

BETONSKE KONSTRUKCIJE - VSEBINA

Vrste in značilnosti betonskih konstrukcij.
Izhodišča analize in dimenzioniranja elementov betonskih konstrukcij. Metoda mejnih stanj betonskih konstrukcij.
Koncept varnosti konstrukcij.
Mehanske in reološke lastnosti betona, mehke in prednapete armature.
Mejna nosilnost in dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov na upogibno-osno obremenitev: • enojni upogib armiranobetonskega prereza v kombinaciji z osno silo v območju velike ekscentričnosti, • enojni upogib armiranobetonskega prereza v kombinaciji z osno silo v območju male ekscentričnosti.
Teoretične podlage za račun mejne nosilnosti armiranobetonskih prerezov pri dvojnem upogibu z osno silo.
Mejna nosilnost in dimenzioniranje armiranobetonskih elementov na strižno obremenitev: • račun mejne nosilnosti armiranobetonskih elementov glede na prečno silo, • račun mejne nosilnosti armiranobetonskih elementov glede na torzijo, • račun mejne nosilnosti ploščastih armiranobetonskih elementov pri preboju.

Nearmirane in šibko armirane betonske konstrukcije

- Načela računa elementov nearmiranih betonskih konstrukcij.
- Račun mejne nosilnosti in dimenzioniranje nearmiranih betonskih elementov na upogibno-osno obremenitev.

Račun mejne nosilnosti in dimenzioniranje nearmiranih betonskih elementov na strižno obremenitev.

Mejna stanja uporabnosti betonskih konstrukcij:

- Omejevanje napetosti v materialih
- Modeliranje in račun razpok armiranih in delno prednapetih betonskih konstrukcij v mejnem stanju uporabnosti.
- Račun pomikov armiranih in prednapetih betonskih konstrukcij z upoštevanjem vpliva razpok in reologije materialov.

Modeliranje in račun mejne nosilnosti elementov betonskih konstrukcij na podlagi nosilnih mehanizmov **s tlačnimi razporami in nateznimi vezmi.**

Prednapete betonske konstrukcije

- Načela delovanja in obnašanja prednapetih konstrukcij ter sistemi prednapenjanja.
- Vpliv stopnje prednapetja na obnašanje betonskih konstrukcij.
- Dimenzioniranje prednapetih betonskih prerezov na upogibno-osno obremenitev.
- Dimenzioniranje prednapetih betonskih prerezov na prečno silo.

Načela ter izvedba armiranja in detajlