcu pri ploščah z rebrom.

Imamo torej naslednje notranje sile:

- upogibni momenti v nosilcu  $M_n$  [kNm]
- integral upogibnih momentov v plošči  $M_p$  [kNm]
- osne sile v nosilcu  $N_n$  [kN]
- integral membranskih sil v plošči  $N_p$  [kN]

Če želimo uporabiti prednosti prej omenjenega skupnega prereza (T-prerez), ki je za armiranobetonsko gradnjo zelo primeren, moramo poznati dimenzije tega prereza, pa tudi obremenitev, ki deluje na ta skupni prerez. Dimenzije rebra in notranje sile, ki delujejo na rebro, poznamo. Neznana pa je torej širina plošče, ki sodeluje z rebrom pri prevzemu obremenitve. Na tej širini se v plošči pojavijo membranske sile in upogibni momenti. Pri določevanju te širine lahko uporabimo dva načina:



1. Vzamemo dejansko stanje v plošči: Membranska sila je največja tik nad nosilcem; ko pa se oddaljujemo od osi nosilca, se membranske sile zmanjšujejo. Tista širina, na kateri se torej negativna vrednost integrala membranskih sil v plošči ( $-N_p$ ) izenači z osno silo v nosilcu ( $N_n$ ), imenujemo **vplivna širina ( $b_v$ )**. Vplivno širino izračunamo s pomočjo enačbe (1)

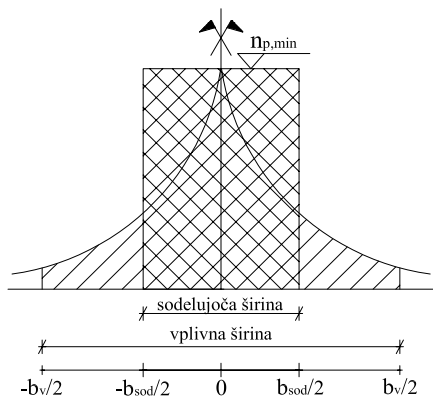
$$N_n = -N_p = \int_{-b_v/2}^{b_v/2} n_p ds \quad (1)$$

kjer so  $n_p$  membranske sile v plošči v smeri vzdolžne osi nosilca [kN/m]

2. Za ravnotežje sil predpostavimo, da je membranska sila  $n_p$  v plošči konstantna, in sicer je njena vrednost enaka maksimalni vrednosti membranskih sil  $n_{p,max}$  (vrednosti tik nad nosilcem). Tista širina, na kateri se vsota maksimalnih membranskih sil v plošči izenači z osno silo v nosilcu, imenujemo **sodelujoča širina ( $b_{sod}$ )**.

$$N_n = n_{p,min} * b_{sod} \quad (2)$$

Razlika med vplivno širino  $b_v$  in sodelujočo širino  $b_{sod}$  je razvidna iz slike 4:



Slika 4: Razlika med vplivno in sodelujočo širino

Možnih načinov za izračun integrala membranskih sil v plošči je sicer več. Lahko vzamemo numerične vrednosti membranskih sil v posameznih vozliščih iz programa za računanje notranjih sil in ločeno izračunamo vrednost integrala z nekim programom za delo s preglednicami (npr. z Excelom).

V nekaterih programih pa je možen izračun integrala notranjih sil na razdalji, ki si jo izberemo. S poizkušanjem lahko torej izberemo določeno razdaljo in preverimo, če se integral membranskih sil  $N_p$  na tej razdalji izenači z osno silo v nosilcu  $N_n$  (enačba 1).

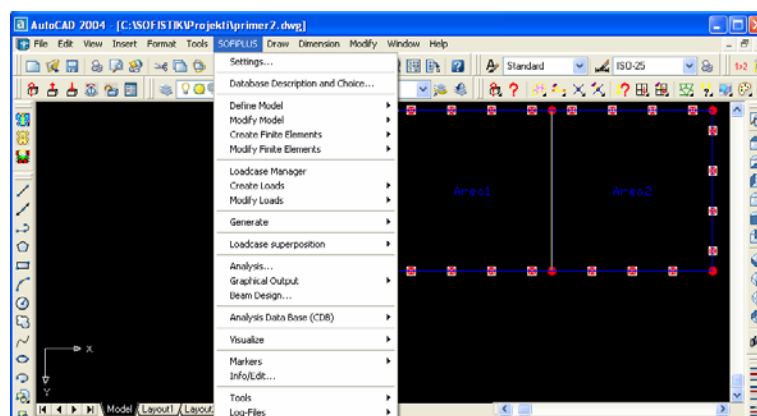
## 2 PREDSTAVITEV SKLOPA PROGRAMOV SOFISTIK

Že leta 1973 je mnogo gradbenih inženirjev začelo razvijati sklop računalniških programov, ki bi lahko bili specifično uporabni za gradbeno konstruiranje. V letu 1999 je sodelovanje med projektantskimi biroji in oglaševalsko agencijo privedlo do ustanovitve družbe SOFISTIK AG.

Sofistik je torej sklop računalniških programov, ki so namenjeni eksplicitno gradbenemu konstruiranju. V tem sklopu so prisotni programi za modeliranje konstrukcije, programi za izračun notranjih sil in dimenzioniranje, programi za prikaz rezultatov notranjih sil in rezultatov dimenzioniranja, ter programi za risanje načrtov.

Za modeliranje konstrukcije sem uporabljal program SOFIPLUS. Dosegljiv je v obliki nadgradnje AutoCADA, ali pa kot samostojen program. Za izris konstrukcije ne potrebujemo nobenega dodatnega predznanja, razen risanja v AutoCADu. Če želimo narediti mrežo končnih elementov, je potrebno najprej v AutoCAD-u narisati konstrukcijo, ki jo želimo modelirati. Šele ko imamo izrisane meje konstrukcije (v primeru ploskovnih elementov) in težiščne osi (v primeru linijskih elementov) konstrukcije, lahko definiramo grede, plošče, stebre, podpore, itd. Definicija konstrukcijskih elementov poteka v programu Sofiplus. Pri definiciji moramo definirati materialne in geometrijske karakteristike za posamezni element, vrsto konstrukcije (prostorska, ravninska) in standard, po katerem naj bi bila konstrukcija dimenzionirana. Po predhodni definiciji elementov, nam program avtomatsko generira mrežo končnih elementov glede na vhodne podatke o velikosti in obliki končnih elementov. Možna pa je tudi takojšnja definicija končnih elementov, brez predhodnega izrisa geometrije. V tem primeru ne potrebujemo generatorja mreže končnih elementov.

Ko so končni elementi definirani, lahko določimo obtežbo. Lastno težo program lahko avtomatsko upošteva; lahko pa jo tudi "izklopimo" in podamo sami. Obtežne kombinacije program generira glede na standard, ki smo ga določili za statični izračun konstrukcije. Na voljo imamo 11 različnih standardov, ki jih lahko program upošteva pri izračunu konstrukcije. Poleg Evropskega standarda EC, je na voljo tudi nemški standard DIN, britanski standard BS, ameriški standard US, ipd.



Slika 5: Pogled v program Sofiplus

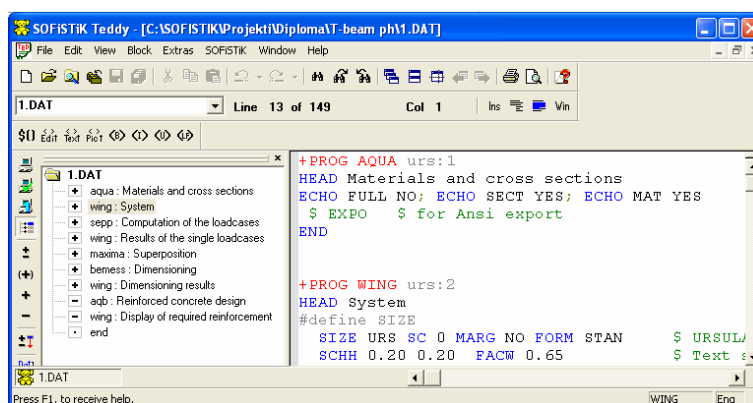
Iz slike 5 je razvidno, da je Sofiplus nadgradnja AutoCAD-a. Okolje je enako; Poleg poleg AutoCAD-ovih osnovnih menijev, je dodan še meni programa Sofiplus, v katerem so vsi ukazi, ki jih potrebujemo za definiranje konstrukcije. Za definiranje konstrukcije ima program tudi svoje orodne vrstice, ki jih lahko vidimo na sliki.

V naslednji fazi lahko preidemo na analizo konstrukcije- izračun notranjih sil in dimenzioniranje. Tukaj pridejo v poštev drugi programi, ki uporabljajo informacije iz baze podatkov, ki smo jo ustvarili preko Sofiplusa z grafičnim vnosom. V mapi, kamor shranjujemo projekte se ustvarijo različne datoteke z imenom projekta in različnimi končnicami. To je razvidno iz naslednje slike.

primer1.cdb	6.376 KB	SOFISTIK Database
PRIMER1.DAT	9 KB	SOFISTIK Datfile
Primer1.dwg	33 KB	AutoCAD Drawing
PRIMER1.ERG	5.925 KB	SOFISTIK Ergfile
PRIMER1.LF	1 KB	LF File
primer1.lst	3 KB	SOFISTIK Lstfile
primer1.plb	9.019 KB	SOFISTIK Metafile
PRIMER1.prt	7 KB	SOFISTIK Protocol file
PRIMER1_AQA.DAT	1 KB	SOFISTIK Datfile
PRIMER1_AQA.ERG	4 KB	SOFISTIK Ergfile
primer1_aqa.plb	9 KB	SOFISTIK Metafile
PRIMER1_BEM.DAT	1 KB	SOFISTIK Datfile
primer1_lfd.dat	1 KB	SOFISTIK Datfile
PRIMER1_LFD.ERG	2 KB	SOFISTIK Ergfile
primer1_lfd.plb	4 KB	SOFISTIK Metafile
primer1_msh.dat	1 KB	SOFISTIK Datfile
primer1_msh.plb	2 KB	SOFISTIK Metafile
primer1_wingraf0.lst	2 KB	SOFISTIK Lstfile

Slika 6: Datoteke, ki se ustvarijo ob definiciji konstrukcije

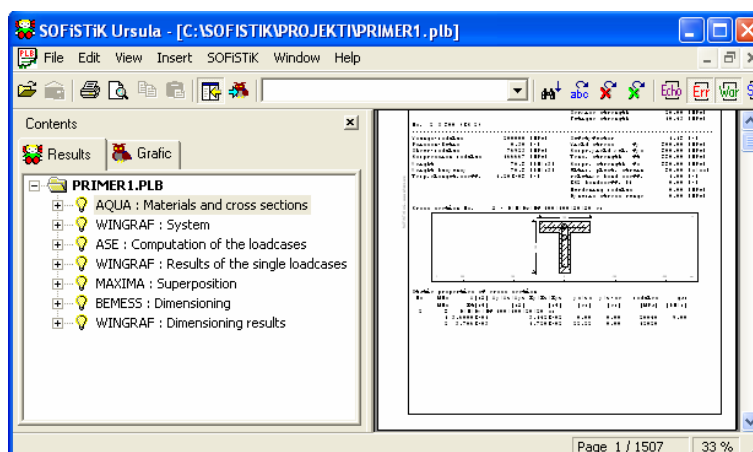
Za nas je pomembna datoteka s kočnico .cdb. To je namreč baza podatkov, ki smo jo ustvarili preko grafičnega vnosa s programom Sofiplus. Bazo podatkov, ki smo jo ustvarili, si lahko pogledamo s programom TEDDY, kjer so podatki prikazani v tekstualni obliki. Tukaj lahko podatke tudi spreminjamo, če poznamo ustrezne ukaze.



Slika 7: Pogled v program Teddy

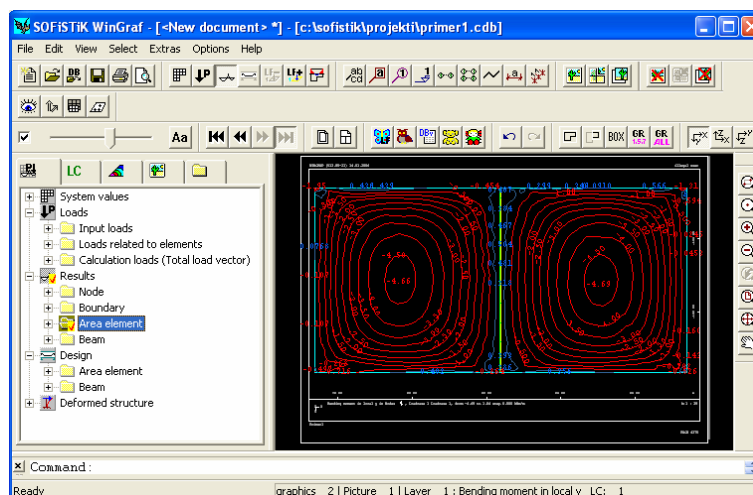
Na zgornji sliki vidimo programsko okno Teddy-a. V levem delu so prikazani programski moduli, ki sodelujejo pri izračunu konstrukcije. V desnem delu pa so prikazani ukazi za posamezni programski modul. Tukaj lahko urejamo vhodne podatke s tekstovnim vnosom, če poznamo ustrezne ukaze.

URSULA je program za prikaz rezultatov statične analize v tekstovni in grafični obliki. S tem programom je možen tudi končni izdelek statičnega računa, saj so v njem prisotni tako vhodni podatki (geometrija konstrukcije, prerezi, materiali, obtežbe...), kot tudi rezultati analize (notranje sile, predlagana armatura...)



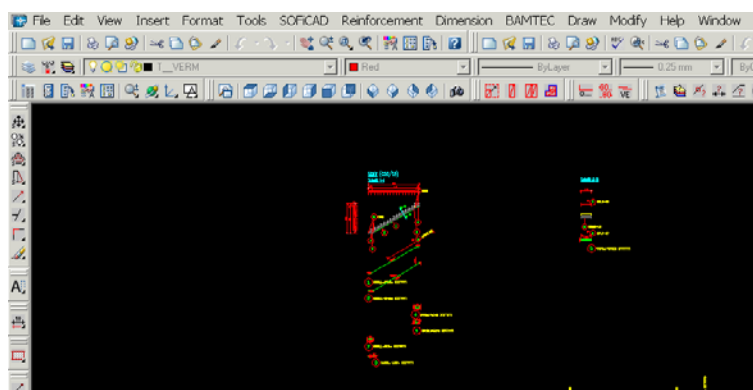
Slika 8: Pogled v program Ursula

WINGRAF je program, ki je namenjen izključno grafičnemu prikazu konstrukcije in notranjih sil konstrukcije. Omogoča prikaz geometrije konstrukcije, vrste materialov, oštevilčenja elementov, vozlišč in prerezov, grafični prikaz notranjih sil in reakcij, ter prikaz predlagane armature.



Slika 9: Pogled v program WinGraf

Program SOFICAD omogoča izris armature je. Tako kot SOFIPLUS, je tudi SOFICAD nadgradnja AutoCAD-a. V njem so orodja, ki močno olajšajo izris same armature v konstrukciji; izris posameznih pozicij in v končni fazi tudi izvleček armature ter skupno težo armature.

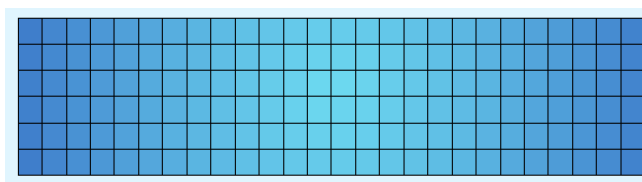


Slika 10: Pogled v program Soficad

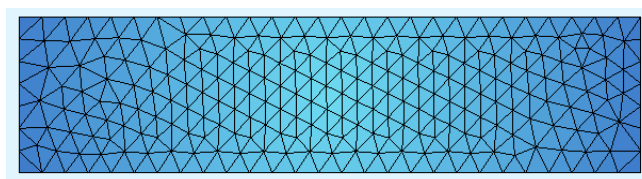
### 3 NAČINI MODELIRANJA KONČNIH ELEMENTOV V SOFIPLUSU

V prvi fazi sem spoznaval načine modeliranja končnih elementov v programu. Program Sofiplus sam generira mrežo končnih elementov glede na geometrijo konstrukcije, pa tudi glede na podatke, ki mu jih damo glede oblike in velikosti končnih elementov.

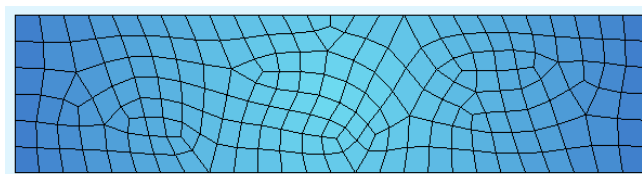
Konstrukcijo po generaciji mreže končnih elementov lahko pregledamo v programu Animator-view. Glede na obliko končnih elementov so možne opcije, ki so prikazane na slikah 6-10.



**Slika 11: Ortogonalna mreža končnih elementov enake velikosti**

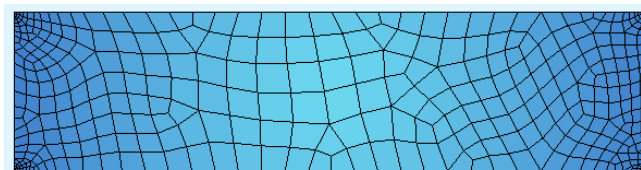


**Slika 12: Mreža iz trikotnih končnih elementov**



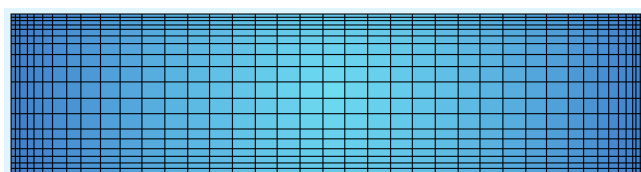
**Slika 13: Mreža iz štirikotnih končnih elementov**

Program omogoča tudi izbiro največjega in najmanjšega elementa (procentualno glede na velikost največjega). Program generira mrežo tako, da so končni elementi zgoščeni na tistih mestih, kjer je predvidena večja sprememba napetosti (ob vnosu obtežbe ali ob podporah). Na sliki 9 je prikazan nosilec s končnimi elementi nepravilnih oblik, kjer je razvidno, da so končni elementi v vogalih konstrukcije vidno zgoščeni.



Slika 14: Zgostitev končnih elementov nepravilnih oblik

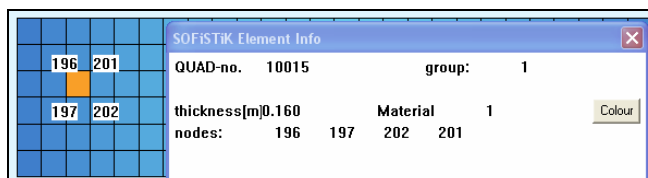
Na sliki 10 vidimo, da je možna tudi zgostitev ortogonalnih končnih elementov.



Slika 15: Zgostitev ortogonalnih končnih elementov

V programu Animator-view je omogočen vpogled v:

- lastnosti posameznega končnega elementa (obarvan oranžno):



Slika 16: Lastnosti končnih elementov

- položaj vozlišč končnega elementa:

nodes:	X[m]	Y[m]	Z[m]
196	4.945	-1.652	-0.000
197	4.945	-1.819	-0.000
202	4.791	-1.819	-0.000
201	4.791	-1.652	-0.000

Slika 17: Podatki o geometriji vozlišč izbranega končnega elementa

#### **4 NAČINI OBRAVNAVANJA T-PREREZOV S PROGRAMI SOFISTIK**

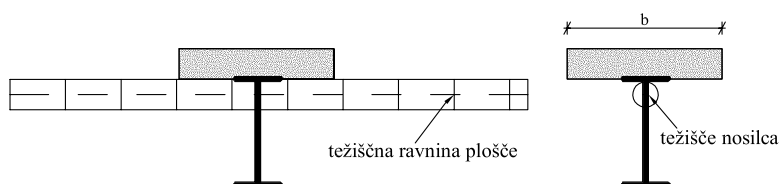
Nosilci v plošči so lahko modelirani na različne načine. V programih Sofistik so možni štirje načini obravnavanja T-prerezov. Vsak način ima svoje prednosti in slabosti. Na ploščo je možno priključevati tako jeklene profile, kakor tudi betonske prereze različnih oblik. V nadaljevanju sem predstavil tri načine, na katere je možno v Sofistiku obravnavati T-prereze. Četrty način je namenjen analizi mostov.

Pri opisu primerov sem uporabil jeklene profile zato, da je razlika med posameznimi načini modeliranja bolj očitna. Poleg tega pa pridejo taki računski modeli v poštev tudi pri sovprežnih stropovih. Opisu vsakega načina sledi enostavna konstrukcija plošče z rebrom, zasnovana na ustrezen način in pripadajoči rezultati. V vsakem primeru sem predstavil variante, ki so se mi zdele zanimive za primerjavo in za spoznavanje dejanskega delovanja programa. Ker so me zanimale samo notranje sile in pomiki konstrukcije ob različnih vhodnih podatkih, ne pa tudi dimenzioniranje, sem upošteval samo lastno težo brez koristne obtežbe. Primeri se med seboj razlikujejo glede na upoštevani prerez nosilca (pravokotnik ali T-prerez) in glede na način priključitve nosilca na ploščo (centrična ali ekscentrična). Kot obtežba je vedno upoštevana le lastna teža, ki je upoštevana avtomatsko, ali pa je podana neposredno med obtežbami.



#### 4.1 T-nosilec v enostavni ravninski plošči

Ravninska obravnava plošč običajno ne upošteva osnih sil oziroma osnih deformacij osrednje ravnine plošče. Ne glede na to, ima ekscentrično priključen element večjo togost, kakor centrično priključen element. Širina plošče  $b$ , ki sodeluje pri prevzemu obtežbe je zato podana v prerezu nosilca. Ta nosilec je centrično priključen na končne elemente plošče; težišče prereza nosilca pa je pri temu postavljeno v višino težišča plošče.



Slika 18: Centrična priključitev nosilca s širino pasnice betona  $b$  na ploščo

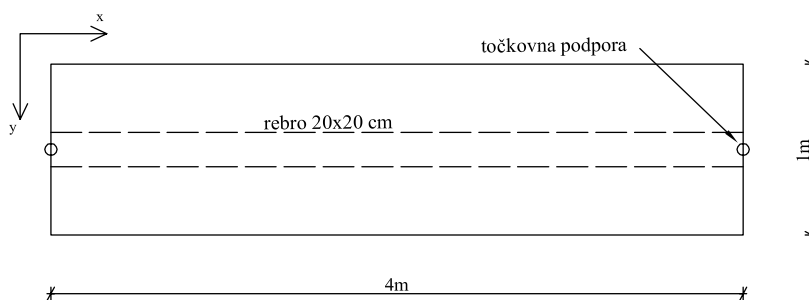
Ker je zdaj beton na širini  $b$  v sistemu dvakrat definiran, program v tem primeru (ravninska analiza plošč) avtonatsko zmanjša togost nosilca na naslednji način:

$$I (\text{nosilca}) = I (\text{T-nosilca}) - b \cdot h^3 / 12$$

V naslednjem koraku program za analizo konstrukcije (ASE ali SEPP) najprej izračuna upogibni moment v elementu z zmanjšano togostjo ( $M$  nosilca) in končno prišteje upogibni moment plošče  $m$  v območju širine  $b$  tako, da shrani skupni upogibni moment T-nosilca kot  $M (\text{T-nosilca}) = M\text{-nosilca} + m \cdot b$

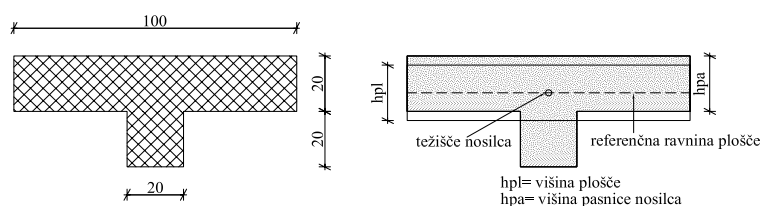
##### 4.1.1 Primer modeliranja centričnega priklopa T-prereza na ploščo

Modeliral sem ploščo z betonskim T-prerezom. Geometrija plošče je razvidna iz slike 19.



Slika 19: Geometrija obravnavane plošče

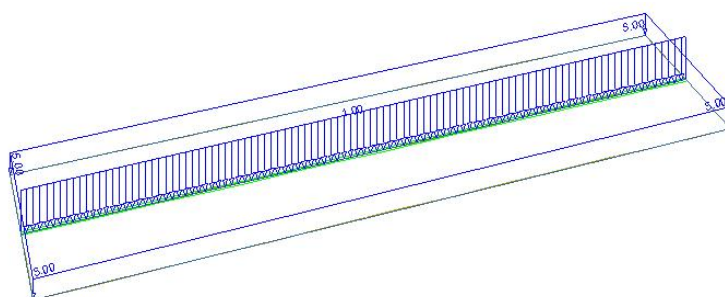
Končni elementi plošče so ortogonalni in veliki od 0,1m do 0,25m. Upoštevani nosilec je centrično priključen na ploščo in ima obliko T-prereza, kar je razvidno iz slike 20.



**Slika 20: Dimenzije nosilca in nosilec, centrično priključen na ploščo**

Upoštevana je samo lastna teža, ki jo program upošteva avtomatsko. Preveril sem, ali je obtežba ustrezna, ali pa je dvakrat definiran beton upoštevan tudi kot dvojna obtežba konstrukcije.

- ploskovna obtežba  $g_{pl} = 0,2m * 0,25kN/m^3 = 5kN/m^2$
- linijska obtežba nosilca  $g_{nos} = 0,2m * 0,2m * 0,25kN/m^3 = 1kN/m$



**Slika 21: Obtežba, ki jo upošteva program**

Iz slike 21 je razvidno, da je v programu lastna teža pravilno upoštevana. V ravninski analizi plošč torej program pri avtomatskem upoštevanju lastne teže, reducira dvakrat definiran beton.

Upogibne momente in pomike nosilca na sredini razpona ( $L=2m$ ) sem za primerjavo izračunal tudi "peš".

$$M = \frac{ql^2}{8} \quad u = \frac{5ql^4}{384EI}$$

$$q = (1kN/m + 5kN/m) = 6kN/m$$

$$l = 4m$$

$$E = 2,88476 * 10^7 \text{ kN/m}^2 \text{ (podatek za beton trdnostnega razreda C 20/25 iz programa)}$$

$$I = 0,002133m^4 \text{ (vztrajnostni moment za T-prerez)}$$

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{6kN/m * 4^2 m^2}{8} = 12kNm$$

$$u = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 * 6kN/m * 4^4 m^4}{384 * 2,88476 * 10^7 \text{ kN/m}^2 * 0,002133m^4} = 0,000325m = 0,325mm$$

Izpis iz programa Ursula:

```
Statistic Beam - Additional Forces from a Slab
Loadcase 1
The printed beam-forces include max. additional forces of a slab:
max. beam-force without slab-addition | max. slab-addition
cnr  bm      N      Vz      My |      N      Vz      My
    [m]    [kN]    [kN]    [kNm] |    [kN]    [kN]    [kNm]
  1  1.00      0.0    10.52   8.27 |    0.0     1.99    3.68

Explanations to the problem of beams in a slab:
For beams within a slab, the stiffness of the beam is reduced due to the
stiffness of the slab, if the cross-section is defined in AQUA with a
width bm - SR, RECT or QNR-polygon.
In the beam results the force-parts of the slab are then added to the
beam results for a following calculation of reinforcement.
```

Izpis iz programa Ursula nam dodatno pojasni, kako je upogibni moment v nosilcu izračunan. Najprej je izračunan upogibni moment nosilca z reducirano togostjo ( $M_y=8,27\text{kNm}$ ), nakar program prišteje upogibne momente plošče v območju definirane širine pasnice T-prereza b ( $M_y=3,68\text{kNm}$ ). Na tak način so dobljeni upogibni momenti nosilca, ki nam jih program prikaže v rezultatih.

**Preglednica 1: Primerjava rezultatov**

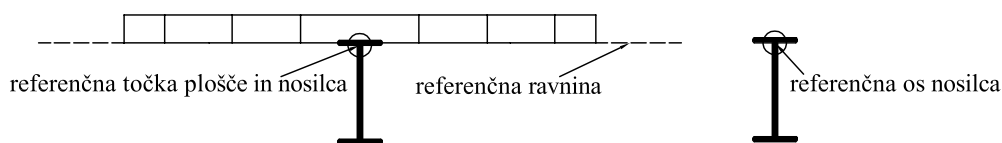
Primer:	program	peš
Upogibni momenti plošče [kNm/m]	3,68	-
Upogibni momenti nosilca[kNm]:	11,95	12
Pomiki nosilca[mm]:	0,326	0,325

V preglednici 1 so zbrani rezultati iz programa in rezultati “peš” računa. Ker program reducira togost betona, so pomiki skoraj popolnoma identični. Tudi upogibni momenti nosilca so enaki. Iz tega vidika je ta način zelo praktičen, saj nam ni potrebno upoštevati nepravilnosti, do katerih bi lahko prihajalo v primeru, da program ne bi avtomatsko reducirala togosti in teže dvakrat definirane betona. Moramo pa seveda imeti v mislih, da prihaja pri tem načinu do drugih nepravilnosti, ki so posledica centrične namesto ekscentrične priključitve nosilca na ploščo. Vendar pa so za dimenzioniranje navadnih objektov v inženirski praksi te nepravilnosti v sprejemljivih vrednostih.

## 4.2 Fizično korektno priključeni elementi

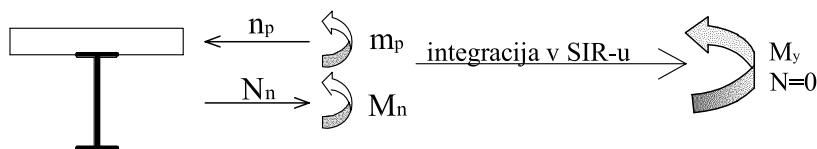
Prva metoda velja samo za centrično priključene nosilce, obravnavane v ravninski plošči, torej v dvo-dimenzionalni analizi. Če so v analizi prisotni ekscentrični nosilci, prva metoda (redukcija togosti nosilca) ne ustreza več. Ekscentrični nosilci namreč v tridimenzionalni analizi povzročajo osne sile v končnih elementih plošče. Zato je že v osnovi prva metoda izklopljena za ekscentrične nosilce. O fizično korektno priključetnih končnih elementih

govorimo, kadar so ploskovni elementi definirani ekscentrično z referenčno ravnino na spodnjem robu plošče; nosilec pa je definiran kot ekscentrični nosilec spodaj z referenčno osjo v višini osrednje ravnine plošče.



Slika 22: Ekscentrična priključitev nosilca na ploščo

Širine  $b$ , ki sodeluje pri prevzemu obtežbe, ni potrebno podati (tako, kot v prvem primeru). Izračunana je namreč implicitno v analizi konstrukcije. Kljub temu, da sistem izgleda na prvi pogled popoln, ima določene pomanjkljivosti. Za dimenzioniranje potrebujemo upogibne momente, ki delujejo na nadomestni T-prerez. S tovrstno analizo pa dobimo ločeno osne sile v plošči, osne sile v nosilcu, upogibne momente v plošči in upogibne momente v nosilcu. Programi Sofistik omogočajo avtomatsko integracijo notranjih sil na določeni širini s programskim modulom SIR. Rezultat integracije je upogibni moment, ki deluje na nadomestni T-prerez; osna sila pa je enaka nič.



Slika 23: Notranje sile v nadomestnem T-prerezu

Ta postopek zahteva dodatno delo z vnosom širine, na kateri želimo integrirati notranje sile plošče v programskem modulu SIR.

Sledijo trije primeri modeliranja končnih elementov na ta način. Pri vseh sem izračunal upogibni moment, ki deluje na nadomestni T-prerez, ki ga drugače lahko izračuna tudi programski modul SIR. Geometrija plošče in dimenzija rebra, ki je pod ploščo, je v vseh primerih enaka in je prikazana na sliki 19. Primeri se razlikujejo v tem, kje leži izbrana referenčna ravnina plošče. Te primere z različno referenčno ravnino plošče sem izbral zato da pokažem pomembnost poznavanja značilnosti programa. Vedeti je namreč potrebno, za katero točko v končnem elementu veljajo izračunani momenti. Upogibni momenti, ki jih dobimo v plošči s programi Sofistik, so vedno izračunani glede na težišče plošče tudi, če definiramo

referenčno ravnino plošče druge. Enako velja za upogibne momente v nosilcu; izračunani so glede na težišče nosilca (ne glede na to, kam postavimo referenčno os nosilca).

Za izračun skupnega upogibnega momenta, ki deluje nadomesti T-prerez potrebujemo naslednje štiri količine (slika 3):

-osna sila v nosilcu  $N_n$

-upogibni moment v nosilcu  $M_n$

- integral membranskih sil  $N_p$  v plošči v območju vplivne širine  $b_v$  :

$$N_p = \int_{-bv/2}^{bv/2} n_p ds \quad (3)$$

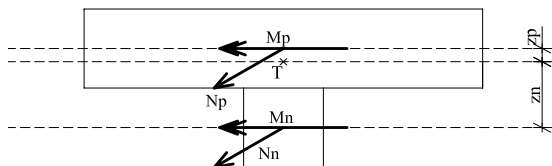
-integral upogibnih momentov  $M_p$  v plošči v območju vplivne širine  $b_v$  :

$$M_p = \int_{-bv/2}^{bv/2} m_p ds \quad (4)$$

Skupni moment nadomestnega T-prereza izračunamo glede na težišče nadomestnega T-prereza po naslednji enačbi:

$$M = M_n + M_p + N_n * z_n - N_p * z_p \quad (5)$$

Na naslednjih sliki so označene količine, ki se pojavijo v izrazu (5):



Slika 24: Sile in ročice v nadomestnem T-prerezu

Če želimo imeti ravnotežje sil, mora veljati  $N_n + N_p = 0 \Rightarrow N_n = -N_p$

Izraz za izračun upogibnega momenta (5) lahko potem zapišemo na naslednji način:

$$M = M_n + M_p + N_n * (z_n + z_p)$$

če upoštevamo še enakost  $z = z_n + z_p$

$z$ .....razdalja med težiščem plošče in težiščem nosilca ("ročica" notranjih sil),

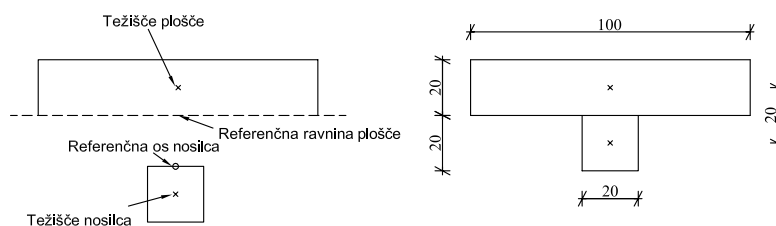
potem dobimo končno enačbo za izračun notranjih sil v nadomestnem T-prerezu:

$$M = M_n + M_p + N_n * z \quad (6)$$

Upogibni moment, izračunan po enačbi (6) velja sicer za katerokoli točko v T-prerezu. Zato nam ni potrebno računati težišča nadomestnega T-prereza. To pa velja zato, ker je vsota osnih sil v prerezu enaka 0.

#### 4.2.1 Ekscentrična priključitev pravokotnega prereza-primer 2a

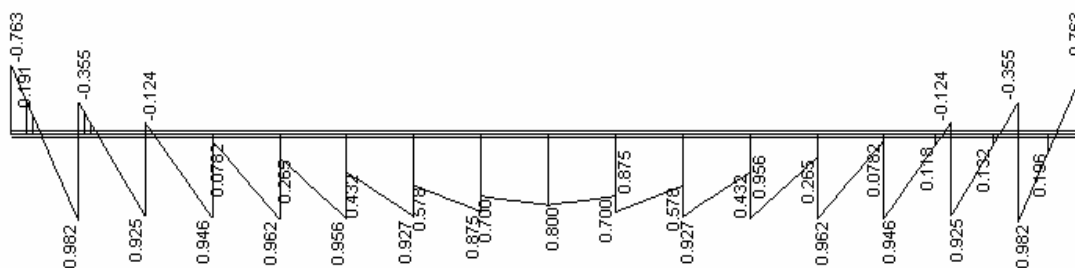
Geometrija plošče je razvidna iz slike 19, način priključitve nosilca na ploščo pa je razviden iz slike 25. Gre za ekscentrično priključitev pravokotnega nosilca na spodnji rob plošče.



Slika 25: Način priključitve nosilca na ploščo

Lastna teža je upoštevana avtomatsko, saj beton ni dvakrat definiran. Končni elementi so 0,1m-0,25m veliki.

Na naslednji sliki so prikazani izračunani upogibni momenti nosilca.



Slika 26: Izračunani upogibni momenti nosilca [kNm]

Na sliki 26 vidimo, da so upogibni momenti v nosilcu “žagaste” oblike. Do tega prihaja zaradi prenosa obtežbe med vozlišči končnih elementov. Ostali rezultati so podani v preglednici 2.

Preglednica 2: Rezultati notranjih sil za primer 2a

Rezultati:	min	max
Membranske sile [kN/m]	-40,47	0,50
Upogibni momenti plošče [kNm/m]	-0,31	3,87
Osne sile nosilca [kN]	2,63	36,87
Upogibni momenti nosilca [kNm]	-0,52	0,96
Pomiki nosilca [mm]	0	0,34

Osne sile, upogibni momenti in pomiki v nosilcu veljajo za pravokotni nosilec dimenzij 20x20cm. Upogibnih momentov zato ne moremo kar primerjati z upogibnimi momenti v primeru 1a, saj tam delujejo na T-prereza, ki ima večjo togost in površino.

Upogibni moment nadomesntega T-prereza, ki bi bil primerljiv s prvim primerom, izračunamo po enačbi (6)

$$M = M_n + M_p + N_n \cdot z$$

Potrebujemo torej naslednje količine:

- upogibni moment nosilca  $M_n$
- integral upogibnih momentov v plošči  $M_p$
- osno sila v nosilcu  $N_n$
- razdaljo med težiščem nosilca in težiščem plošče  $z$

Če želimo dobiti vrednost  $M_p$ , moramo upogibne momente v plošči  $m_p$  integrirati na vplivni širini  $b_v$ .

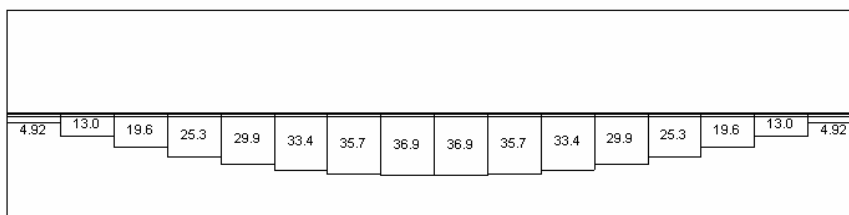
$$M_p = \int_{-b_v/2}^{b_v/2} m_p ds$$

Vplivno širino pa izračunamo s pomočjo enačbe (1).

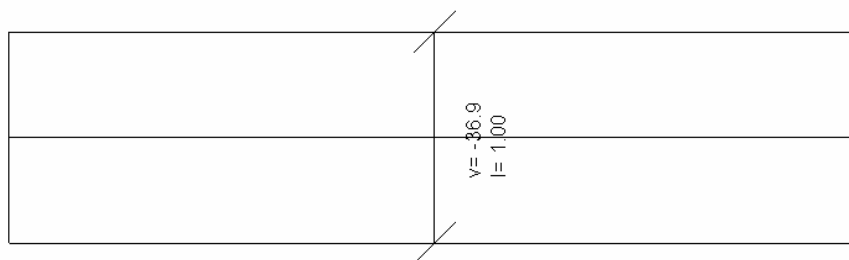
$$N_p = \int_{-b_v/2}^{b_v/2} n_p ds = -N_n$$

Vplivna širina je torej tista razdalja, na kateri je integral membranskih sil plošče enak osni sili na sredini nosilca. Za izračun integrala notranjih sil v plošči na določeni razdalji, nam program WinGraf nudi ukaz, s katerim dobimo željeni rezultat. Z ukazom "cut" prerežemo konstrukcijo na izbrani širini in pogledamo potek notranjih sil v prerezu plošče. Opcija "total force" pa izvrednoti integral notranjih sil na tem območju. Ko torej izenačimo vrednost dobljenega integrala membranskih sil v plošči na izbrani širini z maksimalno osno silo v nosilcu, imamo vplivno širino  $b_v$ .

Na naslednji strani imamo na sliki 27 potek osnih sil nosilca. Osna sila je "stopničasta" zaradi prenosa obtežbe med končnimi elementi preko vozlišč.



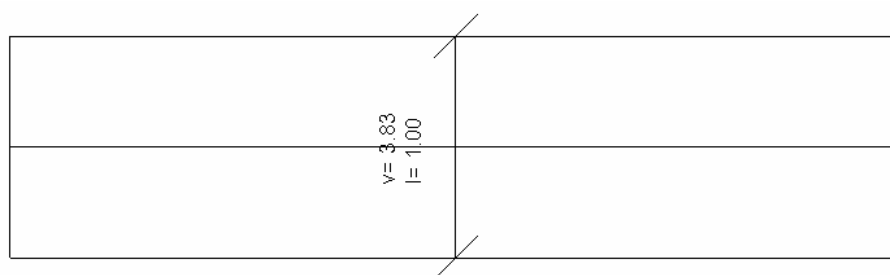
Slika 27: Osna sila nosilca [kN]



Slika 28: Integral membranskih sil v plošči na razdalji  $l=1\text{m}$  [kN]

Iz slike 21 lahko razberemo, da je osna sila v nosilcu na sredini razpona enaka 36,9 kN. Iz slike 22 pa je razvidno, da je integral membranskih sil na območju širine enega metra enak 36,9 kN. Torej je vplivna širina enaka  $b_v=1\text{m}$ .

Zdaj lahko na območju vplivne širine integriramo upogibne momente v plošči, ki jih potrebujemo za izračun skupnega upogibnega momenta. Rezultat le-tega integrala je razviden iz slike 24.



Slika 29: Integral upogibnih momentov plošče na razdalji  $l=1\text{m}$  [kN]

Na zgornji sliki je označen konstrukcije v prečni smeri na polovici razpona; dolžino reza ( $l=1\text{m}$ ) in rezultat integrala upogibnih momentov v plošči v tem prerezu. Zdaj imamo torej vse podatke, ki jih potrebujemo za izračun skupnega momenta po enačbi 1.

$$M_n = 0,962 \text{ kNm}$$



$$M_p = 3,83 \text{ kNm}$$

$$N_n = 36,86 \text{ kN}$$

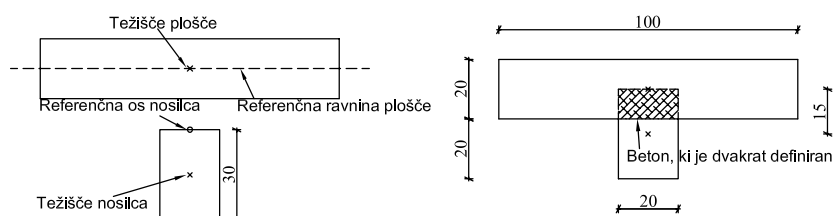
$$z = 0,2 \text{ m}$$

$$M = M_n + M_p + N_n * z = 0,962 \text{ kNm} + 3,83 \text{ kNm} + 36,86 \text{ kN} * 0,2 \text{ m} = 12 \text{ kNm/m}$$

Izračunani upogibni moment se torej ujema z momentom, izračunanim "peš". Vendar pa je tu potrebno mnogo več dela še po tem, ko nam program izračuna notranje sile v nosilcu in plošči.

#### 4.2.2 Ekscentrična priključitev pravokotnega prereza-primer 2b

Geometrija plošče je razvidna iz slike 19. Prerez nosilca in njegova priključitev na ploščo pa je razvidna iz naslednje slike:



Slika 30: Način priključitve nosilca na ploščo

Lastna teža je podana ročno, saj je beton deloma dvakrat definiran. Pri ekscentričnih priključitvah nosilcev na ploščo, program ne reducira dvakrat definiranega betona.

Preglednica 3: Notranje sile in pomiki primera 2b

Rezultati:	min	max
Membranske sile [kN/m]	-41,52	0,44
Upogibni momenti plošče [kNm/m]	-0,20	3,79
Osne sile nosilca [kN]	2,53	37,81
Upogibni momenti nosilca [kNm]	-0,40	2,62
Pomiki nosilca [mm]	0	0,33

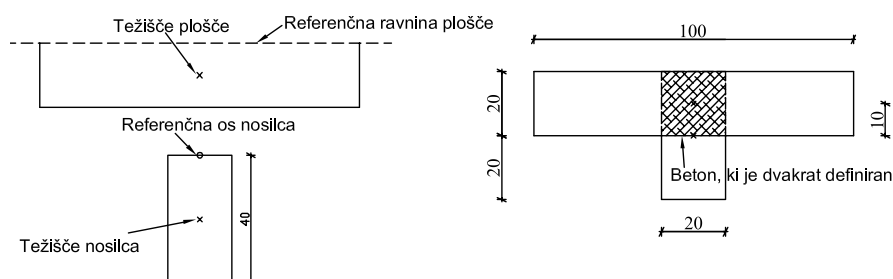
Izračun upogibnega momenta nadomestnega T-prereza (enačba 6):

$$M = M_n + M_p + N_n * z = 2,62 \text{ kNm} + 3,71 \text{ kNm} + 37,8 \text{ kN} * 0,15 \text{ m} = 12 \text{ kNm/m}$$

Osne sile in momenti na sredini nosilca so skoraj enaki, kot v primeru 2a in tudi končni skupni moment je enak momentu, izračunanemu "peš".

### 4.2.3 Ekscentrična priključitev pravokotnega prereza-primer 2c

Geometrija plošče je razvidna iz slike 19, način priključitve nosilca na ploščo pa je razviden iz naslednje slike.



Slika 31: Priključitev nosilca na ploščo

Lastna teža je podana ročno, saj je tudi tu beton deloma dvakrat definiran. Tukaj je območje prekrivanja plošče in nosilca (torej območje “podvajanja” betona) še nekoliko večje, kot v primeru 2b.

Nosilec pa je zdaj kar dvakrat višji od primera 2a, ne glede na to, da je zunanji videz konstrukcije enak (saj je višina rebra pod ploščo enaka v vseh primerih).

Preglednica 4: Notranje sile in pomiki primera 2c

Rezultati:	min	max
Membranske sile [kN/m]	-31,78	0,30
Upogibni momenti plošče[kNm/m]	-0,18	3,52
Osne sile nosilca [kN]	1,79	28,91
Upogibni momenti nosilca [kNm]	-0,20	5,63
Pomiki nosilca [mm]	0	0,31

Izračun upogibnega momenta nadomestnega T-prereza po enačbi 6:

$$M = M_n + M_p + N_n \cdot z = 5,63 \text{ kNm} + 3,48 \text{ kNm} + 28,91 \text{ kN} \cdot 0,15 \text{ m} = 12 \text{ kNm}$$

#### 4.2.4 Primerjava primerov 2a, 2b in 2c

V preglednici, kjer so zbrani rezultati vseh treh primerov, so podane absolutno ekstremne vrednosti (ne glede na predznak) notranjih sil in pomikov :

**Preglednica 5: Primerjava rezultatov 2a, 2b in 2c**

<b>Rezultati:</b>	<b>2a</b>	<b>2b</b>	<b>2c</b>
Membranske sile [kN/m]:	-40,47	-41,519	-31,784
Upogibni momenti plošče [kNm/m]:	3,87	3,79	3,52
Osna sila nosilca [kN]:	36,87	37,81	28,91
Upogibni momenti nosilca [kNm]:	0,96	2,62	5,63
Pomiki nosilca [mm]:	0,34	0,33	0,31

Iz primerjave je razvidno, da prihaja do manjših razlik v rezultatih ne glede na to, da je lastna teža definirana ročno in zaradi tega ne prihaja do podvajanja obtežbe. Do razlike v rezultatih prihaja zato, ker v tem primeru program ne reducira togosti plošče, ko je beton dvakrat definiran (primera 2b in 2c). V primeru 2c, ko je nosilec 40 cm visok, pride do manjše razlike v rezultatih, kljub temu, da je razmerje vztrajnostnega momenta nosilca ( $bh^3/12$ ) med primeroma 2a in 2c, enaka 1:8.

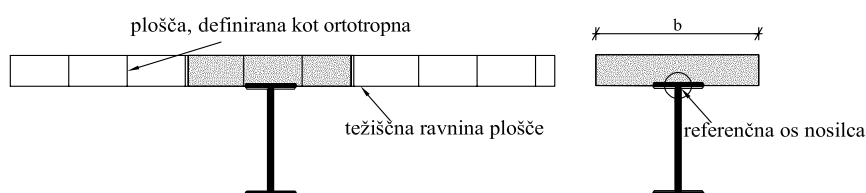
Poleg razlike v togosti, je pomembno upoštevati spremembo velikosti ročice notranjih sil  $z$ . Le-ta se namreč zmanjšuje: od vrednosti 0,2 v primeru 2a do vrednosti 0,1 v primeru 2c.

V primeru 2c so zaradi večje upogibne togosti nosilca v nosilcu precej večji upogibni momenti. Zaradi večjega momenta, pa so v nosilcu prisotne manjše osne sile.

Vsekakor je najbolj pravilni primer 2a, ko je beton definiran samo enkrat je upoštevana prava togost nosilca.

### 4.3 Ortotropna plošča

V izogib osnim silam in upogibnim momentom v plošči, lahko definiramo ortotropno ploščo s šibko osno togostjo v smeri, ki je vzporedna z osjo nosilca. Nosilec priključimo na ploščo ekscentrično. Definiran mora biti celoten T-prerez nosilca. Ker je v tem primeru beton dvakrat definiran, je potrebno paziti na vnos lastne teže, kajti brez dodatnih ukazov bi bila upoštevana dvakrat. Na sliki 32 je prikazan način priključka T-prereza v ortotropno ploščo.



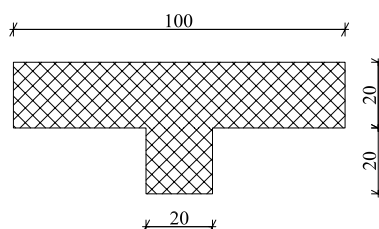
Slika 32: Prikaz modeliranja ortotropne plošče

V takem modelu predstavlja togost prečnega prereza nosilca skupno togost v tej smeri in upogibni moment, ki ga dobimo, velja za celotni prerez, ki smo ga definirali. S tem upogibnim momentom lahko brez nadaljnega računanja dimenzioniramo prerez, ki smo ga predhodno določili. Pomankljivost tega modeliranja je, da plošča ne deluje kot izotropna plošča in jo na podlagi rezultatov lahko dimenzioniramo le v smeri pravokotno na nosilec, saj ortotropna plošča v vzdolžni smeri nosilca nima osne togosti.

V tem primeru sem obravnaval dve različni konstrukciji. In sicer prvo, katere geometrija je prikazana na sliki 14 in je primerljiva s primeri v razdelkih 4.1 in 4.2, druga konstrukcija pa prikaže, da je pomembna širina pasu, v katerem je plošča definirana kot ortotropna.

#### 4.3.1 Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo-primer 3a

Geometrija plošče je razvidna iz slike 19, dimenzije T-prereza pa so razvidne iz naslednje skice.



Slika 33: Nosilec, ekscentrično priključen na ploščo

Referenčna ravnina plošče je v težišču plošče. Lastna teža je podana ročno, saj je beton dvakrat definiran. Plošča je ortotropna, debelino plošče v smeri nosilca reduciramo na 1mm. Rezultati so zbrani v preglednici.

**Preglednica 6: Rezultati ekscentrično priključenega T-prereza na ortotropno ploščo**

<b>Primer:</b>	<b>3a</b>
Debelina plošče v smeri nosilca [m]	0
Membranske sile v plošči [kN/m]:	0
Upogibni momenti plošče [kNm/m]:	0
Osne sile nosilca [kN]:	0,018
Momenti v nosilcu [kNm]:	12
Pomiki v nosilcu [mm]:	0,325

V preglednici 6 vidimo, da v plošči ni notranjih sil, saj je njena debelina skoraj enaka nič. Vso obtežbo prevzame nosilec, ki je definiran kot T-prerez.

#### 4.3.2 Ekscentrična priključitev T-prereza na navadno ploščo-primer 3b

Debelina plošče v smeri nosilca je enaka 20cm (kar pomeni, da je celoten beton plošče upoštevan 2x). Obtežba je podana ročno.

**Preglednica 7: Rezultati ekscentrično priključenega T-prereza na ploščo**

<b>Primer:</b>	<b>3b</b>
Debelina plošče v smeri nosilca [m]	0,2
Membranske sile v plošči [kN/m]:	-15,49
Upogibni momenti plošče [kNm/m]:	2,76
Osne sile nosilca [kN]:	14,04
Upogibni momenti nosilca [kNm]:	8,809
Pomiki nosilca [mm]:	0,239

#### 4.3.3 Primerjava primerov 3a in 3b

V preglednici 8 sem primerjal rezultate ekscentrično priključenega nosilca s T-prerezom na ortotropno ploščo in ekscentrično priključenega nosilca s T-prerezom na navadno ploščo. V preglednici je podana tudi debelina plošče.

**Preglednica 8: Primerjava rezultatov primerov 3a in 3b**

<b>Primer:</b>	<b>3a</b>	<b>3b</b>
Debelina plošče v smeri nosilca [m]	0	0,2
Membranske sile v plošči [kN/m]:	0	-15,49
Upogibni momenti plošče [kNm/m]:	0	2,76
Osne sile nosilca [kN]:	0,018	14,04
Momenti v nosilcu [kNm]:	12	8,809
Pomiki v nosilcu [mm]:	0,325	0,239

Iz preglednice je razvidno, da prihaja do opaznih razlik v rezultatih. V primeru 3b je beton dvakrat definiran, zaradi česar je upoštevana togost prereza, ki je višja, kakor v realnosti. Zaradi večje togosti, so v primeru 3b pomiki precej manjši, kot v primeru 3a. Ker so pomiki linearno odvisni od togosti prereza, lahko preverimo, ali je razmerje togosti definiranih prerezov primerov 3a in 3b ( $I_{3a}/I_{3b}$ ), obratno sorazmerno s pomiki nosilcev primerov 3a in 3b ( $u_{3a}/u_{3b}$ ):

$$I_{3a} = I_n = 0,002133\text{m}^4$$

$$I_{3b} = I_n + I_{pl} = 0,002133\text{m}^4 + 0,000666\text{m}^4 = 0,002799\text{m}^4$$

$I_n$  = vztrajnostni moment nosilca (T-prerez)

$I_{pl}$  = vztrajnostni moment plošče (pravokotnik, dimenzije 1m x 0,2m)

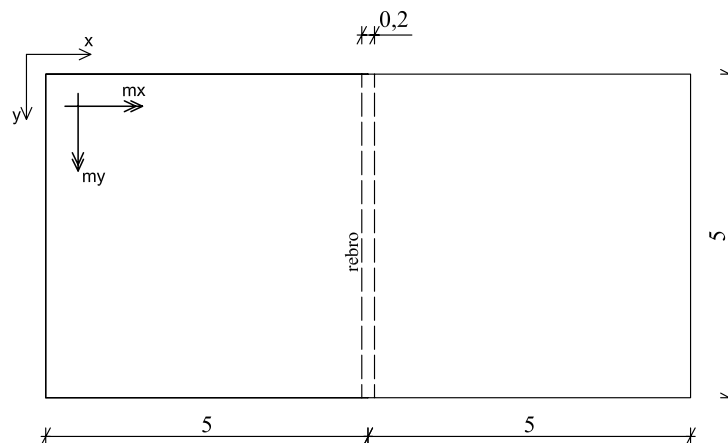
$$\frac{I_{3b}}{I_{3a}} = \frac{0,002799\text{m}^4}{0,002133\text{m}^4} = 1,3125$$

$$\frac{u_{3a}}{u_{3b}} = \frac{0,325\text{mm}}{0,239\text{mm}} = 1,36 \quad \text{ozroma} \quad \frac{I_{3b}}{I_{3a}} = 1,3125 \cong 1,36 = \frac{u_{3a}}{u_{3b}}$$

V primeru 3b se obtežba prenaša tudi preko plošče, kar v primeru ortotropne plošče (3a) ni možno, saj ni vzdolžne osne togosti plošče, ki bi omogočala prenos obtežbe. Preko plošče se obtežba prenaša v obliki upogibnega momenta in preko membranskih sil. Ker so prisotne membranske sile v plošči, se tudi v nosilcu pojavijo osne sile. Integral membranskih sil v plošči je izenačen z osno silo v nosilcu.

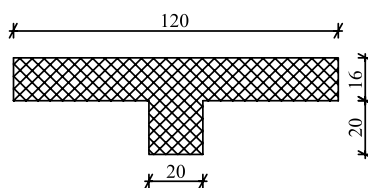
#### 4.3.4 Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo-primer 3a1

Geometrija plošče je razvidna iz slike 34.



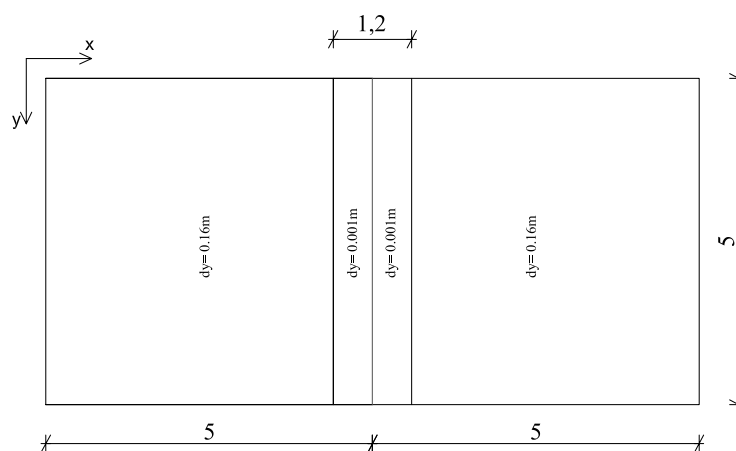
Slika 34: Skica analizirane plošče

Na zgornji skici so dimenzije analizirane plošče, globalni koordinatni sistem in smeri upogibnih momentov v plošči. Nosilec, ki je priključen na ploščo, je na naslednji sliki.



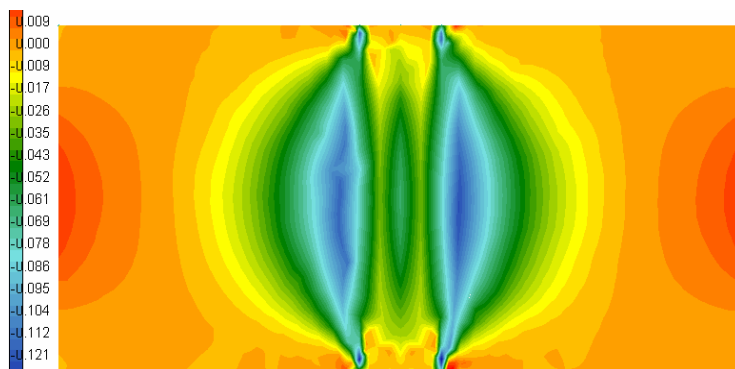
Slika 35: Prečni prerez nosilca

Plošča je podana kot ortotropna samo v pasu, kjer je sicer že definirana pasnica T-prereza. Pas, kjer je plošča definirana kot ortotropna, je razviden iz slike 36.



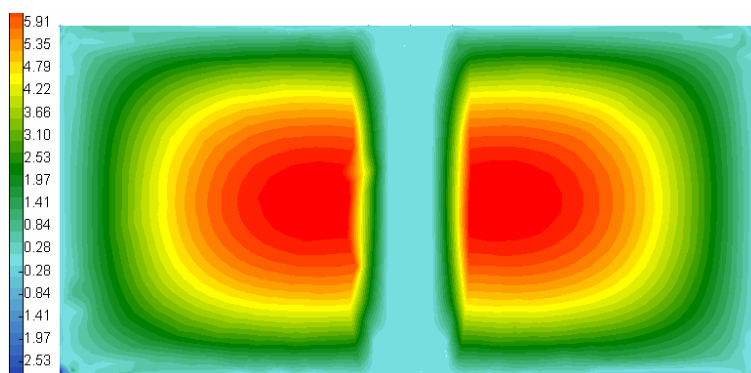
Slika 36: Ortotropna plošča v območju pasnice T-prereza

V nadaljevanju na slikah 32, 33 in 34 so prikazane notranje sile plošče.



Slika 37: Membranske sile ortotropn plošči [kN/m]

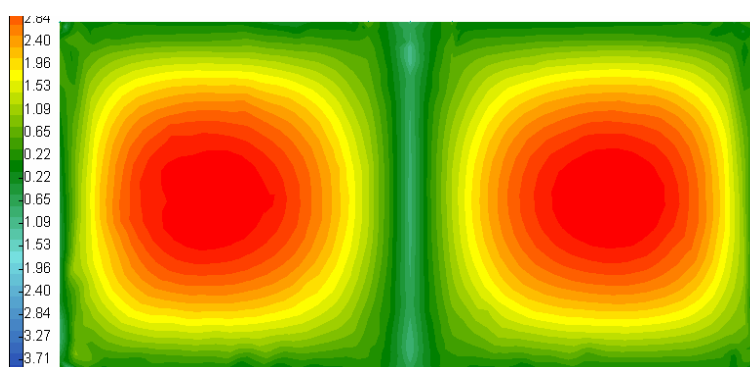
V tem primeru naj bi se sicer ne pojavljale membranske sile, saj plošča nima nobene osne togosti, ki bi lahko prevzema le-te. Vendar pa se zaradi vpliva sosednjih delov plošče, ki niso ortotropne, kljub vsemu pojavijo membranske sile. Osne sile se iz območja, ki ni ortotropno prenaša v območje, ki je ortotropno, preko strižnih sil med končnimi elementi.



Slika 38: Upogibni momenti plošče  $m_x$  [kNm/m]

Iz slike 38 je razvidno, da v območju nosilca ni upogibnih momentov  $m_x$  v plošči, saj je debelina plošče v tej smeri enaka 0 in nima upogibne togosti. Zato se tudi ne more pojaviti nikakršna obremenitev. Razlika med polji, kjer je debelina plošče enaka 0 in kjer je debelina plošče enaka 16cm, je zelo izrazita.



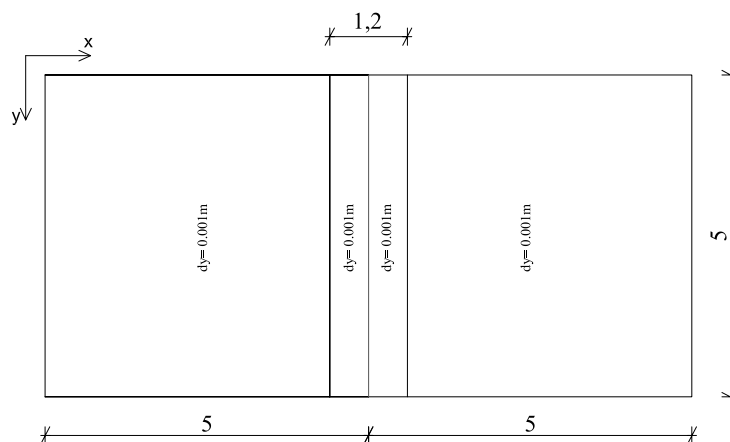


Slika 39: Upogibni momenti plošče  $m_y$  [kNm/m]

Potek upogibnih momentov plošče  $m_y$  pa je običajen, brez izrazitih sprememb v območju nosilca, saj v tej smeri ni spremembe debeline plošče.

#### 4.3.5 Ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo-primer 3a2

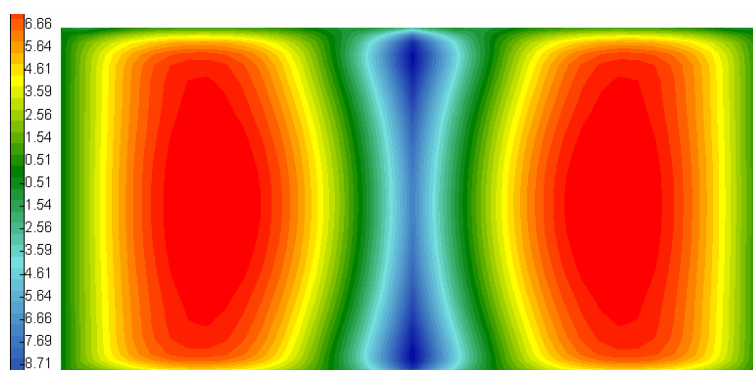
Primer 3a2 je enak primeru 3a1, le da je plošča v celotnem območju ortotropna, prerez T-nosilca, ki je ekscentrično priključen na ploščo pa je enak. Lastna teža je ponovno podana ročno in je edina obtežba.



Slika 40: Plošča, upoštevana kot ortotropna v celotnem območju

Na sliki 34 vidimo, da je debelina plošče v smeri  $y$  zmanjšana na debelino 0,001m v vseh štirih poljih- za razliko od primera 3a1, kjer je debelina plošče v smeri  $y$ , zmanjšana samo v srednjih dveh poljih, kjer je definirana pasnica nosilca T-prereza.

V tem primeru plošča v smeri  $y$  ne prenaša nobene obremenitve, saj smo ji to onemogočili s tem, ko smo osno togost v tej smeri zmanjšali na celotnem območju plošče.



Slika 41: Upogibni momenti plošče  $m_y$  [kNm/m]

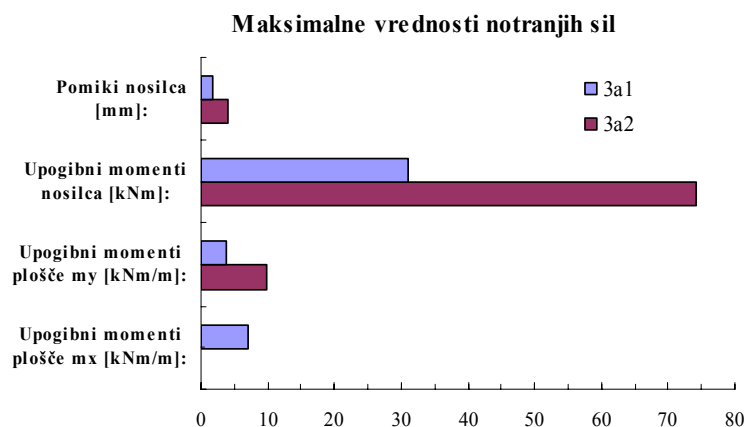
Na sliki 36 vidimo, da so se tako pozitivni, kot tudi negativni upogibni momenti plošče občutno povečali. Zdaj se vsa obtežba prenaša v smeri globalne koordinatne osi  $x$  preko nosilca in preko krajnih podpor, ki so vzporedne z nosilcem. Močno pa se poveča tudi upogibni moment nosilca in pomik le-tega.

#### 4.3.6 Primerjava primerov 3a1 in 3a2

V preglednici 9 so zbrani rezultati notranjih sil in pomikov nosilca ter rezultati notranjih sil plošče. Pri minimalnih vrednostih rezultatov, prihaja do največje razlike med upogibnim momentom plošče  $m_y$ . V primeru 3a2 mora nosilec prevzeti zelo velik del obtežbe celotne plošče. Pravzaprav mora prevzeti več obteže, kakor obe krajni podpori, ki sta vzporedni z njim skupaj. In zato tudi pride do tako velike razlike v negativnih upogibnih momentih plošče v smeri  $x$ , če se ne more nobena obtežba prenesti v smeri  $y$  drugače, kakor preko nosilca.

Preglednica 9: Primerjava rezultatov primerov 3a1 in 3a2

Minimalne vrednosti		
Primer:	3a1	3a2
Upogibni momenti plošče $m_x$ [kNm/m]:	-4,14	0
Upogibni momenti plošče $m_y$ [kNm/m]:	-4,91	-14,181
Upogibni momenti nosilca [kNm]:	0,012	0,037
Pomiki nosilca [mm]:	0	0
Maksimalne vrednosti		
Primer:	3a1	3a2
Upogibni momenti plošče $m_x$ [kNm/m]:	7,1	0
Upogibni momenti plošče $m_y$ [kNm/m]:	3,821	9,745
Upogibni momenti nosilca [kNm]:	31,08	74,12
Pomiki nosilca [mm]:	1,724	4,15



**Grafikon 1: Primerjava rezultatov 3a1 in 3a**

Tudi iz grafa je razvidno, da se vrednosti notranjih sil med seboj opazno razlikujejo. Do največje razlike prihaja pri upogibnih momentih nosilca in pri upogibnih momentih  $m_y$  v plošči.

Kot vidimo, je zelo pomembno pri tem načinu modeliranja plošče, da definiramo ploščo kot ortotropno zares samo na tistem delu, kjer je beton dvakrat definiran in ne drugje. Kajti kot vidimo iz primerov 3a1 in 3a2 dobimo neprimerno večje obremenitve in notranje sile v primeru prevelikega pasu plošče, definirane kot ortotropne.

## 5 PRIMERJALNA ANALIZA REBRASNIH STROPOV RAZLIČNIH DIMENZIJ

V nadaljevanju sem opravil primerjavo med ploščami, ki imajo različne razdalje med rebri. Določil sem vplivno širino, sodelujočo širino, rezultanto membranskih sil in upogibnih momentov na območju vplivne širine ter skupni moment, ki naj bi ga prevzel nadomestni T-prerez.

Določitev vplivne širine sem opisal v poglavju (4.2).

Sodelujočo širino, ki jo potrebujemo za dimenzioniranje T-prerezov, izračunamo iz enačbe (2)

$$N_n = -n_{p,\min} * b_{\text{sod}} \Rightarrow b_{\text{sod}} = \frac{N_n}{-n_{p,\min}}$$

### 5.1 Plošča s tremi rebri

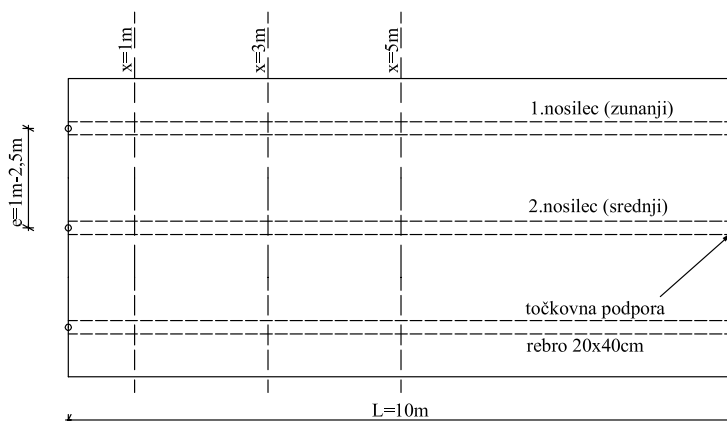
Dimenzija plošče v vzdolžni smeri je 10m; v prečni smeri pa se spreminja. V vzdolžni smeri imamo troje reber; razdalja e med njimi pa je spremenljiva: 1m, 1.5m, 2m, 2.5m.

Prečni prerez reber je pravokoten, širine 20cm in višine 40 cm; plošča je debela 16cm.

Končni elementi so modelirani po drugi metodi sofistikoze filozofije T-prerezov. Gre torej za ekscentrično priključitev pravokotnega nosilca na ploščo, zaradi česar tudi program dimenzionira nosilec kot pravokotnik in ne upošteva sodelovanja med ploščo in nosilcem. V večini primerov je zato nosilec v celoti v natezni coni. Prisoten je minimalni upogibni moment in velika natezna osna sila, zaradi česar gre za malo ekscentričnost osne sile.

Plošča je podprta točkovno na koncu reber, zaradi česar ni možen prenos obtežbe preko plošče v podpore, temveč se vsa obtežba iz plošče prenaša v podpore izključno preko reber.

Koristna obtežba je velika 4 kN/m<sup>2</sup>.



Slika 42: Skica plošče s tremi rebri

Vplivno in sodelujočo širino sem določil na zunanjem in na srednjem rebri na oddaljenosti  $x=1\text{m}$ ,  $3\text{m}$  in  $5\text{m}$  od podpore. Dobljene sodelujoče širine sem potem primerjal tudi s sodelujočo širino, ki bi jo dobil po znani formuli iz EC2 :  $b_{\text{eff}} = l_0/5 + b_0 < e$ .

Ker so nosilci členkasto podprti, je razdalja  $l_0$  enaka  $10\text{m}$ , kolikor je celoten razpon nosilca. V primeru, da bi bili nosilci vpeti, ali pa da bi bili to kontinuirni nosilci, bi bila razdalja  $l_0$  manjša. V nadaljevanju so predstavljeni posamezni primeri z rezultati v preglednicah.

Primer 10-3-1 (razpon nosilca  $10\text{m}$ , 3 rebra,  $e=1\text{m}$ )

$b_{\text{eff}}$  po EC2:

$$b_{\text{eff}} = l_0/5 + b_0 < e = 10/5 \text{ m} + 0,2\text{m} = 2,2\text{m} \Rightarrow b_{\text{eff}} = e = 1 \text{ m}$$

**Preglednica 10: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{\text{sod}}$  za primer 10-3-1**

	Vplivna širina $b_v$ [m]			Sodelujoča širina $b_{\text{sod}}$ [m]			$b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$		
	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$
1.nosilec (zunanji)	1	1,01	1,01	0,96	0,99	0,99	0,96	0,99	0,99
2.nosilec (srednji)	0,99	0,99	0,99	0,95	0,97	0,97	0,95	0,97	0,97

V preglednici 2 so vrednosti vplivne in sodelujoče širine v primeru, ko je razmak med rebri  $1\text{m}$ . Vidimo, da so vrednosti vplivne in sodelujoče širine zelo blizu tej vrednosti. Pri zunanjem nosilcu je ta vrednost še nekoliko večja od 1, notranji pa je očitno manj obtremenjen in zato je njegova vplivna in sodelujoča širina tudi manjša glede na vplivno širino zunanjega rebra. Količnik  $b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$  je blizu vrednosti 1. Kar pomeni, da se v tem primeru izračunane vrednosti skoraj ujemajo z enačbo po EC2.

Primer 10-3-2 (razpon nosilca  $10\text{m}$ , 3 rebra,  $e=1,5\text{m}$ )

$b_{\text{eff}}$  po EC2:

$$b_{\text{eff}} = l_0/5 + b_0 < e = 10/5 \text{ m} + 0,2\text{m} = 2,2\text{m} \Rightarrow b_{\text{eff}} = e = 1,5\text{m}$$

**Preglednica 11: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{\text{sod}}$  za primer 10-3-2**

	Vplivna širina $b_v$ [m]			Sodelujoča širina $b_{\text{sod}}$ [m]			$b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$		
	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$
1.nosilec (zunanji)	1,45	1,52	1,53	1,24	1,45	1,47	0,83	0,97	0,98
2.nosilec (srednji)	1,5	1,45	1,46	1,35	1,40	1,41	0,90	0,93	0,94

V primeru 10-3-2 je razdalja med rebri enaka  $1,5\text{m}$ . Tukaj vidimo malo večje razhajanje med vrednostmi za sodelujočo in vplivno širino. Bolj do izraza pride tudi spreminjanje ene in druge širine vzdolž nosilca.

Primer 10-3-3 (razpon nosilca 10m, 3 rebra, e=2m)

$b_{eff}$  po EC2

$$b_{eff} = l_0/5 + b_0 < e = 10/5 \text{ m} + 0,2\text{m} = 2,2\text{m} \Rightarrow b_{eff} = e = 2\text{m}$$

**Preglednica 12: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{sod}$  za primer 10-3-3**

	Vplivna širina $b_v$ [m]			Sodelujoča širina $b_{sod}$ [m]			$b_{sod}/b_{eff}$		
	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m
1.nosilec (zunanji)	2	2,03	2,05	1,51	1,89	1,92	0,75	0,94	0,96
2.nosilec (srednji)	2,1	1,91	1,91	1,73	1,79	1,81	0,86	0,90	0,90

Tukaj je razpon med rebri že malo večji in razlike med sodelujočo in vplivno širino so tudi večje. Tudi razlike v vrednostih med zunanjim in srednjim nosilcem so vedno večje, saj prihaja vedno bolj do izraza večja obremenitev zunanjega nosilca glede na srednjega.

Primer 10-3-4 (razpon nosilca 10m, 3 rebra, e=2,5m)

$b_{eff}$  po EC2:

$$b_{eff} = l_0/5 + b_0 < e = 10/5 \text{ m} + 0,2\text{m} = 2,2\text{m} \Rightarrow b_{eff} = 2,2\text{m}$$

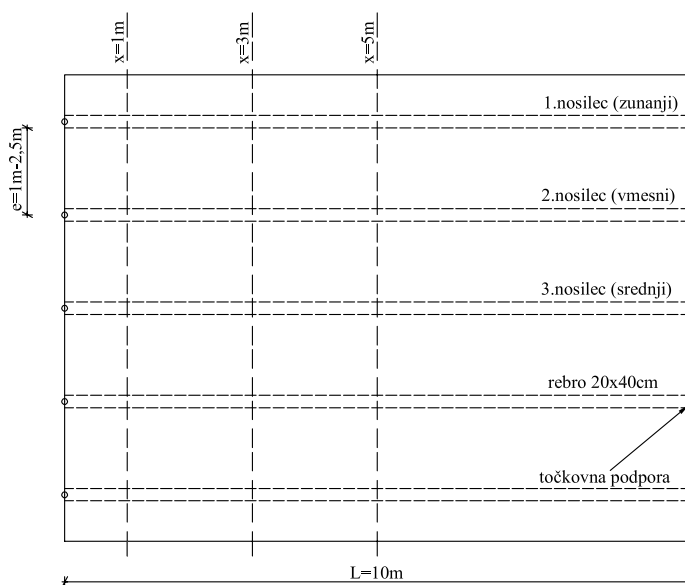
**Preglednica 13: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{sod}$  za primer 10-3-4**

	Vplivna širina $b_v$ [m]			Sodelujoča širina $b_{sod}$ [m]			$b_{sod}/b_{eff}$		
	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m
1.nosilec (zunanji)	2,58	2,45	2,48	1,71	2,28	2,33	0,77	1,00	1,02
2.nosilec (srednji)	2,4	2,34	2,32	2,08	2,17	2,18	0,87	0,97	0,98

V primeru 10-3-4 je prvič razdalja med rebri tako velika, da je izračunana  $b_{eff}$  po EC2, manjša od razdalje med rebri. Zanimivo je tudi, da je v srednjem in zunanjem nosilcu, vplivna širina bližje podpori večja. Količnik  $b_{sod}/b_{eff}$  se v tem primeru ponovno približa vrednosti 1 tako v zunanjem, kot tudi v srednjem nosilcu.

## 5.2 Plošča s petimi rebri

Pri plošči s petimi rebri je dolžina nosilcev enaka, kot v primeru plošče s tremi rebri. Razdalja e med rebri je ravno tako spremenljiva (1m, 1.5m, 2m, 2.5m). Ostale geometrijske karakteristike in način podpiranja ter zasnova konstrukcije so enaki. Kot koristna obtežba znaša  $q=4\text{kN/m}^2$ .



Slika 43: Skica plošče s petimi rebri

Vplivno in sodelujočo širino sem ponovno določil na razdalji  $x=1\text{m}$ ,  $3\text{m}$  in  $5\text{m}$ . In sicer na zunanjem, srednjem in vmesnem rebro. V tabeli je tudi normirana sodelujoča širina glede na  $b_{\text{eff}}$  po EC2.

Primer 10-5-1 (razpon nosilca 10m, 5 reber,  $e=1\text{m}$ )

$b_{\text{eff}}=1\text{m}$

**Preglednica 14: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{\text{sod}}$  za primer 10-5-1**

	vplivna širina $b_v$ [m]			sodelujoča širina $b_{\text{sod}}$ [m]			$b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$		
	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$	$x=1\text{m}$	$x=3\text{m}$	$x=5\text{m}$
1.nosilec (zunanji)	0,95	1,03	1,04	0,90	1,01	1,02	0,90	1,01	1,02
2.nosilec (vmesni)	1,00	0,98	0,98	0,95	0,96	0,97	0,95	0,96	0,97
2.nosilec (srednji)	1,01	0,97	0,97	0,98	0,95	0,95	0,98	0,95	0,95

V primeru, ko je razdalja med rebri še dokaj majhna (1m), so vrednosti tako sodelujoče, kot tudi vplivne širine približno enake. Je pa že tukaj vidna različna obremenitev nosilcev.

Ponovno je najbolj obremenjen zunanji nosilec. Ostala dva nosilca pa sta glede na rezultate manj obremenjena. Količnik  $b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$  je nekaj manjši od 1 razen pri zunanjem nosilcu, kjer pri vrednosti  $x=3$  in  $x=5\text{m}$ , preseže vrednost 1.

Primer 10-5-2 (razpon nosilca 10m, 5 reber, e=1,5m)

$b_{\text{eff}}=1,5\text{m}$

**Preglednica 15: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{\text{sod}}$  za primer 10-5-2**

	vplivna širina $b_v$ [m]			sodelujoča širina $b_{\text{sod}}$ [m]			$b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$		
	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m
1.nosilec (zunanji)	1,45	1,57	1,58	1,27	1,50	1,52	0,84	1,00	1,02
2.nosilec (vmesni)	1,57	1,46	1,46	1,42	1,41	1,41	0,94	0,94	0,94
2.nosilec (srednji)	1,6	1,45	1,43	1,44	1,40	1,39	0,96	0,93	0,93

Razdalja 1,5m med rebri nam daje podobne rezultate, kakor razdalja 1m. Vendar pa prihaja tukaj ponovno do večjih razlik tako med vplivno in sodelujočo širino, kot tudi med posameznimi rebri. Zunanji nosilec ima večjo tako vplivno, kot tudi sodelujočo širino. Medtem pa imata vmesni in srednji nosilec na različnih razdaljah x, zelo podobne širine; včasih ima večjo širino srednji nosilec; včasih pa vmesni nosilec.

Količnik  $b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$  je najbolj spremenljiv po dolžini pri zunanjem nosilcu. Pri ostalih dveh rebrih pa je količnik po dolžini nosilca dokaj enakomeren. Pri zunanjem nosilcu se tudi vplivna širina sama spremeni pri x=3 in x = 5 m glede na vrednost x=1m.

Primer 10-5-3 (razpon nosilca 10m, 5 reber, e=2m)

$b_{\text{eff}}=2\text{m}$

**Preglednica 16: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{\text{sod}}$  za primer 10-5-3**

	vplivna širina $b_v$ [m]			sodelujoča širina $b_{\text{sod}}$ [m]			$b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$		
	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m
1.nosilec (zunanji)	2,05	2,1	2,12	1,53	1,94	1,98	0,77	0,97	0,99
2.nosilec (vmesni)	2,20	1,95	1,93	1,81	2,47	1,83	0,90	0,91	0,91
2.nosilec (srednji)	2,22	1,94	1,91	1,81	1,82	1,81	0,91	0,91	0,91

Tukaj prihaja do prekoračitev sosednjih polj glede vplivne širine. Ne glede na to, da je teoretično za vplivno širino možno upoštevati največ razdaljo med rebri e, prihaja tukaj do rezultatov, ki presegajo le-to razdaljo.

Primer 10-5-4 (razpon nosilca 10m, 5 reber, e=2,5m)

$b_{\text{eff}}=2,2\text{m}$

**Preglednica 17: Vrednosti  $b_v$  in  $b_{\text{sod}}$  za primer 10-5-4**

	vplivna širina $b_v$ [m]			sodelujoča širina $b_{\text{sod}}$ [m]			$b_{\text{sod}}/b_{\text{eff}}$		
	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m	x=1m	x=3m	x=5m
1.nosilec (zunanji)	2,48	2,57	2,54	1,67	2,29	2,31	0,74	1,07	1,09
2.nosilec (vmesni)	2,68	2,47	2,4	1,90	2,21	2,20	0,90	1,01	1,00
2.nosilec (srednji)	2,57	2,46	2,4	1,86	2,22	2,21	0,88	1,01	1,00



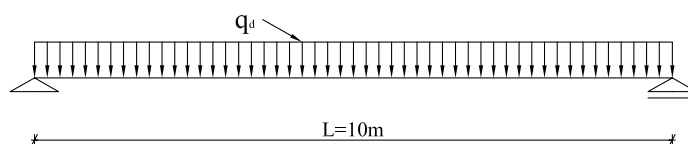
Ponovno imamo primer, ko je  $b_{eff}$  po EC2 večji od same razdalje med rebri. Opaziti je, da je sodelujoča širina pri razdalji  $x=1$  dosti manjša, kakor pa pri razdaljah  $x=3m$  in  $x=5m$ . In to velja za vse tri nosilce. Ravno obratno pa je pri drugem in tretjem nosilcu; vplivna širina pri razdalji  $x=1$  je nekoliko večja, kakor pa pri razdaljah  $x=3m$  in  $x=5m$ . Količnik  $b_{sod}/b_{eff}$  je v večini primerov skoraj enak 1.

### 5.3 Izračun upogibnih momentov

Konstrukciji, ki sem ju prej obdelal in ugotavljal vplivno ter sodelujočo širino, sem v nadaljevanju tudi statično analiziral in ugotavljal, kolikšni upogibni momenti delujejo na posamezni nadomestni T-prerez. Najprej sem upogibne momente izračunal peš, potem pa sem jih izračunal še iz rezultatov, dobljenih iz programa.

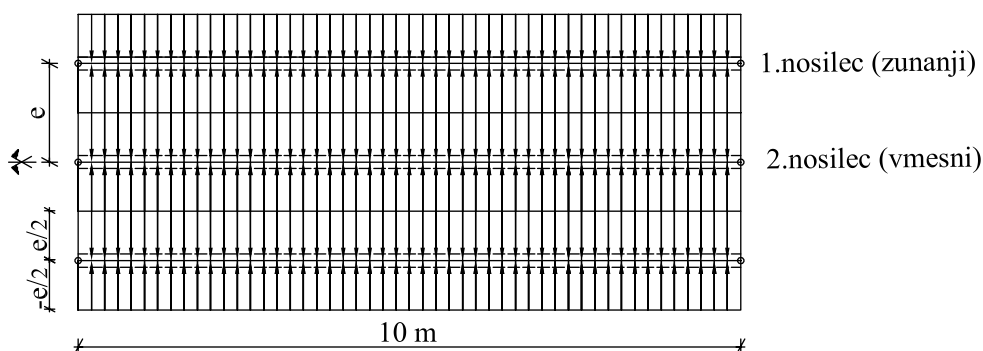
#### 5.3.1 Izračun upogibnih momentov peš

Pri izračunu upogibnih momentov peš, sem uporabil računski model, ki je razviden iz naslednje slike.



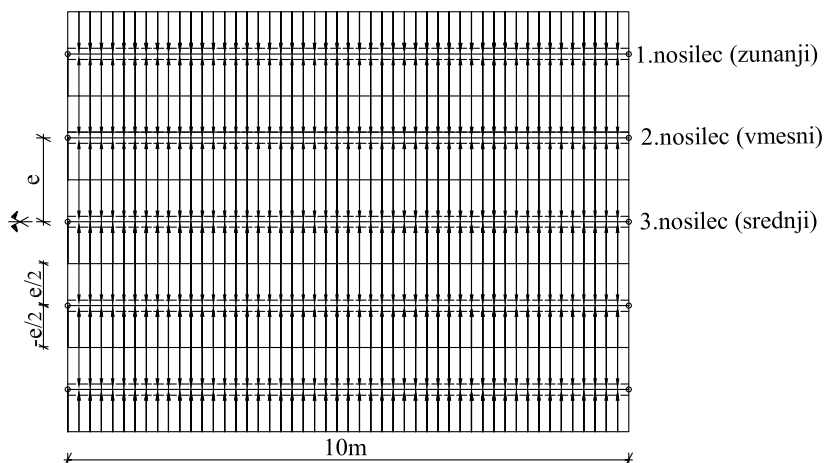
Slika 44: Računski model nadomestnega linijskega elementa

Obtežbo sem upošteval na klasičen način. In sicer sem predpostavil simetričen raznos obtežbe plošče na vsako rebro.



Slika 45: Prenos obtežbe pri plošči s tremi rebri

Iz zgornje slike je razvidno, kolikšen del obtežbe plošče prevzame posamezen nosilec. Vsak nosilec torej prevzame obtežbo plošče v območju od  $-e/2$  do  $e/2$ . Enak prenos obtežbe sem predpostavil tudi pri plošči s petimi rebri.



**Slika 46: Prenos obtežbe pri plošči s petimi rebri**

Glede na prenos obtežbe, ki smo ga predpostavili na slikah 45 in 46 vidimo, da so znotraj posamezne konstrukcije vsi nosilci enako obremenjeni. Poleg tega so (ob takem raznosu obtežbe), enako obremenjeni tudi nosilci pri ploščah s tremi rebri in ploščah s petimi rebri pri enakih razdaljah med rebri  $e$ . Zato veljajo rezultati upogibnih momentov, izračunani v nosilcu za ustrezno obtežbo glede na razdaljo  $e$ , tako za ploščo s tremi rebri, kot tudi za ploščo s petimi rebri. Naredil sem štiri primere. Med seboj se razlikujejo v tem, kolikšna je razdalja med rebri  $e$ :

- 1) Primer:  $e=1\text{m}$
- 2) Primer:  $e=1,5\text{m}$
- 3) Primer:  $e=2\text{m}$
- 4) Primer:  $e=2,5\text{m}$

Izračun obtežbe  $q$ , ki deluje na računski model nadomestnega linijskega elementa

1. Lastna teža:

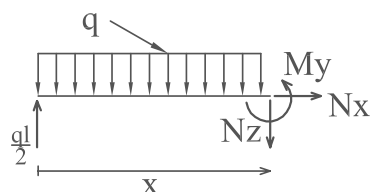
-rebro:	$g_r = 0,2\text{m} \cdot 0,4\text{m} \cdot 25\text{kN/m}^3 =$	$2\text{kN/m}$
-plošča:	$g_{pl} = 0,16\text{m} \cdot 25\text{kN/m}^3 =$	$4\text{kN/m}^2$
	$g_{pl} \text{ (linijsko)} =$	$e [\text{m}] \cdot 4\text{kN/m}^2$
		-----
-skupno:	$g = g_r + g_{pl} \text{ (linijsko)} =$	$2\text{kN/m} + e \cdot 4\text{kN/m}^2$

## 2. Koristna obtežba:

$$\begin{aligned} \text{-plošča: } q_{pl} &= 4\text{kN/m}^2 \\ q_{pl} \text{ (linijsko)} &= e [\text{m}] * 4\text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

Upoštevana projektna obtežna kombinacija:

$$q = 1,35 * g + 1,5 * q_{pl}(\text{linijsko}) = 1,35 * (2\text{kN/m} + e * 4\text{kN/m}^2) + 1,5 * e * 4\text{kN/m}^2$$



Slika 47: Notranje sile dela nosilca

Na zgornji sliki je prikazan del nosilca in notranje sile, ki delujejo na ta del nosilca. Na podlagi te slike sem določil enačbo (4) za izračun upogibnega momenta nosilca.

$$M_y(x) = \frac{ql}{2} * x - \frac{qx^2}{2} \quad (4)$$

### Primer 1

Razdalja med rebri e znaša 1m. Izračun projektne obtežbe kombinacije

$$q = 1,35 * g + 1,5 * q_{pl}(\text{linijsko}) = 1,35 * (2\text{kN/m} + 1\text{m} * 4\text{kN/m}^2) + 1,5 * 1\text{m} * 4\text{kN/m}^2$$

$$q = 14,1\text{kN/m}$$

Upogibni moment nosilca na razdalji x = 1m, 3m in 5m sem izračunal po izrazu (5)

$$M_y(x = 1) = \frac{14,1\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 1\text{m} - \frac{14,1\text{kN/m} * 1^2 \text{m}^2}{2} = 63,45\text{kNm}$$

$$M_y(x = 3) = \frac{14,1\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 3\text{m} - \frac{14,1\text{kN/m} * 3^2 \text{m}^2}{2} = 148,05\text{kNm}$$

$$M_y(x = 5) = \frac{14,1\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 5\text{m} - \frac{14,1\text{kN/m} * 5^2 \text{m}^2}{2} = 176,25\text{kNm}$$

### Primer 2:

Razdalja med rebri e znaša 1,5 m. Izračun projektne obtežbe kombinacije

$$q = 1,35 * g + 1,5 * q_{pl}(\text{linijsko}) = 1,35 * (2\text{kN/m} + 1,5\text{m} * 4\text{kN/m}^2) + 1,5 * 1,5\text{m} * 4\text{kN/m}^2$$

$$q = 19,8 \text{ kN/m}$$

Izračun upogibnega momenta na razdalji  $x=1\text{m}$ ,  $3\text{m}$  in  $5\text{m}$  po izrazu (5)

$$M_y(x=1) = \frac{19,8\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 1\text{m} - \frac{19,8\text{kN/m} * 1^2 \text{m}^2}{2} = 89,1\text{kNm}$$

$$M_y(x=3) = \frac{19,8\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 3\text{m} - \frac{19,8\text{kN/m} * 3^2 \text{m}^2}{2} = 207,9\text{kNm}$$

$$M_y(x=5) = \frac{19,8\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 5\text{m} - \frac{19,8\text{kN/m} * 5^2 \text{m}^2}{2} = 247,5\text{kNm}$$

Primer 3:

Razdalja med rebri  $e$  znaša  $2\text{m}$ . Izračun projektne obtežbe kombinacije

$$q = 1,35 * g + 1,5 * q_{pl}(\text{linijsko}) = 1,35 * (2\text{kN/m} + 2\text{m} * 4\text{kN/m}^2) + 1,5 * 2\text{m} * 4\text{kN/m}^2$$

$$q = 25,5 \text{ kN/m}$$

Izračun upogibnega momenta na razdalji  $x=1\text{m}$ ,  $3\text{m}$  in  $5\text{m}$  po enačbi (5)

$$M_y(x=1) = \frac{25,5\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 1\text{m} - \frac{25,5\text{kN/m} * 1^2 \text{m}^2}{2} = 114,75\text{kNm}$$

$$M_y(x=3) = \frac{25,5\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 3\text{m} - \frac{25,5\text{kN/m} * 3^2 \text{m}^2}{2} = 267,75\text{kNm}$$

$$M_y(x=5) = \frac{25,5\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 5\text{m} - \frac{25,5\text{kN/m} * 5^2 \text{m}^2}{2} = 318,75\text{kNm}$$

Primer 4:

Razdalja med rebri  $a$  znaša  $2,5\text{m}$ . Izračun projektne obtežbe kombinacije

$$q = 1,35 * g + 1,5 * q_{pl}(\text{linijsko}) = 1,35 * (2\text{kN/m} + 2,5\text{m} * 4\text{kN/m}^2) + 1,5 * 2,5\text{m} * 4\text{kN/m}^2$$

$$q = 31,2 \text{ kN/m}$$

Izračun upogibnega momenta na razdalji  $x=1\text{m}$ ,  $3\text{m}$  in  $5\text{m}$  po izrazu (5)

$$M_y(x=1) = \frac{31,2\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 1\text{m} - \frac{31,2\text{kN/m} * 1^2 \text{m}^2}{2} = 140,4\text{kNm}$$

$$M_y(x=3) = \frac{31,2\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 3\text{m} - \frac{31,2\text{kN/m} * 3^2 \text{m}^2}{2} = 327,6\text{kNm}$$

$$M_y(x=5) = \frac{31,2\text{kN/m} * 10\text{m}}{2} * 5\text{m} - \frac{31,2\text{kN/m} * 5^2 \text{m}^2}{2} = 390\text{kNm}$$

### 5.3.2 Določitev upogibnih momentov nadomestnih T-prerezov plošče s tremi rebri z rezultati iz programa

Upogibne momente v nadomestnem T-prerezu sem izračunal po izrazu (3) na strani 17:

$$M = M_n + M_p + N_n \cdot z$$

Kako sem prišel do posameznih količin v iz predhodnjega izraza, sem opisal v poglavju 4.2.

Ročica notranjih sil je v vseh primerih enaka, saj se višina plošče in nosilca ne spreminjata:

$$z = \frac{h_n}{2} + \frac{h_p}{2} = \frac{0,4\text{m}}{2} + \frac{0,16\text{m}}{2} = 0,3\text{ m}$$

Vrednosti upogibnih momentov bom izračunal na enakih razdaljah, kakor v peš računu; in sicer na razdaljah  $x = 1\text{m}$ ,  $3\text{m}$  in  $5\text{m}$ . V preglednicah 6-13 so podane vrednosti  $N_n$ ,  $M_n$  in  $M_p$ , ki jih potrebujemo za določitev skupnega upogibnega momenta, pa tudi izračunana vrednost upogibnega momenta, ki deluje na nadomestni T- prerez  $M_{\text{skupni}}$ . Podani so rezultati naslednjih primerov :

- primer 10-3-1: razdalja med rebri  $e$  je  $1\text{m}$
- primer 10-3-2: razdalja med rebri  $e$  je  $1,5\text{m}$
- primer 10-3-3: razdalja med rebri  $e$  je  $2\text{m}$
- primer 10-3-4: razdalja med rebri  $e$  je  $2,5\text{m}$

**Preglednica 18: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-1**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{\text{skupni}}$ [kNm]
$x=1\text{m}$	166,3	12,5	3,69	62,75
$x=3\text{m}$	400,4	29,6	9,45	151,16
$x=5\text{m}$	480,9	34,6	11,4	180,65
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{\text{skupni}}$ [kNm]
$x=1\text{m}$	165,4	11,7	3,96	61,97
$x=3\text{m}$	387,5	29	8,96	146,46
$x=5\text{m}$	464	34	10,7	174,62

**Preglednica 19: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-2**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	234,7	24,1	6,85	96,67
x=3m	556,2	40,1	17,3	213,14
x=5m	666,1	43	20,7	250,21
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	230,4	23,1	7,19	94,80
x=3m	540	39,3	16,4	206,90
x=5m	647,5	42,5	19,6	243,40

**Preglednica 20: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-3**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	308,2	29,9	10,9	127,10
x=3m	712,4	48,6	27,8	275,87
x=5m	852,3	51,7	33,4	323,74
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	299,3	28,2	11,8	123,80
x=3m	683,3	47,1	25,8	264,22
x=5m	817,4	50,3	30,7	309,87

**Preglednica 21: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza-primer 10-3-4**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	389,6	36,4	15,8	161,29
x=3m	865,5	57,8	39,1	339,24
x=5m	1031	60,3	47	395,98
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	374,4	33,5	17,9	156,23
x=3m	821	54,5	36,6	320,98
x=5m	976,8	57,9	43,1	374,50

### 5.3.3 Določitev upogibnih momentov nadomestnih T-prerezov plošče s petimi rebri z rezultati iz programa

Določitev upogibnih momentov v nadomestnem T-prerezu plošče s petimi rebri poteka na enak način, kot pri plošči s tremi rebri. Način določitve skupnega momenta je določen v razdelku 5.3.2. V preglednicah 22-26 so rezultati naslednjih primerov:

- primer 10-5-1: razdalja e med rebri je 1m
- primer 10-5-2: razdalja e med rebri je 1,5m
- primer 10-5-3: razdalja e med rebri je 2m
- primer 10-5-4: razdalja e med rebri je 2,5m

**Preglednica 22: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-1**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	166,3	12,5	3,69	62,75
x=3m	400,4	29,6	9,45	151,16
x=5m	480,9	34,6	11,4	180,65
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	165,4	11,7	3,96	61,97
x=3m	387,5	29	8,96	146,46
x=5m	464	34	10,7	174,62
3.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	166,1	11,7	3,98	62,19
x=3m	384,4	28,8	8,88	145,31
x=5m	458,8	33,8	10,5	172,76

**Preglednica 23: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-2**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	234,7	24,1	6,85	96,67
x=3m	556,2	40,1	17,3	213,14
x=5m	666,1	43	20,7	250,21
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	230,4	23,1	7,19	94,80
x=3m	540	39,3	16,4	206,90
x=5m	647,5	42,5	19,6	243,40
3.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	226,3	22,8	7,01	93,17
x=3m	536	38,8	15,9	204,78
x=5m	638,2	41,7	18,8	239,20

**Preglednica 24: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-3**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	327,3	10,9	11,3	113,84
x=3m	727,3	38	29,1	270,74
x=5m	867,3	50,7	35	328,54
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	319,2	10,3	10,5	110,18
x=3m	693,1	36,8	26,6	257,47
x=5m	823,2	49	31,6	311,10
3.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	319,7	10,3	12,8	112,62
x=3m	689,2	36,6	26,9	256,48
x=5m	815,8	48,7	31,4	308,52

**Preglednica 25: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primer 10-5-4**

1.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	367,2	37,2	15,4	155,42
x=3m	860,3	58,6	43	342,48
x=5m	1009	60,9	50,9	394,32
2.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	364,2	34,7	16,2	152,88
x=3m	840	56	39,3	330,50
x=5m	982,3	58,4	47,8	381,24
3.nosilec	$N_n$ [kN]	$M_n$ [kNm]	$M_p$ [kNm]	$M_{skupni}$ [kNm]
x=1m	365,8	34,9	17,6	154,92
x=3m	843,5	55,7	40,1	331,98
x=5m	985,7	58,1	46	380,10



## 5.4 Primerjava upogibnih momentov

Sledijo preglednice, v katerih so zbrane vrednosti upogibnih momentov nadomestnih T-prerezov v ploščah s tremi rebri, v ploščah s petimi rebri in vrednosti upogibnih momentov nadomestnih T-prerezih, izračunanih "peš".

**Preglednica 26: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri =1m**

x [m]	Primer 10-3-1; M[kNm]		Primer 10-5-1; M[kNm]			peš račun
	1.rebro	2.rebro	1.rebro	2.rebro	3.rebro	M [kNm]
0	0	0	0	0	0	0
1	62,67	62,02	62,62	62,10	62,15	63,45
3	151,25	146,53	151,22	146,82	145,39	148,05
5	180,72	174,55	180,78	174,61	172,93	176,25
7	151,25	146,53	151,22	146,82	145,39	148,05
9	62,67	62,02	62,62	62,10	62,15	63,45
10	0	0	0	0	0	0

V zgornji preglednici vidimo, da se upogibni momenti med posameznimi rebri spreminjajo. Tako, kot smo to opazili že pri primerjavi vplivne in sodelujoče širine med posameznimi rebri, lahko tudi tukaj opazimo, da so rebra različno obremenjena. Tako v plošči s tremi rebri, kakor tudi v plošči s petimi rebri, je najbolj obremenjeno zunanje rebro. V tem primeru, je srednje rebro plošče s tremi rebri približno enako obremenjeno, kot vmesno rebro pri plošči s petimi rebri.

**Preglednica 27: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri =1,5m**

x [m]	Primer 10-3-2; M[kNm]		Primer 10-5-2; M[kNm]			peš račun
	1.rebro	2.rebro	1.rebro	2.rebro	3.rebro	M [kNm]
0	0	0	0	0	0	0
1	96,62	94,84	96,67	97,67	93,17	89,10
3	213,18	206,92	213,14	216,14	204,78	207,90
5	250,29	243,45	250,21	244,21	239,20	247,50
7	213,18	206,92	213,14	216,14	204,78	207,90
9	96,62	94,84	96,67	97,67	93,17	89,10
10	0	0	0	0	0	0

V preglednici št.27 vidimo, da prihaja do podobnega prenosa obtežbe v primeru 10-3-2 in 10-5-2. Zunanji nosilec je najbolj obremenjen. Vidimo, da so vrednosti upogibnih momentov po "peš računu" nekje vmes med vrednostmi upogibnih momentov zunanjega rebra in srednjega rebra (primer10-3-2).

**Preglednica 28: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri = 2m**

x [m]	Primer 10-3-3; M[kNm]		Primer 10-5-3; M[kNm]			peš račun
	1.rebro	2.rebro	1.rebro	2.rebro	3.rebro	M [kNm]
0	0	0	0	0	0	0
1	127,10	123,79	113,80	107,28	112,59	114,75
3	275,85	264,18	270,79	257,13	256,46	267,75
5	323,78	309,85	328,57	311,05	308,52	318,75
7	275,85	264,18	270,79	257,13	256,46	267,75
9	127,10	123,79	113,80	107,28	112,59	114,75
10	0	0	0	0	0	0

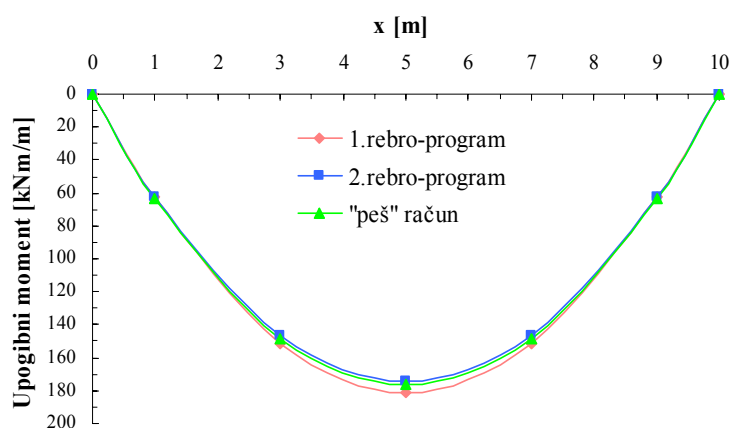
**Preglednica 29: Primerjava upogibnih momentov; razdalja med rebri = 2,5m**

x [m]	Primer 10-3-4; M[kNm]		Primer 10-5-4; M[kNm]			peš račun
	1.rebro	2.rebro	1.rebro	2.rebro	3.rebro	M [kNm]
0	0	0	0	0	0	0
1	161,29	156,19	156,27	151,73	184,07	140,40
3	338,48	320,64	344,34	330,53	340,75	327,60
5	395,21	374,11	396,48	384,20	380,00	390,00
7	338,48	320,64	344,34	330,53	340,75	327,60
9	161,29	156,19	156,27	151,73	184,07	140,40
10	0	0	0	0	0	0

## 5.5 Primerjava rezultatov v grafični obliki

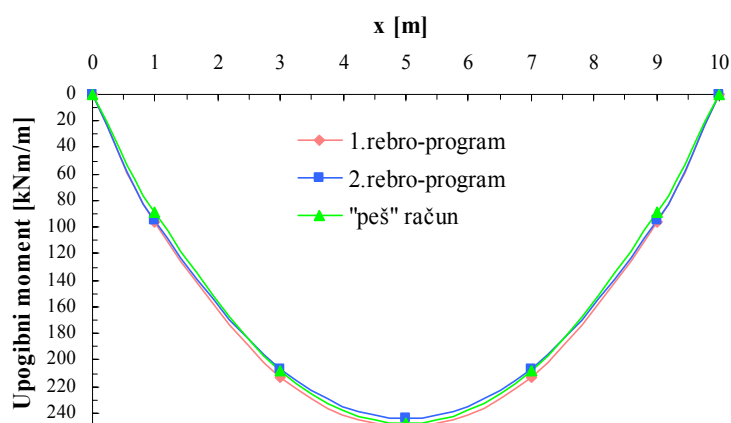
### 5.5.1 Plošča s tremi rebri

V tem razdelku sem grafično primerjal rezultate upogibnih momentov, ki delujejo na nadomestne T-prereze. In sicer sem primerjal rezultate v primeru “peš računa” (razdelek 5.3.1) z rezultati upogibnih momentov v posameznih rebrih plošče s tremi rebri (razdelek 5.3.2).



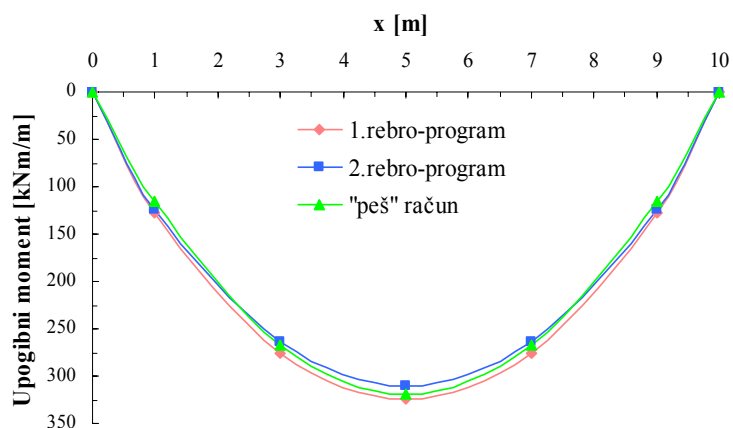
Grafikon 2: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-1

V zgornjem grafikonu vidimo upogibne momente stranskega rebra (1. rebro), sredinskega rebra (2.rebro) in upogibne momente, dobljene s “peš” računom. Razlike so sicer vizualno zelo majhne, vendar pa je razvidno, da je prvo rebro bolj obremenjeno od drugega. Rezultati “peš” računa pa so po vrednostih med prvim in drugim rebrom.



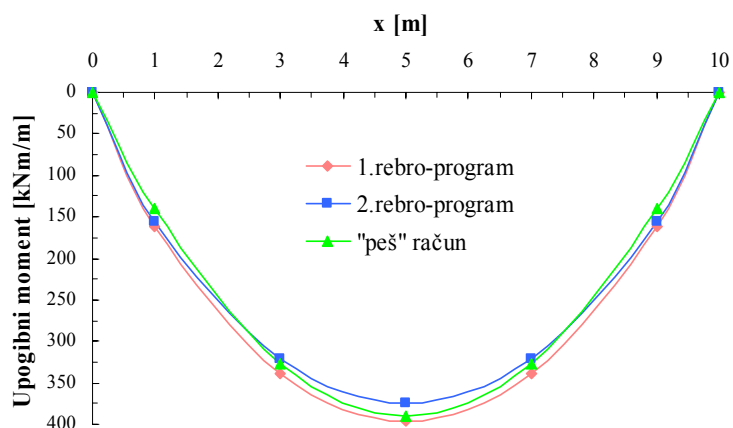
Grafikon 3: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-2

V grafikonu 3 so razmere podobne, kot pri prejšnjemu primeru.



**Grafikon 4: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-3**

V zgornjem grafikonu so razlike med zunanjim in srednjim rebrom, ter med rezultati "peš" izračuna bolj razvidni, saj so vrednosti upogibnih momentov v tem primeru večje zaradi večje razdalje med rebri in posledično tudi večje obtežbe na rebro.

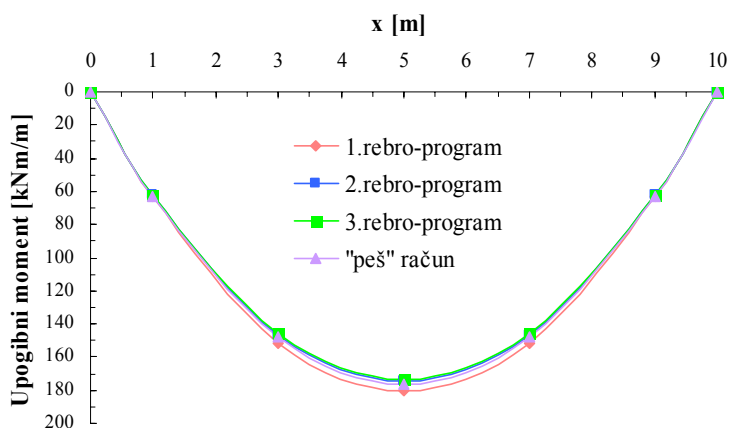


**Grafikon 5: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-3-4**

V primeru 10-3-4 pridejo razlike med posameznimi rebri še bolj do izraza - sorazmerno z večanjem obtežbe, ki odpade na posamezno rebro.

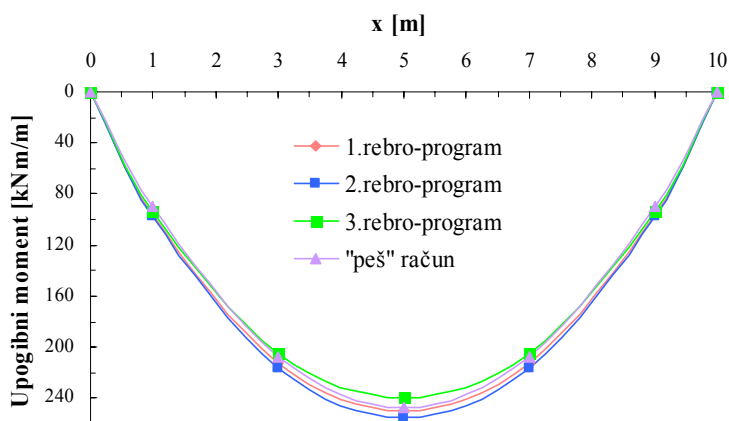
### 5.5.2 Plošča s petimi rebri

V tem razdelku sem grafično primerjal rezultate upogibnih momentov, ki delujejo na nadomestne T-prereze v primeru “peš računa” (razdelek 5.3.1) z rezultati upogibnih momentov v posameznih rebrih plošče s petimi rebri (razdelek 5.3.3).



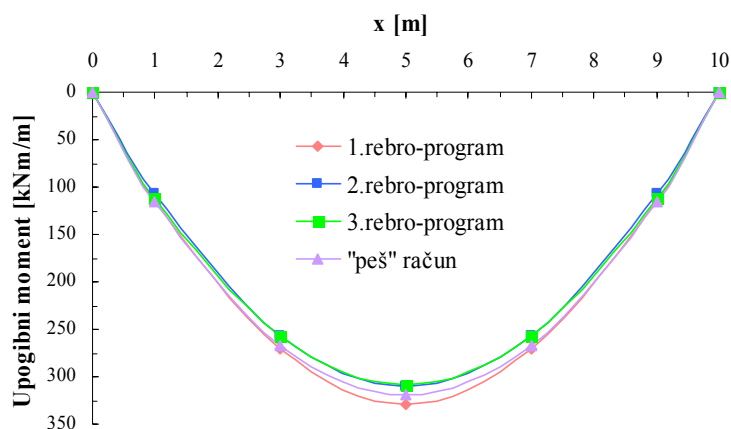
**Grafikon 6: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-1**

V grafikonu 6 so razlike med zunanjim (prvim) rebrom, vmesnim (drugim) rebrom in “peš” računom izredno majhne. Vidimo pa lahko, da so upogibni momenti 3. rebra nekoliko večji od ostalih.



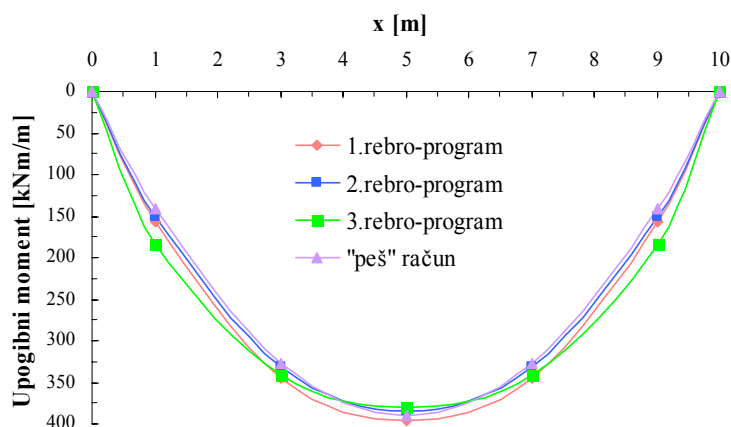
**Grafikon 7: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-2**

V grafikonu 7 vidimo, da je sredinsko (tretje) rebro najmanj obremenjeno.



**Grafikon 8: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-3**

Podobno kot v primeru plošče s tremi rebri, so razlike pri večjih razdaljah med rebri bolj opazne zaradi večje obtežbe posameznega rebra. Sredinsko in vmesno rebro imata zelo podobne rezultate upogibnih momentov. Zunanje rebro je najbolj obremenjeno; upogibni momenti "peš" računa pa so po vrednosti med 1.rebrom in ostalima dvema rebroma.

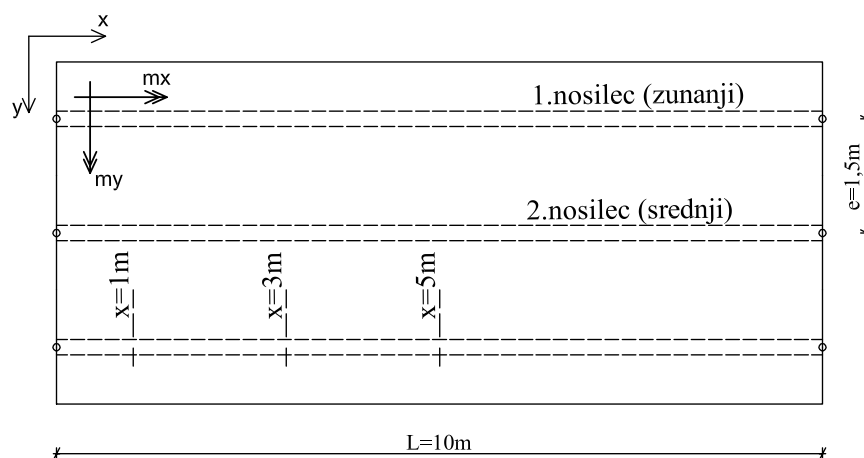


**Grafikon 9: Primerjava upogibnih momentov; primer 10-5-4**

V primeru 10-3-4 so upogibni momenti pri vrednosti  $x=1$  največji pri sredinskem (tretjem) rebri. Ostale vrednosti upogibnih momentov na sredini razpona pa so običajne; največji upogibni moment je prisoten pri zunanjem rebri; najmanjši pa pri srednjem in vmesnem rebri.

### 5.5.3 Dimenzioniranje plošče s tremi rebri, $e=1,5m$

Nosilce iz primera 10-3-3 sem tudi upogibno dimenzioniral v sredini razpona. Naredil sem primerjavo med dimenzioniranjem nadomestnih T-prerezov “peš” in med rezultati dimenzioniranja, ki nam jih ponudi računalniški program. Razlika je v tem, da dobim pri rezultatih računalniškega programa ločeno armaturo za ploščo in za nosilec. Iz programa dobim dobim izračunano pozitivno in negativno armaturo plošče, za nosilec pa skupno vzdolžno armaturo.

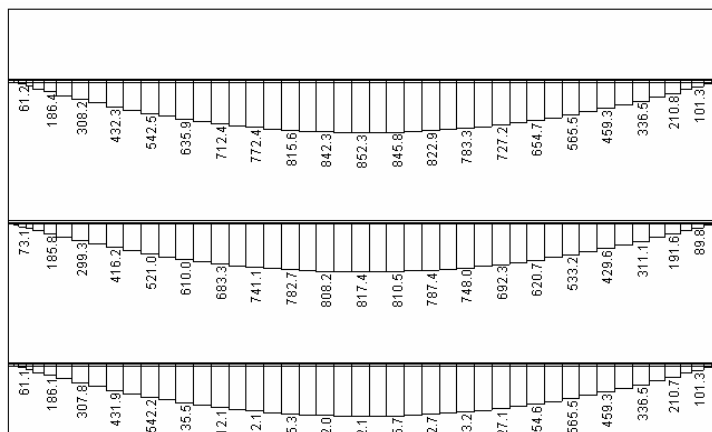


Slika 48: Skica plošče s koordinatnim sistemom

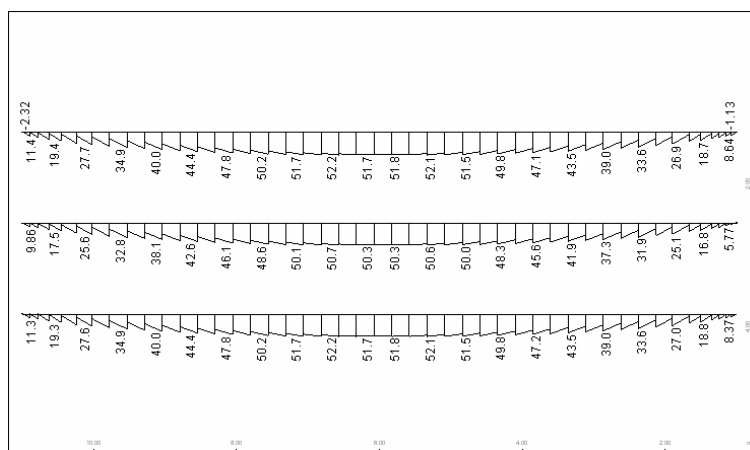
V naslednji preglednici so zbrane vrednosti upogibnih momentov primera 10-3-3 in vrednosti upogibnih momentov “peš” računa.

Preglednica 30: Upogibni momenti za dimenzioniranje

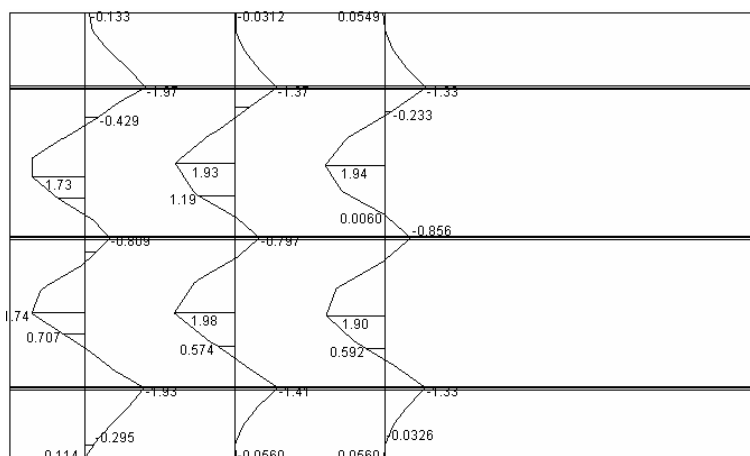
x [m]	Primer 10-3-3; M[kNm]		Primer 10-5-3; M[kNm]			peš račun
	1.rebro	2.rebro	1.rebro	2.rebro	3.rebro	M [kNm]
0	0	0	0	0	0	0
1	127,10	123,79	113,80	107,28	112,59	114,75
3	275,85	264,18	270,79	257,13	256,46	267,75
5	323,78	309,85	328,57	311,05	308,52	318,75
7	275,85	264,18	270,79	257,13	256,46	267,75
9	127,10	123,79	113,80	107,28	112,59	114,75
10	0	0	0	0	0	0



Slika 49: Potek osnih sil v nosilcih [kN]

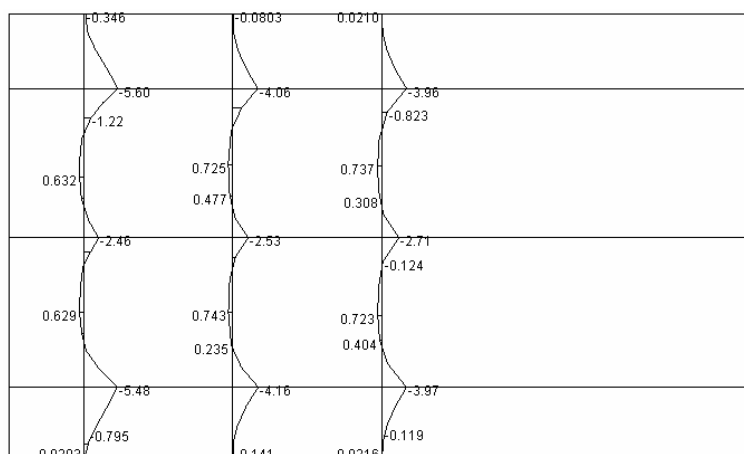


Slika 50: Upogibni momenti nosilcev [kNm]



Slika 51: Maksimalni upogibni momenti  $m_x$  v plošči





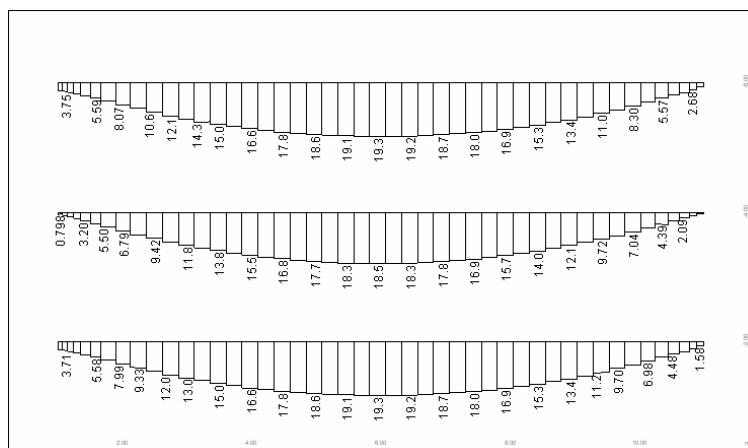
Slika 52: Minimalni upogibni momenti  $m_x$  v plošči

0.642	0.459	0.0947	0.0232	0.0103	0.0284	0.175	0.598
0.773	0.773	0.473	0.116	0.0514	0.142	0.620	0.645
0.610	0.147	0.0835	0.0849	0.0843	0.0777	0.120	0.564
1.56	0.736	0.418	0.425	0.422	0.388	0.602	1.13
1.06	0.296	0.0901	0.0714	0.0702	0.0652	0.187	0.945
1.31	0.923	0.450	0.357	0.351	0.326	0.934	1.36
0.648	0.206	0.0827	0.0836	0.0835	0.0768	0.123	0.765
1.62	0.840	0.414	0.418	0.418	0.384	0.613	1.30
0.702	0.457	0.108	0.0112	0.0090	0.0315	0.146	0.535
0.788	0.788	0.542	0.0562	0.0448	0.157	0.651	0.673

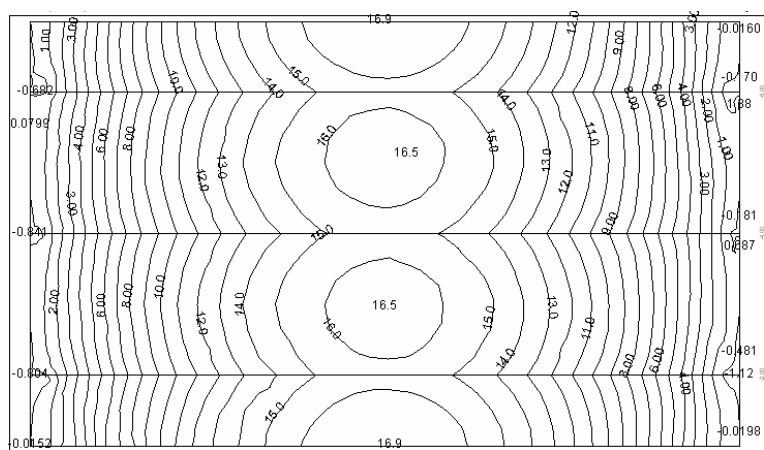
Slika 53: Priporočena spodnja (pozitivna) armatura v plošči

1.40	0.239	0.202	0.193	0.195	0.210	0.236	0.641
3.40	1.20	1.01	0.967	0.973	1.05	1.18	3.20
1.40	0.230	0.128	0.187	0.187	0.131	0.236	0.641
3.40	1.15	0.641	0.935	0.937	0.656	1.18	3.20
1.01	0.120	0.130	0.130	0.139	0.139	0.134	0.396
2.47	0.599	0.650	0.650	0.696	0.696	0.668	1.98
0.818	0.225	0.109	0.0752	0.0904	0.129	0.187	0.563
2.12	1.13	0.547	0.376	0.452	0.647	0.936	2.81
1.31	0.236	0.202	0.193	0.194	0.209	0.242	0.698
3.66	1.18	1.01	0.965	0.969	1.04	1.21	3.49

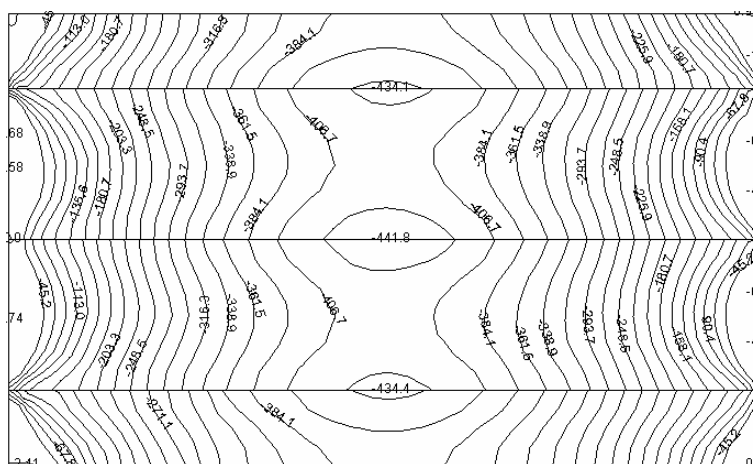
Slika 54: Priporočena zgornja (negativna) armatura v plošči



Slika 55: Izračunana upogibna armatura v nosilcih [cm<sup>2</sup>]



Slika 56: Upogibni moment my plošče [kNm/m]



Slika 57: Membranske sile v plošči [kN/m]

### Peš račun:

Sodelujočo širino  $b_{\text{eff}}$  izračunam s formulo po EC2:

$$b_{\text{eff}} = \frac{l_0}{5} + b_0 < e$$

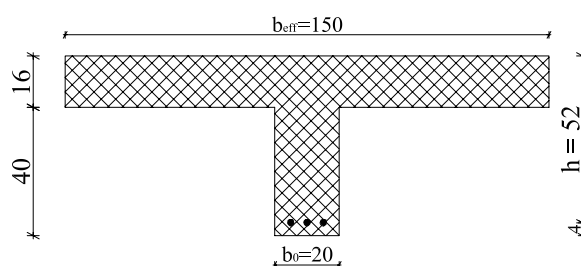
$$b_{\text{eff}} = \frac{10\text{m}}{5} + 0,2\text{m} = 2,2\text{m} > e \Rightarrow b_{\text{eff}} = e = 1,5\text{m}$$

Upošteval sem upogibni moment po “peš” računu na sredini nosilca – preglednica 30.

$$M_d = 31875 \text{ kNcm}$$

$$b = 150 \text{ cm}$$

$$h = 52 \text{ cm}$$



Slika 58: Dimenzije nadomestnega T-prereza

$$k_h = \frac{M_d}{f_{\text{cd}} * b * h^2} = \frac{31875\text{kNcm}}{1,41\text{kN/cm}^2 * 150\text{cm} * 52^2\text{cm}^2} = 0,055 \Rightarrow k_s = 1,042$$

$k_x = 0,115 \Rightarrow x = k_x * h = 0,115 * 52\text{cm} = 5,98\text{cm} \Rightarrow$  nevtralna os je v plošči in T-prerez lahko dimenzioniramo kot pravokotnik.

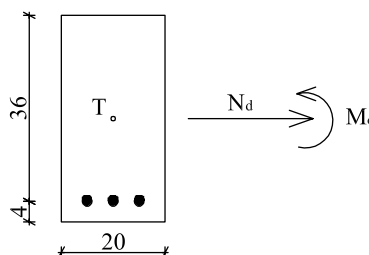
$$A_s = k_s * \frac{M_d}{h * f_{\text{yd}}}$$

$$A_s = k_s * \frac{M_d}{h * f_{\text{yd}}} = 1,042 * \frac{31875\text{kNcm}}{52\text{cm} * 43,47\text{kN/cm}^2} = 14,69\text{cm}^2$$

Količina upogibne armature je manjša od armature, ki jo izračuna program (slika 55).

Program namreč ne upošteva sodelovanja plošče in nosilca pri prevzemu obremenitev, temveč dimenzionira nosilec ločeno od plošče.

V nadaljevanju sem dimenzioniral nosilec, ločeno od plošče-tako, kot program. Pravokotni nosilec je obremenjen z upogibnim momentom in osno silo, kot je razvidno iz slike 59.



Slika 59: Nosilec, ki ga dimenzionira program

Obremenitev je naslednja:

$$N_d = 852,3 \text{ kN (slika 49)}$$

$$M_d = 51,7 \text{ kNm (slika 50)}$$

Upošteval sem rezultate stranskega nosilca, ki je bolj obremenjen od srednjega.

$$e = \frac{M_d}{N_d} = \frac{51,7 \text{ kNm}}{852,2 \text{ kN}} = 0,06 \text{ m} = 6 \text{ cm}$$

Prisotna je mala ekscentričnost osne sile. Osna sila torej deluje 6 cm pod težiščem pravokotnika. Dimenzioniramo na malo ekscentričnost osne sile.

$$A_s = N_d / f_{yd} = 852,3 \text{ kN} / 43,47 \text{ kN/cm}^2 = 19,6 \text{ cm}^2$$

$$A_s = \frac{N_d}{f_{yd}} = \frac{852,3 \text{ kN}}{43,47 \text{ kN/cm}^2} = 19,6 \text{ cm}^2$$

Če dimenzioniram rebro ločeno od plošče glede na osno silo in upogibni moment, ki deluje na pravokotni prerez, dobim armaturo, ki je primerljiva z armaturo, ki nam jo priporoči program.

$$A_s(\text{peš; T-prerez}) = 14,69 \text{ cm}^2$$

$$A_s(\text{program}) = 19,3 \text{ cm}^2$$

$$A_s(\text{peš; pravokotnik}) = 19,6 \text{ cm}^2$$

Pri dimenzioniranju nosilca ločeno od plošče, moramo upoštevati tudi armaturo plošče v vzdolžni smeri. Dimenzioniral bom torej ploščo v pasu enega metra v vzdolžni smeri.

Plošča je obremenjena z upogibnim momentom (ki je razviden iz slike 56) in osno (membransko) silo, ki je razvidna iz slike 57.

$$m_{p,d} = 16,94 \text{ kNm/m} \Rightarrow M_d = 1694 \text{ kNcm}$$

$$n_{p,d} = -434,4 \text{ kN/m} \Rightarrow N_d = -434,4 \text{ kN}$$

$$b = 100 \text{ cm}$$

$$h = 12 \text{ cm}$$

$$e = \frac{16,94 \text{ kNm/m}}{434,4 \text{ kN/m}} = 0,039 \text{ m} = 3,9 \text{ cm}$$

Če je ekscentričnost večja od razdalje  $\frac{h}{6} = \frac{12}{6} = 2 \text{ cm}$  pomeni, da osna sila ne deluje v jedru prereza. Torej napetosti v celotnem prerezu niso tlačne in mala ekscentričnost osne sile ni prisotna

$M_{sds} = M_d - N_p * z_s$ ;  $z_s$  - razdalja med težiščem prereza in težiščem armature

$$z_s \frac{h_{pl}}{2} - a = \frac{16 \text{ cm}}{2} - 4 \text{ cm} = 4 \text{ cm} \Rightarrow$$

$$M_{sds} = M_d - N_p * z_s = 1694 \text{ kNcm} - (-434,4 \text{ kN}) * 4 \text{ cm} = 3431,6 \text{ kNcm}$$

$$k_h = \frac{M_d}{f_{cd} * b * h^2}$$

$$k_h = \frac{M_{sds}}{f_{cd} * b * h^2} = \frac{3431,6 \text{ kNcm}}{1,41 \text{ kN/cm}^2 * 100 \text{ cm} * 12^2 \text{ cm}^2} = 0,169 \Rightarrow k_s = 1,108$$

$$A_s = k_s * \frac{M_d}{h * f_{yd}}$$

$$A_s = k_s * \frac{M_{sds}}{h * f_{yd}} + \frac{N_d}{f_{yd}} = 1,108 * \frac{3431,6 \text{ kNcm}}{12 \text{ cm} * 43,47 \text{ kN/cm}^2} + \frac{(-434,4 \text{ kN})}{43,47 \text{ kN/cm}^2} = -2,7 \text{ cm}^2 / \text{m} \Rightarrow$$

potrebujemo "negativno" armaturo zaradi velike tlačne sile.

## **6 DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH PLOŠČ Z REBRI**

Pri dimenzioniranju armiranobetonskih plošč z rebri, sem se osredotočil na interpretacijo različnih rezultatov, dobljenih s programi Sofistik.

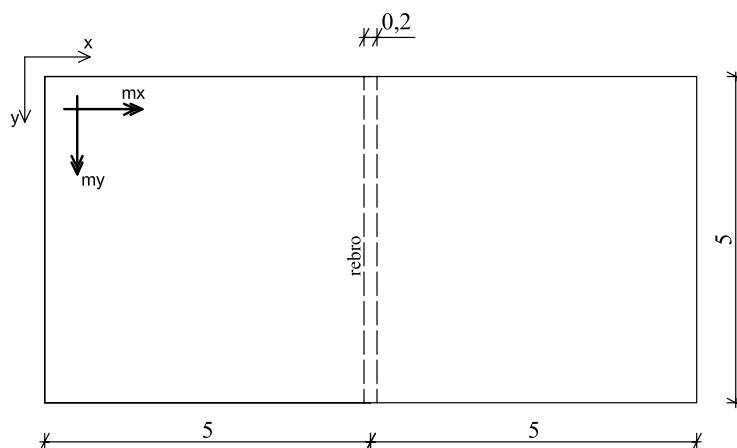
Izbral sem enostavno konstrukcijo in jo zasnoval na različne načine. V prvi fazi sem se osredotočil na notranje sile in pomike nosilcev v ploščah; pozneje pa sem analiziral tudi notranje sile v ploščah samih; način prenosa obtežbe in dimenzioniranje plošč.

Za dimenzioniranje in uporabo v praktične namene je najbolj enostavna vrsta zasnove "prva metoda" obravnave T-prerezov s programi Sofistik. To pomeni centričen priklop T-prereza v ploščo. Dimenzija T-prereza je torej že vnaprej definirana. S to metodo je možno takojšnje dimenzioniranje T-prereza na podlagi upogibnega momenta, ki ga izračuna računalniški program. Metoda sicer ni popolnoma točna; je pa dovolj natančna za projektiranje običajnih objektov.

Če želimo bolj natančne rezultate, ki zajemajo dejansko stanje in obnašanje konstrukcije, je najbolj primerna in natančna "druga metoda" obravnave T-prerezov s programi Sofistik. Gre za fizično korektno priključene elemente (glej poglavje 4.2). Vendar pa je pri tej metodi mnogo dodatnega dela in natančnost rezultatov, ki jih dobimo, ne odtehta časa, ki ga porabimo s pravilno zasnovo konstrukcije. Dejstvo je tudi, da nimajo vsi programi možnosti ekscentričnega priključevanja nosilcev na ploščo, ali pa nimajo možnosti izračuna integrala notranjih sil na dolžini, ki si jo izberemo. In zato je ta metoda v praksi redkokdaj uporabljena, služi pa lahko v raziskovalne namene.

## 6.1 Opis konstrukcije

Obravnaval sem ploščo dimenzij 10x5m in debeline 16cm. V sredini je rebro dimenzij 20x20cm. Zunanji robovi plošče so vrtljivo podprti. Geometrija plošče je razvidna iz naslednje slike.



Slika 60: Tloris plošče z globalnim k.s.

Poleg lastne teže sem upošteval tudi koristno obtežbo. Upošteval sem naslednjo koristno obtežbo:

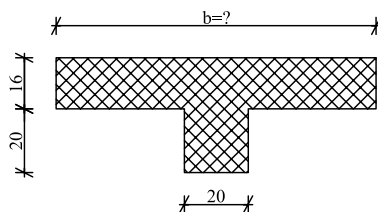
-predelne stene	1,25 kN/m <sup>2</sup>
-bivalni prostori	2,00 kN/m <sup>2</sup>

-----  
- koristna obtežba skupaj: 3,25kN/m<sup>2</sup>

Projektna obtežna kombinacija:  $1,35 \cdot g + 1,5 \cdot q$

## 6.2 Modeliranje konstrukcije

Konstrukcijo sem modeliral na tri različne načine Sofistikove filozofije T-prerezov. Naredil sem primerjavo rezultatov, dobljenih po prvi metodi (centrična priključitev T-prereza), drugi metodi (ekscentrična priključitev pravokotnega rebra) in tretji metodi (ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo). Če želimo ploščo modelirati na prvi ali tretji način, moramo že poznati dimenzije T-prereza. Problem se pojavi pri izbiri širine pasnice b.



Slika 61: T-prerez z neznano dimenzijo pasnice b

Širino pasnice b si lahko izberemo na več načinov:

1. Ploščo najprej modeliramo po drugi metodi (ekscentrična priključitev pravokotnega prereza v ploščo) in izračunamo sodelujočo širino nadomestnega T-prereza  $b_{sod}$  (po enačbi 2). Za širino pasnice T-prereza uporabimo izračunano sodelujočo širino ( $b = b_{sod}$ ).
2. Ploščo ponovno modeliramo po drugi metodi, le da tokrat določimo vplivno širino nadomestnega T-prereza  $b_v$  (po enačbi 1), ki jo uporabimo za širino pasnice T-prereza ( $b = b_v$ ).
3. Za širino pasnice b vzamemo  $b_{eff}$  za dimenzioniranje po EC2:  $b_{eff} = \frac{l_0}{5} + b_0$

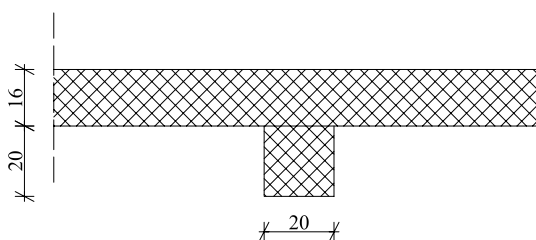
Konstrukcijo sem modeliral najprej po drugi metodi. Določil sem sodelujočo in vplivno širino nadomestnega T-prereza po enačbi (6) (razdelek 4.2) in izračunal moment, ki deluje na nadomestni T-prerez. V enem primeru sem izračunal upogibni moment, ki deluje na nadomestni T-prerez s širino pasnice  $b = b_{sod}$ , v drugem primeru pa sem izračunal upogibni moment, ki deluje na nadomestni T-prerez s širino pasnice  $b = b_v$ .

Po obdelavi konstrukcije po drugi metodi in izračunu širin  $b_v$  in  $b_{sod}$ , sem konstrukcijo modeliral še po prvi (centrična priključitev T-prereza) in tretji metodi (ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo). Pri modeliranju po prvi in tretji metodi sem uporabil izračunani sodelujočo širino  $b_{sod}$  in vplivno širino  $b_v$ ; pa tudi širino  $b_{eff}$  po EC2.

### 6.2.1 Fizično korektno priključeni elementi (druga metoda)

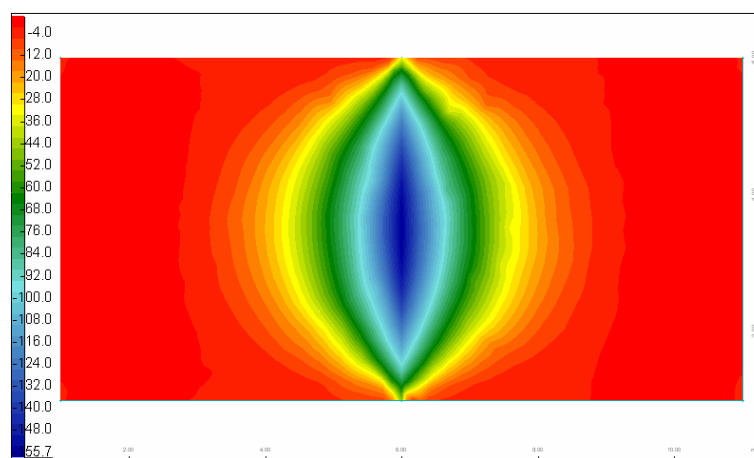
Geometrija plošče in koordinatni sistem sta razvidna iz slike 60. Način priključitve nosilca na ploščo pa je razviden iz slike 62.



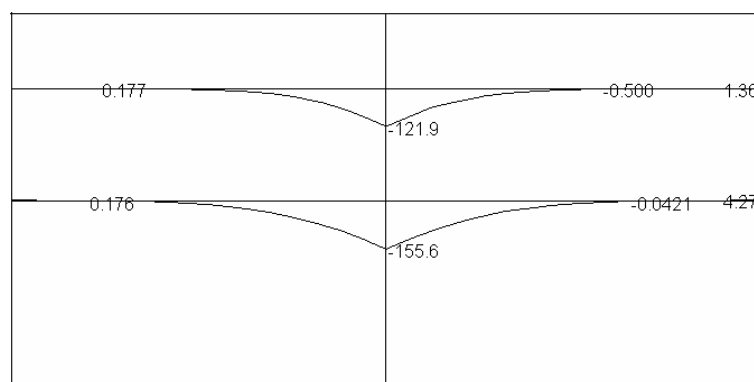


Slika 62: Ekscentrična priključitev pravokotnega nosilca na ploščo

Na naslednjih nekaj slikah so prikazane nekatere izračunane notranje sile konstrukcije.

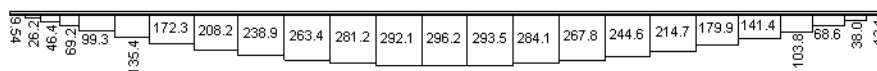


Slika 63: Membranske sile plošče  $n_p$  [kN]



Slika 64: Membranske sile plošče  $n_p$  v dveh prerezih prečno na nosilec [kN]

Na slikah 63 in 64 so prikazane membranske sile plošče  $n_p$ . Na sliki 64 jasno vidimo, kako je velikost membranskih sil plošče največja tik nad nosilcem, potem pa se zmanjšuje tako v prečni, kot tudi v vzdolžni smeri. Maksimalna vrednost membranskih sil v plošči je razvidna iz slike 64, kjer je konstrukcija prerezana prečno na nosilec na polovici razpona in na razdalji  $x = 1\text{m}$ . Za izračun sodelujoče širine  $b_{\text{sod}}$ , potrebujemo še osno silo nosilca v sredini razpona, ki je razvidna iz naslednje slike.

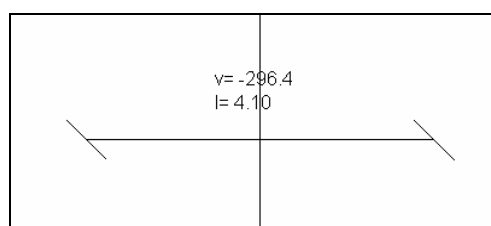


Slika 65: Osne sile nosilca [kN]

Izračun sodelujoče širine po enačbi (2):

$$b_{\text{sod}} = \frac{N_n}{-n_{p,\text{min}}} = \frac{296,2\text{kN}}{155,6\text{kN/m}} = 1,9\text{m}$$

Za izračun vplivne širine  $b_v$ , potrebujemo širino, na kateri je vrednost integrala membranskih sil plošče po absolutni vrednosti enaka osni sili v sredini razpona nosilca.



Slika 66: Integral membranskih sil plošče na razdalji  $l=4,1\text{m}$  [kN]

Na sliki vidimo velikost integrala membranskih sil plošče  $N_p$  na razdalji 4,1m. Vidimo, da je to vplivna širina  $b_v$ , saj se vrednost  $N_p$  po absolutni vrednosti ujema z osno silo nosilca  $N_n$

$$N_n = 296,2\text{kN}$$

$$N_p = -296,4\text{kN} \Rightarrow b_v = 4,1\text{m}$$

Izračun širine  $b_{\text{eff}}$  po EC2:

$$b_{\text{eff}} = \frac{l_0}{5} + b_0$$

Ker je nosilec vrtljivo podprt, je dolžina  $l_0$  enaka celotni dolžini nosilca  $l_0=l=5\text{m}$ .

Širina rebra  $b_0$  je enaka 0,2m.

$$b_{\text{eff}} = \frac{5}{5} + 0,2 = 1,2\text{m}$$

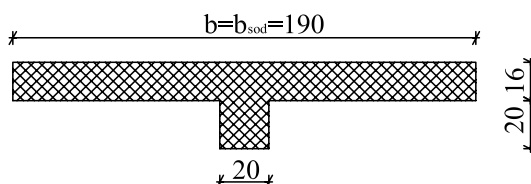
$$b_{\text{eff}} = 1,2\text{m}$$

## 6.2.2 Centrična priključitev T-prereza na ploščo (prva metoda)

Obdelal sem tri primere: 1a, 1b in 1c. Med seboj se razlikujejo v obliki prereza nosilca.

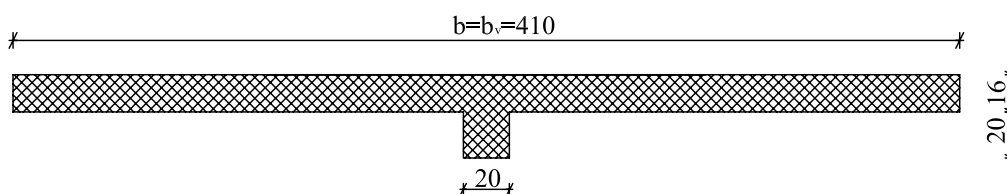
Opis posameznega primera:

- Primer 1a:  $b=b_{sod}$



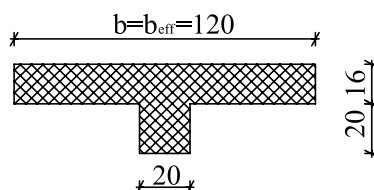
Slika 67: Prerez nosilca v primeru 1a

- Primer 1b:  $b=b_v$



Slika 68: Prerez nosilca za primer 1b

- Primer 1c:  $b=b_{eff}$  po EC2



Slika 69: Prerez nosilca za primer 1c

V preglednici 31 so zbrani rezultati računa za posamezne primere modeliranja konstrukcije po prvi metodi. Rezultati so dobljeni s projektno obtežno kombinacijo lastne in koristne obtežbe ( $1,35 \cdot g + 1,5 \cdot q$ ). In sicer so prikazani upogibni momenti nosilca in pomiki nosilca.

Preglednica 31: Primerjava rezultatov 1a, 1b in 1c

Primer:	1a	1b	1c
Širina pasnice $b$ [cm]	190	410	120
Upogibni momenti nosilca [kNm]:	90,71	128,97	77,77
Pomiki nosilca (MSN) [mm]:	4,23	4,22	4,32

Iz preglednice 31 je razvidno, da se dobljeni upogibni momenti nosilca med seboj dokaj razlikujejo. Večja, ko je togost nosilca, večji je tudi upogibni moment nosilca. Imamo torej tri različne vrednosti upogibnega momenta in tri različne prereze. Če vse tri prereze dimenzioniramo na pripadajoči upogibni moment, lahko dobimo realno sliko, kolikšna odstopanja so prisotna med posameznimi primeri.

### 6.2.2.1 Dimenzioniranje primerov po prvi metodi

Lastnosti materiala:

-beton C 20/25  $\rightarrow \alpha f_{cd} = 1,41 \text{ kN/cm}^2$

-jeklo S 500  $\rightarrow f_{yd} = 43,47 \text{ kN/cm}^2$

$a = 4 \text{ cm}$

Primer 1a:

$b = 190 \text{ cm}$

$h = 32 \text{ cm}$

$M_d = 9071 \text{ kNcm}$

$$k_h = \frac{M_d}{f_{cd} * b * h^2} = \frac{9071 \text{ kNcm}}{1,41 \text{ kN/cm}^2 * 190 \text{ cm} * 32^2 \text{ cm}^2} = 0,033 \Rightarrow k_s = 1,033$$

$k_x = 0,091 \Rightarrow x = h * k_x = 32 \text{ cm} * 0,091 = 2,88 \text{ cm} \Rightarrow$  prerez se dimenzionira kot pravokotnik

$$A_s = k_s * \frac{M_d}{h * f_{yd}} = 1,033 * \frac{9071 \text{ kNcm}}{32 \text{ cm} * 43,47 \text{ kN/cm}^2} = 6,74 \text{ cm}^2$$

$A_s = 6,74 \text{ cm}^2$

Primer 1b:

$b = 410 \text{ cm}$

$h = 32 \text{ cm}$

$M_d = 12897 \text{ kNcm}$

$$k_h = \frac{M_d}{f_{cd} * b * h^2} = \frac{12897 \text{ kNcm}}{1,41 \text{ kN/cm}^2 * 410 \text{ cm} * 32^2 \text{ cm}^2} = 0,021 \Rightarrow k_s = 1,033$$

$k_x = 0,091 \Rightarrow x = h * k_x = 32 \text{ cm} * 0,091 = 2,88 \text{ cm} \Rightarrow$  prerez se dimenzionira kot pravokotnik

$$A_s = k_s * \frac{M_d}{h * f_{yd}} = 1,033 * \frac{12897 \text{ kNcm}}{32 \text{ cm} * 43,47 \text{ kN/cm}^2} = 9,58 \text{ cm}^2$$

$A_s = 9,58 \text{ cm}^2$

Primer 1c:

$$b = 120 \text{ cm}$$

$$h = 32 \text{ cm}$$

$$M_d = 7777 \text{ kNcm}$$

$$k_h = \frac{M_d}{f_{cd} * b * h^2} = \frac{7777 \text{ kNcm}}{1,41 \text{ kN/cm}^2 * 120 \text{ cm} * 32^2 \text{ cm}^2} = 0,044 \Rightarrow k_s = 1,036$$

$$k_x = 0,098 \Rightarrow x = h * k_x = 32 \text{ cm} * 0,098 = 3,32 \text{ cm} \Rightarrow \text{prez se dimenzionira kot pravokotnik}$$

$$A_s = k_s * \frac{M_d}{h * f_{yd}} = 1,036 * \frac{7777 \text{ kNcm}}{32 \text{ cm} * 43,47 \text{ kN/cm}^2} = 5,79 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 5,79 \text{ cm}^2$$

Primerjava rezultatov dimenzioniranja

**Preglednica 32: Potrebna upogibna armatura v posameznih primerih**

<b>Primer:</b>	<b>1a</b>	<b>1b</b>	<b>1c</b>
<b>Širina pasnice b [cm]</b>	<b>190</b>	<b>410</b>	<b>120</b>
<b>Upogibni momenti nosilca [kNm]:</b>	<b>90,71</b>	<b>128,97</b>	<b>77,77</b>
<b>Potrebna armatura [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>6,74</b>	<b>9,58</b>	<b>5,79</b>

Vidimo, da je v primeru 1b potrebno občutno več armature, kakor pa v primerih 1a in 1c. Torej zaradi večje togosti, nosilec pritegne nase večjo obtežbo. Ne glede na to, da pri dimenzioniranju uporabimo večji prečni prerez, kot pri ostalih dveh primerih, je še vedno pri primeru 1b potrebne 42 % več upogibne armature glede na primer 1a oz. 65% več upogibne armature glede na primer 1c. V vseh treh primerih je namreč tlačna cona betona slabo izkoriščena (koeficienti  $k_h$  so majhni). Zato povečana togost prereza na račun večje širine tlačne cone ne prispeva k višji nosilnosti. V tem primeru ima bistveno vlogo ročica notranjih sil  $z$ , ki pa je v vseh treh primerih približno enaka ( $z=h/k_s$ ). Zato je količina armature kar premo sorazmerna večjemu upogibnemu momentu.

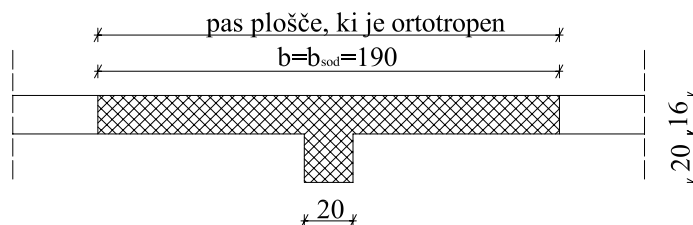
### 6.2.3 Ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo (tretja metoda)

V nadaljevanju ploščo modeliramo po tretji metodi; torej ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo. Naredil sem samo primer 3a in 3c; torej bo širina pasnice enaka 190cm in 120cm. Ne bom naredil primera 3b, kjer bi uporabil širino pasnice  $b=410\text{cm}$  (vplivna širina, izračunana po drugi metodi), ker bi bil v tem primeru prevelik del plošče ortotropen in bi imeli posledično večje obtežbe nosilca, kakor so v realnosti.

#### Primer 3a:

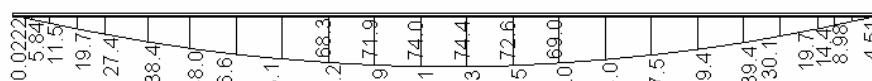
Širina pasnice T-prereza je enaka  $b=b_{\text{sod}}=190\text{cm}$ . Plošča je ortotropna v pasu, kjer je beton dvakrat podan. Lastna teža je podana ročno, da ne bi prišlo do podvajanja obtežbe.

Geometrija nosilca in ekscentrična priključitev na ploščo je vidna na sliki 60.

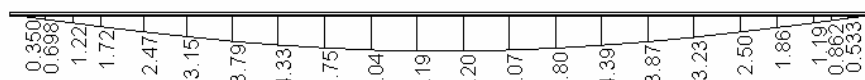


Slika 70: Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo

Na slikah 71 in 72 so prikazani rezultati upogibnih momentov in pomikov nosilca pri projektni obtežbi.



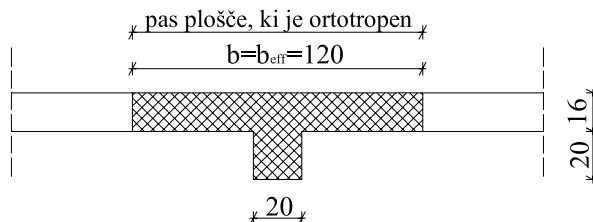
Slika 71: Upogibni momenti nosilca [kNm]; primer 3a



Slika 72: Pomiki nosilca [mm]; primer 3a

**Primer 3c:**

Primer je skoraj enak primeru 3a. Razlikuje se zgolj v širini pasnice T-prereza, ki znaša  $b=b_{\text{eff}}=120\text{cm}$ . Priključitev nosilca na ploščo je razvidna iz slike 73.



**Slika 73: Ekscentrična priključitev T-prereza v ploščo; primer 3c**

Na naslednjih dveh slikah so ponovno rezultati upogibnih momentov in pomikov nosilca.



**Slika 74: Upogibni momenti nosilca; primer 3c [kNm]**



**Slika 75: Pomiki nosilca; primer 3c [mm]**

V preglednici 33, so zbrani podatki o upogibnem momentu za primera 3a in 3c.

**Preglednica 33: Primerjava rezultatov**

Primer:	3a (b=190cm)	3c (b=120cm)
Širina pasnice b [cm]	190	120
Upogibni momenti nosilca [kNm]:	74,35	78,00
Pomiki nosilca (MSN) [mm]:	5,20	4,31

Iz preglednice 33 je razvidno, da so upogibni momenti nosilca v primeru 3a manjši od upogibnih momentov v primeru 3c. Ravno nasprotno pa so pomiki nosilca v primeru 3a večji od pomikov nosilca v primeru 3c. Osne sile ne vplivajo na to; vrednosti so premajhne. V enem primeru program reducira togost nosilca (kot po prvi metodi) in pozneje prišteje upogibne momente plošče; v drugem pa ne.

### 6.3 Analiza plošče z rebrom pri različnih višinah rebra

Analiziral sem notranje sile v plošči z rebrom. Opazoval sem, kako višina rebra vpliva na notranje sile nosilca, pomike nosilca, pa tudi kako vpliva na notranje sile plošče in na način prenosa obtežbe. Geometrija plošče je razvidna iz slike 60. Ploščo sem analiziral tudi "peš".

In sicer sem jo izračunal. Naredil sem različne primere, ki se med seboj razlikujejo v:

-načinu zasnove konstrukcije: centrična priključitev T-prereza, ekscentrična priključitev pravokotnega prereza, ekscentrična priključitev T-prereza v ortotropno ploščo

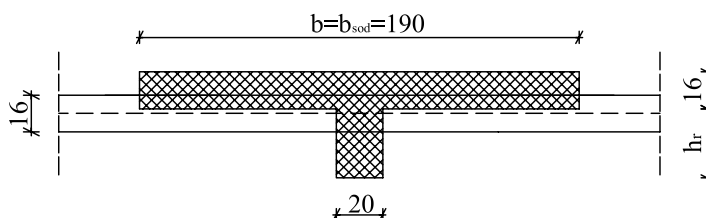
-širini pasnice T-prereza ( $b=b_{sod}$ ,  $b=b_v$ ,  $b=b_{eff}$  po EC2)

-višini rebra: višino rebra sem povečeval od začetnih 20 cm do 140 cm, kar predstavlja že skoraj togo podporo.

V nadaljevanju sem opisal primere, ki se jih analiziral, nakar sledi primerjava med njimi.

#### 6.3.1 Primeri 1a

Obdelal sem konstrukcijo 1a, ki je definirana v razdelku 6.2.2. Gre za centrično priključitev T-prereza na ploščo. Rebro, ki je v primeru 1a visoko 20cm, sem višal do višine 40cm v korakih po 10cm; naprej pa v korakih po 20cm.



Slika 76: Način priključitve T-prereza na ploščo

Na sliki 66 vidimo centrično priključitev T-prereza in dimenzijo pasnice  $b$ . Višina rebra  $h_r$  se spreminja. Začetna višina rebra  $h_r$  je 20cm, končna pa 140cm.

Rezultati notranjih sil podani v preglednicah ločeno za ploščo in ločeno za nosilec

Preglednica 34: Notranje sile plošče v primerih 1a

Primer:	1a20	1a30	1a40	1a60	1a80	1a100	1a120	1a140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice $b$ [cm]	190	190	190	190	190	190	190	190
$m_x$ -max [kNm/m]	17,51	13,80	11,65	9,78	9,09	8,77	8,62	8,54
$m_y$ -max [kNm/m]	10,04	10,02	10,08	10,15	10,18	10,19	10,20	10,20
$m_y$ -min [kNm/m]	-7,80	-7,74	-12,55	-17,48	-19,48	-20,41	-20,89	-21,17

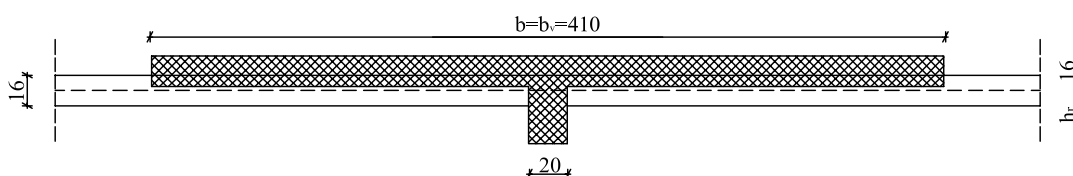


**Preglednica 35: Upogibni momenti nosilca v primerih 1a**

Primer	1a20	1a30	1a40	1a60	1a80	1a100	1a120	1a140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	190	190	190	190	190	190	190	190
M-max [kNm]	90,7	116,3	134,9	156,0	167,0	174,4	180,3	185,5
u-max [mm]	4,23	2,84	1,86	0,87	0,47	0,28	0,18	0,13

### 6.3.2 Primeri 1b

Analiziral sem konstrukcijo 1b, ki je definirana v razdelku 6.2.2. Višina rebra se povečuje iz začetnih 20cm s korakom po 10cm do 40cm, potem pa s korakom po 20cm do končne višine 140cm.



**Slika 77: Priključitev T-prereza na ploščo**

Na sliki 77 vidimo vse dimenzije T-prereza, priključenega na ploščo, razen višine rebra  $h_r$ , ki je spremenljiva (20cm-140cm). Rezultati so prikazani v preglednicah 35 in 36.

**Preglednica 36: Notranje sile plošče v primerih 1b**

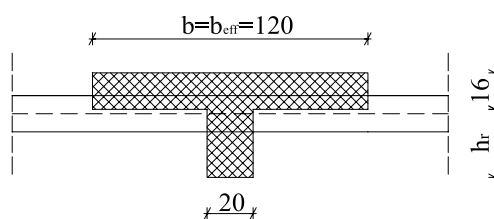
Primer:	1b20	1b30	1b40	1b60	1b80	1b100	1b120	1b140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	410	410	410	410	410	410	410	410
$m_x$ -max [kNm/m]	17,48	13,55	11,39	9,61	8,98	8,70	8,58	8,50
$m_y$ -max [kNm/m]	10,04	10,03	10,09	10,16	10,18	10,20	10,20	10,21
$m_y$ -min [kNm/m]	-7,79	-8,29	-13,21	-17,96	-19,81	-20,63	-21,05	-21,29

**Preglednica 37: Upogibni momenti in pomiki nosilca v primerih 1b**

Primer	1b20	1b30	1b40	1b60	1b80	1b100	1b120	1b140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	410	410	410	410	410	410	410	410
M-max [kNm]	129,0	138,9	146,1	156,3	162,9	168,1	172,9	177,4
u-max [mm]	4,22	2,73	1,73	0,77	0,40	0,24	0,15	0,10

### 6.3.3 Primeri 1c

Analiziral sem konstrukcijo 1c, ki je definirana v razdelku 6.2.2. Višina rebra se povečuje iz začetnih 20cm s korakom po 10cm do 40cm, potem pa s korakom po 20cm do končne višine 140cm.



Slika 78: Priključitev T-prereza na ploščo

V primerih 1c sem obravnaval T-prerez, ki ima širino pasnice  $b$  enako  $b_{eff}$  po EC2 ( $b_{eff} = l_0/5 + b_0$ ). V nadaljevanju so podani rezultati notranjih sil plošče v preglednici 38 in notranjih sil nosilca v preglednici 39.

Preglednica 38: Notranje sile plošče v primerih 1c

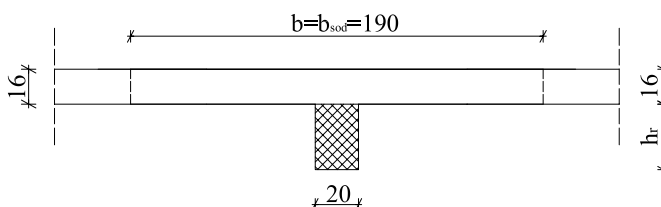
Primer:	1c20	1c30	1c40	1c60	1c80	1c100	1c120	1c140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice $b$ [cm]	120	120	120	120	120	120	120	120
$m_x$ -max [kNm/m]	17,78	14,10	11,89	9,94	9,19	8,84	8,67	8,57
$m_y$ -max [kNm/m]	10,05	10,01	10,07	10,14	10,18	10,19	10,20	10,20
$m_y$ -min [kNm/m]	-7,85	-7,12	-11,93	-17,04	-19,19	-20,35	-20,75	-21,07

Preglednica 39: Upogibni momenti nosilca v primerih 1c

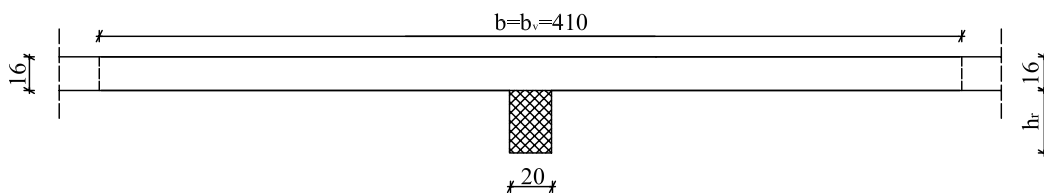
Primer	1c20	1c30	1c40	1c60	1c80	1c100	1c120	1c140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice $b$ [cm]	120	120	120	120	120	120	120	120
$M$ -max [kNm]	77,8	107,3	129,2	154,3	167,2	175,6	182,0	187,5
$u$ -max [mm]	4,32	2,96	1,99	0,96	0,53	0,32	0,21	0,15

### 6.3.4 Primeri 2a in 2b

Primer 2 je opisan v razdelku 6.2.1. Primeri 2a in 2b so med seboj enaki. Med seboj se razlikujejo v računu upogibnega momenta, ki deluje na nadomestni T-prerez. V primeru 2a integriramo upogibne momente plošče na sodelujoči širini  $b_{sod}$ , v primeru 2b pa upogibne momente integriramo na vplivni širini  $b_v$ .



Slika 79: Priključitev nosilca na ploščo in upoštevana širina  $b = b_{sod}$ -primer 2a



Slika 80: Priključitev nosilca na ploščo in upoštevana širina  $b=b_v$ -primer 2b

Notranje sile plošče so podane v skupni preglednici (preglednica 38), kjer so primeri označeni z 2ab, saj veljajo notranje sile plošče tako za primer 2a, kot tudi za primer 2b. Upogibni momenti nadomestnega T-prereza in pomiki rebra pa so podani ločeno za primer 2a (preglednica 41) in za primer 2b (preglednica 42).

Preglednica 40: Notranje sile plošče v primerih 2a in 2b

Primer:	2ab20	2ab30	2ab40	2ab60	2ab80	2ab100	2ab120	2ab140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
$m_x$ -max [kNm/m]	17,61	13,87	11,75	9,79	9,08	8,77	8,61	8,52
$m_y$ -max [kNm/m]	9,99	10,06	10,10	10,15	10,18	10,18	10,19	10,19
$m_y$ -min [kNm/m]	-7,82	-7,37	-12,12	-17,04	-19,04	-19,97	-20,45	-20,73

Preglednica 41: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza; primeri 2a

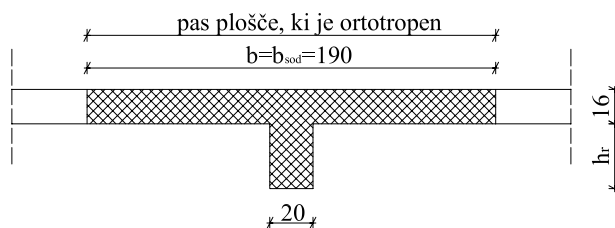
Primer	2a20	2a30	2a40	2a60	2a80	2a100	2a120	2a140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	190	190	190	190	190	190	190	190
M-max [kNm]	92,6	120,1	140,0	162,1	173,6	181,4	188,3	193,6
u-max [mm]	4,26	2,88	1,90	0,89	0,48	0,29	0,19	0,13

Preglednica 42: Upogibni momenti nadomestnega T-prereza primeri 2b

Primer	2b20	2b30	2b40	2b60	2b80	2b100	2b120	2b140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	410	410	410	410	410	410	410	410
M-max [kNm]	131,0	149,3	162,7	178,3	187,6	194,3	199,8	204,7
u-max [mm]	4,26	2,88	1,90	0,89	0,48	0,29	0,19	0,13

### 6.3.5 Primeri 3a

Analiziram primer 3a, definiran v razdelku 6.2.3.



Slika 81: Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo; primeri 3a

V preglednicah so zbrani rezultati primerov 3a z rebri, ki imajo različne višine.

**Preglednica 43: Notranje sile plošče v primerih 3a**

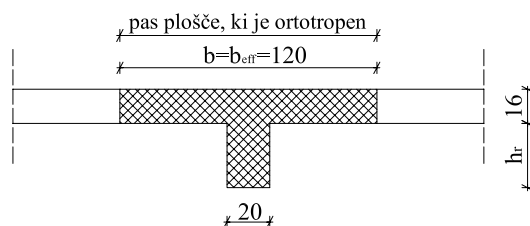
Primer:	3a20	3a30	3a40	3a60	3a80	3a100	3a120	3a140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	190	190	190	190	190	190	190	190
mx-max [kNm/m]	20,91	15,30	12,38	10,66	10,08	9,81	9,67	9,60
my-max [kNm/m]	9,63	9,82	9,95	10,04	10,08	10,09	10,10	10,10
my-min [kNm/m]	-8,74	-8,78	-13,82	-17,34	-18,74	-19,38	-19,71	-19,90

**Preglednica 44: Upogibni momenti nosilca v primerih 3a**

Primer	3a20	3a30	3a40	3a60	3a80	3a100	3a120	3a140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	190	190	190	190	190	190	190	190
M-max [kNm]	74,4	109,4	133,4	152,8	163,1	170,0	175,7	180,7
u-max [mm]	5,20	3,13	1,77	0,81	0,43	0,26	0,17	0,12

### 6.3.6 Primeri 3c

Analiziram primer 3c, definiran v razdelku 6.2.3.



**Slika 82: Ekscentrična priključitev T-prereza na ortotropno ploščo; primeri 3c**

V preglednicah so zbrani rezultati primerov 3a z rebri, ki imajo različne višine.

**Preglednica 45: Notranje sile plošče v primerih 3c**

Primer:	3c20	3c30	3c40	3c60	3c80	3c100	3c120	3c140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	120	120	120	120	120	120	120	120
mx-max [kNm/m]	17,92	14,35	12,24	10,43	9,76	9,46	9,30	9,21
my-max [kNm/m]	9,82	9,91	10,00	10,09	10,13	10,14	10,15	10,16
my-min [kNm/m]	-12,52	-11,30	-11,64	-15,56	-17,17	-17,93	-18,33	-18,56

**Preglednica 46: Upogibni momenti nosilca v primerih 3c**

Primer	3c20	3c30	3c40	3c60	3c80	3c100	3c120	3c140
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140
Širina pasnice b [cm]	120	120	120	120	120	120	120	120
M-max [kNm]	78,0	106,7	127,3	150,4	162,4	170,3	176,4	181,7
u-max [mm]	4,31	2,90	1,92	0,91	0,50	0,30	0,20	0,14

### **6.3.7 Primerjava rezultatov v grafični obliki**

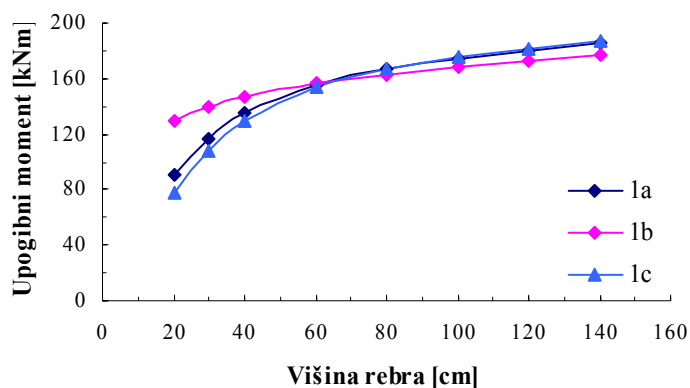
V tem razdelku sem primerjal v grafični obliki rezultate, ki so zbrani v preglednicah 34-46. Gre torej za primerjavo med posameznimi načini priključka nosilca v ploščo in različnimi višinami nosilca. V vseh primerih se višina rebra spreminja od začetnih 20cm do končnih 140cm v korakih po 20cm. Ostale značilnosti posameznega primera so naslednje:

- v primerih 1a gre za centričen priklop T-prereza; širina pasnice  $b$  je 190cm
- v primerih 1b gre za centričen priklop T-prereza; širina pasnice  $b$  je 410cm
- v primerih 1c gre za centričen priklop T-prereza; širina pasnice  $b$  je 120cm
- v primerih 2a gre za ekscentrični priklop pravokotnega prereza; širina nadomestnega T-prereza za določitev upogibnega momenta je 190cm
- v primerih 2b gre za ekscentričen priklop pravokotnega prereza; širina nadomestnega T-prereza za določitev upogibnega momenta je 410cm
- v primerih 3a gre za ekscentričen priklop T-prereza v ortotropno ploščo; širina pasnice  $b$  je 190cm
- v primerih 3c gre za ekscentričen priklop T-prereza v ortotropno ploščo; širina pasnice  $b$  je 120cm

#### **6.3.7.1 Primerjava notranjih sil nosilca**

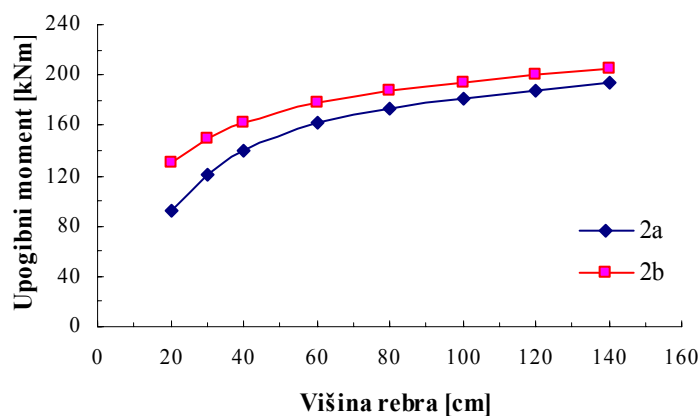
Najprej sem primerjal upogibne momente v nosilcih.

Pri prvi in tretji metodi modeliranja so bili to T-prerezi; pri drugi metodi pa so bili to nadomestni T-prerezi. V naslednjih treh grafih vidimo primerjavo med nosilci, ki imajo različen T-prerez; modelirani pa so po enaki metodi. In sicer so to nosilci s T-prerezi različnih dimenzij pasnice, centrično priključeni na ploščo.



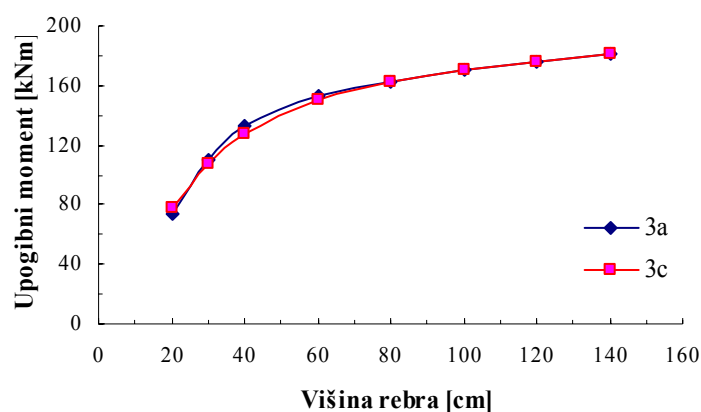
**Grafikon 10: Primerjava upogibnih momentov v sredini nosilca; primeri 1a, 1b in 1c**

Iz grafikona 11 je razvidno, da prihaja do večjih odstopanj med upogibnimi momenti pri manjših višinah rebra do višine 60cm, ko se upogibni momenti vseh treh prereзов med seboj izenačijo. Ko so nosilci višji in s tem bolj togi, se razlike med upogibnimi momenti, ki delujejo na posamezne T-prereze, zmanjšajo. Vendar pa je zanimivo dejstvo, da so pri višjih nosilcih, upogibni momenti v nosilcih z manjšo togostjo (1a in 1c), večji kakor pri nosilcu z večjo togostjo (1b).



**Grafikon 11: Primerjava upogibnih momentov, ki delujejo na nadomestni T-prerez ; primera 2a in 2b**

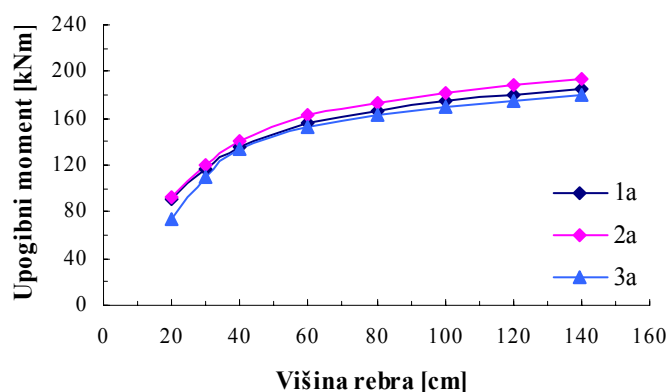
Tudi pri tem grafu vidimo, da se pri večjih višinah rebra, razlike med vzeto dimenzijo  $b$  ( $b_v$  ali  $b_{sod}$ ), zmanjšujejo. Vendar pa v tem primeru ne pride do večjega približevanja rezultatov pri višjih togostih. Razlike so v tem primeru večje, kot pa po prvi metodi, saj so tukaj najbolj pravilno upoštevane vse notranje sile.



**Grafikon 12: Upogibni momenti T-prereza; primera 3a in 3c**

V zgornjem grafu vidimo, da v tem načinu modeliranja ni bistvenih razlik med vzeto širino pasnice  $b$ .

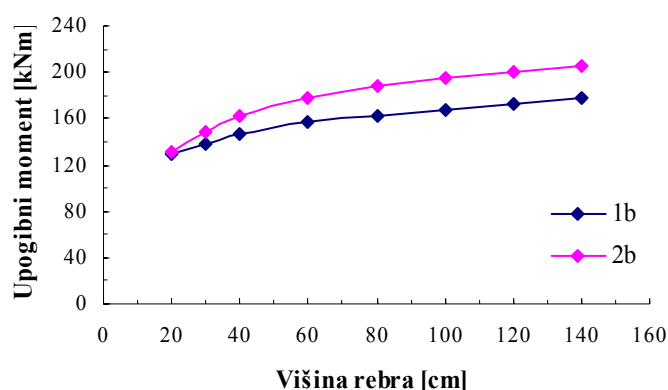
V nadaljevanju pa primerjam nosilce enakih dimenzij, vendar modelirane na različen način



**Grafikon 13: Upogibni momenti pri širini pasnice  $b=b_{sod}$**

Vidimo, da so največji upogibni momenti prisotni pri modeliranju plošče na drugi način, ki je tudi najbolj pravilen. Kljub temu, da je pri prvem načinu upoštevana centrična priključitev nosilca na ploščo, zaradi česar je togost manjša kot v tretjem primeru, ko je enak prerez priključen ekscentrično, so v primeru 3a v nosilcu manjši upogibni momenti, kot v primeru 1a.

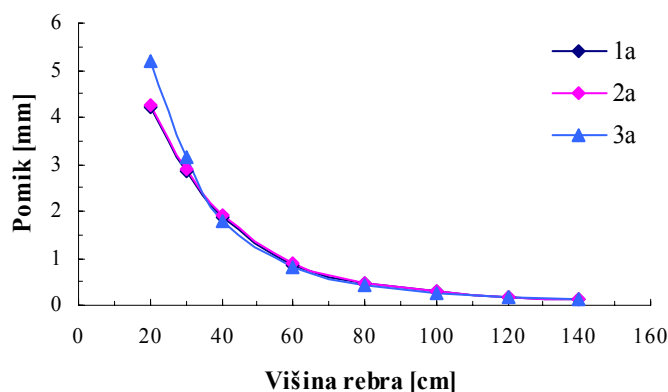
V nadaljevanju sledi primerjava med primeroma 1b in 2b. Torej upogibni momenti centrično priključenega T-prereza in upogibni momenti nadomestnega T-prereza ekscentrično priključenega pravokotnika.



**Grafikon 14: Upogibni momenti pri širini pasnice  $b=b_v$**

Če za širino pasnice  $b$  privzamemo širino  $b_v$ , prihaja pri izračunu upogibnih momentov med centrično in ekscentrično priključitvijo nosilca v ploščo do večjih razlik v upogibnih momentih. Pri višini rebra 20 cm se upogibna momenta sicer ujameta. Vendar pa bolj, ko je rebro visoko, bolj prihaja do izraza razlika v načinu priključitve nosilca v ploščo. Pri ekscentrični priključitvi nosilca je togost mnogo večja, kar je vidno v velikosti upogibnega momenta, ki deluje na centrično priključen T-prerez in na nadomestni T-prerez ekscentrično priključenega pravokotnika.

Na naslednjem grafu so prikazani pomiki nosilca v primerih modeliranja po prvi metodi z različnimi dimenzijami pasnic T-prereza:



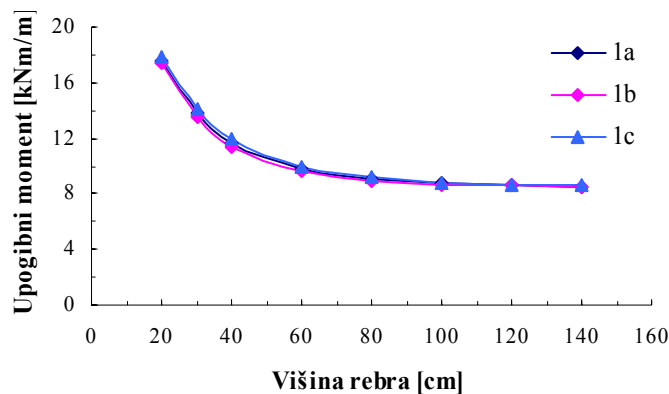
**Grafikon 15: Primerjava pomikov v sredini razpona; primeri 1a, 2a, 3a**

Pomiki se spreminjajo proporcionalno z večanjem togosti. Pomiki so pri manjših višinah rebra največji pri primeru 3a. Vendar pa se pri večanju višine rebra razlika pomikov zmanjšuje. Razmerje med načinom 1a in 2a pa ostaja nespremenjeno. Pravzaprav je tako majhno, da v grafu ni razvidnih podatkov o pomiku nosilca v primeru 1a.



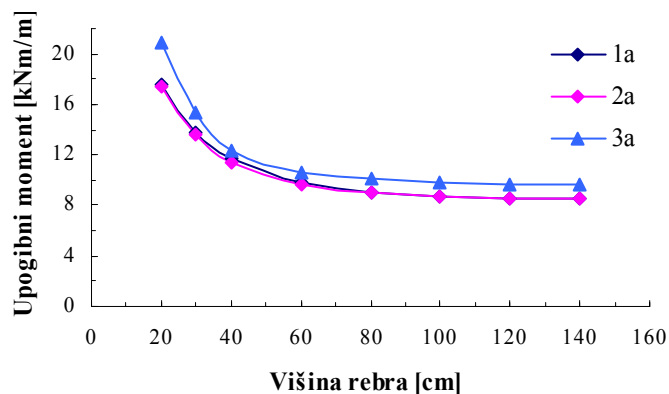
### 6.3.7.2 Primerjava notranjih sil plošče

Podobno kot pri nosilcih, sem primerjal posamezne notranje sile plošče pri različnem modeliranju konstrukcije.



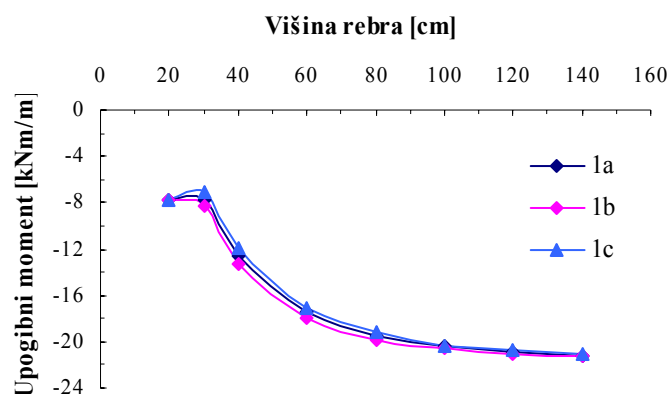
Grafikon 16: Upogibni momenti plošče  $m_x$  [kNm/m]

Na grafu 18 vidimo, da so razlike v rezultatih upogibnih momentov plošče  $m_x$  v primerih 1, zanemarljivi. Bolj, ko je rebro toga, več obtežbe prevzame in s tem vedno bolj razbremenjuje ploščo v smeri osi nosilca.



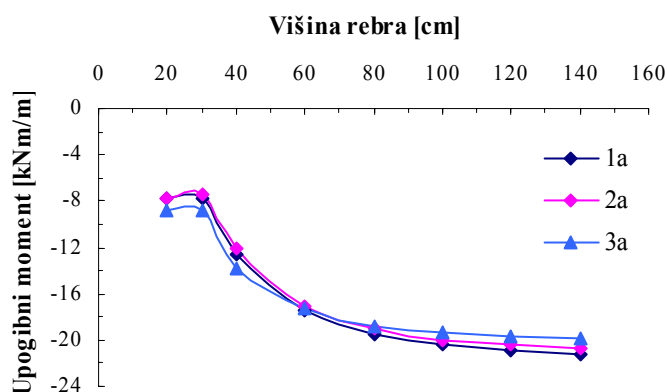
Grafikon 17: Upogibni momenti plošče  $m_x$

Primerjava na grafu 19 kaže, da so upogibni momenti  $m_x$  v primeru 3a opazno večji od upogibnih momentov primera 1a in 2a, ki se v vrednostih skoraj popolnoma ujemata. Do tega prihaja zaradi manjše togosti plošče, ki je v določenem delu ortotropna in morajo deli plošče, ki so poleg pasu plošče, ki je ortotropna, prevzeti obtežbo, ki je ne prevzame plošča z zmanjšano osno togostjo.



Grafikon 18: Minimalni upogibni momenti plošče  $m_y$

Minimalni upogibni momenti  $m_y$  se malenkost razlikujejo v primeru centrične priključitve pri nižjih višinah rebra. Bolj, ko je rebro togo, manjše so razlike med posameznimi oblikami prereza.



Grafikon 19: Minimalni upogibni momenti plošče  $m_y$

Primerjava minimalnih upogibnih momentov plošče  $m_y$  iz grafa 20 nam pokaže, da prihaja do zanimivih razlik rezultatov pri različnih zasnovah konstrukcije in različnih višinah rebra. Pri nižjih višinah rebra, so največje vrednosti upogibnih momentov  $m_y$  v absolutnem smislu prisotne v primerih 3a najmanjše vrednosti pa pri primerih 2a. Vrednosti upogibnih momentov  $m_y$  primerov 1a so nekje vmes. Pri višini rebra 60cm, so vrednosti upogibnih momentov  $m_y$  v vseh treh primerih enake. Od višine 60cm dalje, pa so največje vrednosti upogibnih momentov prisotne v primerih 1a, najmanjše pa v primerih 3a.

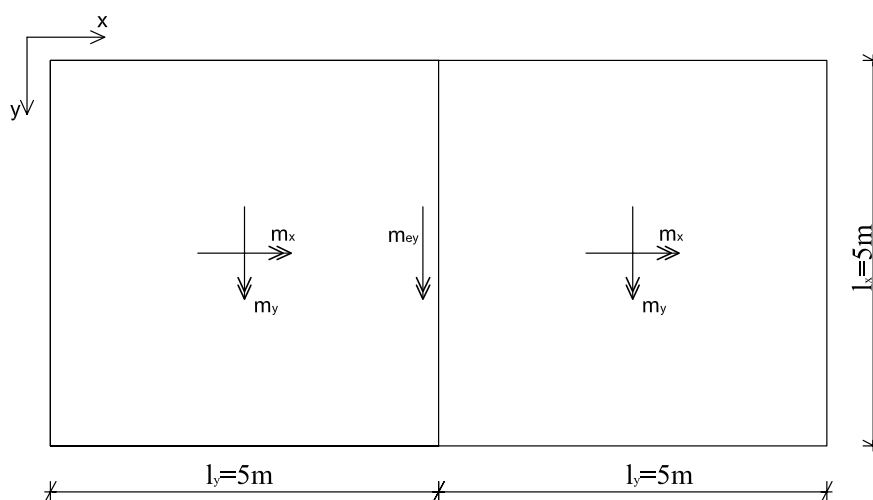
### 6.3.8 Analiza “peš”

Obravnavano ploščo sem dimenzioniral “peš” s pomočjo Hahnovih tabel (Hahn, 1970).

Nosilec pa sem izračunal kot linijski element z obtežbo, ki sem jo določil po strešnem pravilu.

#### 6.3.8.1 Račun plošče

Predpostavil sem, da je rebro toga podpora in izračunal upogibne momente plošče ločeno za dve polji, kot je razvidno iz slike 83.



Slika 83: Oznaka upogibnih momentov plošče

Obtežba:

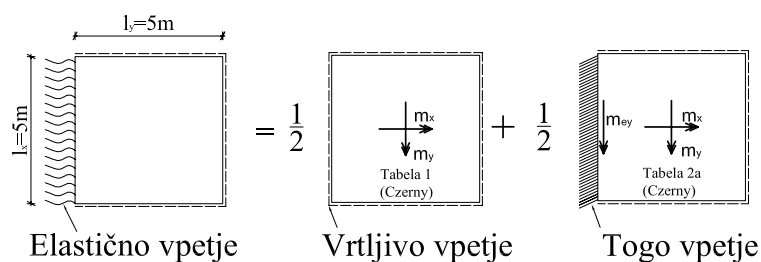
-lastna teža  $g = 4 \text{ kN/m}^2$

-koristna obtežba  $q = 3,25 \text{ kN/m}^2$

Projektna obtežna kombinacija:

$$q_d = 1,35 * g + 1,5 * q = 1,35 * 4 \text{ kN/m}^2 + 3,25 \text{ kN/m}^2 = 10,275 \text{ kN/m}^2 = 10,28 \text{ kN/m}^2$$

Za izračun pozitivnih upogibnih momentov plošče sem predpostavil elastično vpetje roba plošče ob rebri.



Slika 84: Robni pogoji dela plošče z rebrom

$$K_d = q_d * l_x * l_y = 10,28 \text{ kN/m}^2 * 5\text{m} * 5\text{m} = 256,88\text{kN}$$

$$\frac{l_y}{l_x} = \frac{5}{5} = 1$$

$$M_x = \frac{K_d}{m_x}$$

$$M_y = \frac{K_d}{m_y}$$

Tabela (1):

$$m_x^{(1)} = 27,2$$

$$m_y^{(1)} = 27,2$$

$$m_{xy}^{(1)} = 21,6$$

Tabela (2a):

$$m_x^{(2a)} = 41,2$$

$$m_y^{(2a)} = 31,2$$

$$m_{ey}^{(2a)} = 11,9$$

$$m_{xy}^{(2a)} = 26,2$$

$$M_x = \frac{K_d}{2} * \left( \frac{1}{m_x^{(1)}} + \frac{1}{m_x^{(2a)}} \right) = \frac{256,88}{2} * \left( \frac{1}{27,2} + \frac{1}{41,2} \right) = 7,81\text{kNm/m}$$

$$M_y = \frac{K_d}{2} * \left( \frac{1}{m_y^{(1)}} + \frac{1}{m_y^{(2a)}} \right) = \frac{256,88}{2} * \left( \frac{1}{27,2} + \frac{1}{31,4} \right) = 8,81\text{kNm/m}$$

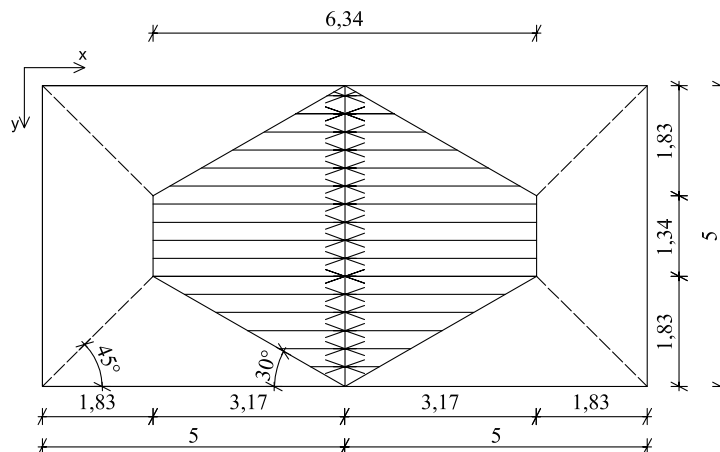
$$M_{xy} = \frac{K_d}{2} * \left( \frac{1}{m_{xy}^{(1)}} + \frac{1}{m_{xy}^{(2a)}} \right) = \frac{256,88}{2} * \left( \frac{1}{21,6} + \frac{1}{26,2} \right) = 10,85\text{kNm/m}$$

Za negativne upogibne momente pa sem predpostavil togo vpetje roba plošče ob rebro (tabela 2a).

$$M_{ey} = -\frac{K_d}{m_{ey}^{(2a)}} = -\frac{256,88}{11,9} = -21,59\text{kNm/m}$$

### 6.3.8.2 Račun nosilca

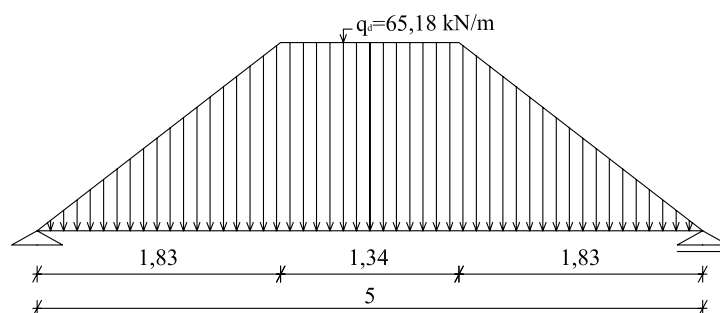
Predpostavimo, da je nosilec toga podpora. In da prevzame naslednjo obtežbo po strešnem pravilu:



Slika 85: Strešno pravilo obtežbe nosilca

Obtežba nosilca:

$$q_d = 2 * 3,17 \text{ m} * 10,28 \text{ kNm}^2 = 65,18 \text{ kN/m}$$

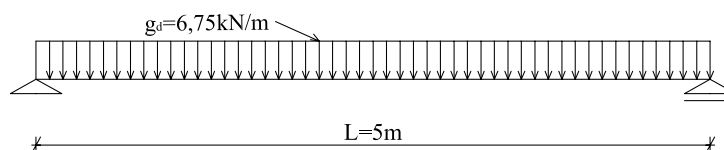


Slika 86: Obtežba plošče, ki obremenjuje nosilec

Lastna teža nosilca se spreminja v odvisnosti od višine nosilca. Če predpostavim, da je nosilec podpora, mora biti tudi ustrezno tog. Predpostavil sem višino nosilca  $h_n = 140 \text{ cm}$ .

$$g = 0,2 \text{ m} * 1,4 \text{ m} * 25 \text{ kN/m}^3 = 7 \text{ kN/m}^2$$

$$g_d = 1,35 * g = 1,35 * 5 \text{ kN/m}^2 = 9,45 \text{ kN/m}$$



Slika 87: Lastna teža nosilca

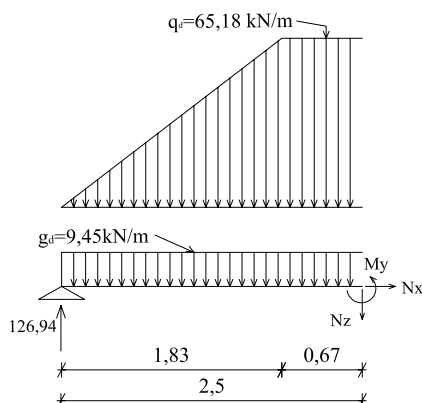
Izračun vertikalnih reakcij v podporah:

$$A+B - 9,45\text{kN/m} \cdot 5\text{m} - 65,18 \cdot (1,83+1,34)=0$$

Ker je konstrukcija simetrična, so reakcije v podporah enake, torej velja:

$$A = B = 126,94\text{kN}$$

Izračun upogibnega momenta na sredini nosilca:



**Slika 88: Račun reakcij in notranjih sil nosilca**

$$M(x=2,5) = ?$$

$$M - 126,94\text{kN} \cdot 2,5\text{m} + 9,45 \cdot \frac{2,5^2}{2} + 65,18 \cdot \frac{0,67^2}{2} + (0,67 + \frac{1}{3} \cdot 1,83) \cdot \frac{1,83 \cdot 65,18}{2} = 0$$

$$M=196,85 \text{ kNm}$$

Izračunani rezultat velja za višino rebra  $h_r=140\text{cm}$  (pomembno zaradi lastne teže rebra..)

### 6.3.9 Primerjava rezultatov

Primerjal sem rezultate "peš računa" in rezultate izračuna računalniškega programa. Primerjal sem upogibne momente plošče in upogibne momente nosilca. Vzel sem rezultate primera 1a140; saj sem pri peš računu predvidel višino rebra  $h_r=140\text{cm}$ . Rezultati so podani v naslednji preglednici:

**Preglednica 47: Primerjava "peš" računa in rezultatov programa**

<b>Primer:</b>	<b>1a20</b>	<b>1a30</b>	<b>1a40</b>	<b>1a60</b>	<b>1a80</b>	<b>1a100</b>	<b>1a120</b>	<b>1a140</b>	<b>peš račun</b>
Višina rebra [cm]	20	30	40	60	80	100	120	140	140
Širina pasnice b [cm]	190	190	190	190	190	190	190	190	-
mx-max [kNm/m]	17,51	13,80	11,65	9,78	9,09	8,77	8,62	8,54	7,81
my-max [kNm/m]	10,04	10,02	10,08	10,15	10,18	10,19	10,20	10,20	8,81
my-min [kNm/m]	-7,80	-7,74	-12,55	-17,48	-19,48	-20,41	-20,89	-21,17	-21,59
M-max [kNm]	90,7	116,3	134,9	156,0	167,0	174,4	180,3	185,5	196,9

V preglednici 47 vidimo, da prihaja med "peš" računom in računom z računalniškim programom do določenih odstopanj. V primeru 1a140, ki sem ga predpostavil pri peš računu, se rezultati peš računa ujemajo z rezultati iz programa samo v negativnih upogibnih momentih nad rebrom. Pozitivni upogibni momenti plošče so z računalniškim programom v obeh smereh večji od upogibnih momentov izračunanih peš. Torej v tem primeru z računom peš, nismo na varni strani glede pozitivnih upogibnih momentov plošče.

Glede nosilca smo na varni strani, saj vidimo, da je izračunani upogibni moment nosilca večji od izračunanega upogibnega momenta primera 1a140. Predpostavka, da je nosilec toga podpora je bila torej dobra tako za določitev velikosti negativnega upogibnega momenta, ki se pojavi v plošči, kot tudi za dimenzioniranje nosilca.

Če pogledamo vrednosti upogibnih momentov pri ostalih primerih, ko je rebro nižje vidimo, da peš račun plošče še zdaleč ne ustreza dejanskemu stanju plošče z rebrom manjše togosti. V primeru plošče z rebrom manjše togosti, se obtežba prenaša večinoma v smeri vzporedno z rebrom (v našem primeru) oz. v smeri krajše razdalje med podporami. Ker je v našem primeru razdalja v smeri y enaka 5 m; v smeri x pa 2x5m, se seveda obtežba večinoma prenaša v smeri y (mx-max). Vidimo torej, da moramo biti pri zasnovi konstrukcije in predpostavki robnih pogojev pri peš računu zelo previdni, saj lahko naredimo veliko napako. Z večanjem višine rebra vidimo, da pride v našem primeru do približno enakega pozitivnega upogibnega

momenta plošče med višino rebra  $h_r=40$  in  $h_r=60$ cm. Šele pri tej višini rebra ob ostalih nespremenjenih dimezijah in robnih pogojih, pride pri prenosu obtežbe v obe smeri. V primerih plošče z nižjimi višinami rebra, pa se večji del obtežbe prenaša v smeri x. Hkrati z manjšanjem pozitivnega upogibnega momenta  $m_x$ , se večjajo negativni upogibni momenti  $m_y$ . Pozitivni upogibni momenti  $m_y$  pa ostajajo bolj ali manj enaki pri vseh višinah rebra.



## 7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem obravnaval različne načine modeliranja konstrukcije plošče z rebrom. Ugotovil sem, da prihaja pri enih modelih do večjih, pri drugih pa do manjših razlik v rezultatih notranjih sil in pomikov. Na koncu sem z enostavnim primerom pokazal, da ob predpostavki večjega prevzema obtežbe nosilca in predimenzioniranju le-tega, plošča še vedno ni varno dimenzionirana. Pozornost je torej treba nameniti načinu prenosa obtežbe pri različnih višinah rebra. Pri nižjih togostih nosilca, se obtežba plošče drugače prenaša, kot pri višjih togostih. Za "peš" račun konstrukcije plošče z rebrom moramo biti pozorni na naslednje zadeve:

Dokler rebro ni dovolj toga, da bi prevzelo nase obtežbo, ki jo prevzame toga podpora, se lahko večji del obtežbe plošče prenaša v smeri vzporedno z rebrom v krajne opore. Pri opazovanju upogibnih momentov ob različnih višinah rebra vidimo, da šele pri določeni višini rebra pride do rznosa obtežbe v obe smeri, kot smo predpostavili pri peš računu. Pomemben faktor pri rznosu obtežbe je razmerje togosti nosilca glede na togost plošče. Če je plošča dosti bolj toga, kot je nosilec, ne bo nosilec nase pritegnil bistvene obtežbe in plošča se bo prenašala v podpore, ki so toge in ne v rebro. Nosilec v tem primeru ne izpolni svoje naloge prevzema obtežbe in je predimenzioniran, saj ga dimenzioniramo na obtežbo, ki je dejansko ne prevzame. Po eni strani smo torej predimenzionirali nosilec; po drugi strani pa smo poddimenzionirali ploščo. V primeru rebrastih stropov, kjer je razdalja med rebri razmeroma majhna, je manjša verjetnost, da bi prišlo do poddimenzioniranja plošče. Večja nevarnost pomanjkanja armature je v tistih konstrukcijah, kjer na ploščo z večjim razponom, v sredini dodamo rebro, z namenom zmanjšanja upogibnih momentov in armature plošče. Če je rebro preveč podajno, ne bo opravilo funkcije, ki smo jo predvideli in plošča ne bo prenašala obtežbe dosti drugače, kot če rebra ne bi bilo.

## **VIRI**

Avak, R.1994. Stahlbetonbau in Beispielen, DIN 1045 und Europaische normung, Werner-Verlag

SOFISTIK Extended T-beam philosophy- Usage for Composite Bridge sections, Sofistik Aktiengesellschaft, JB 2004

EUROCODE 2, Design of reinforced concrete structures; SIST ENV 1993-1-1

Pučnik, P., 2005. Sodelujoča širina pri ploščah podprtih z nosilnim in prečnim prerezom pravokotne oblike. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo

Hahn, J. 1970. Durchlauftrager, Rahmen, Platten und Balken auf elastischer Bettung, Werner-Verlag

[www.sofistik.com](http://www.sofistik.com) (support/tutorials)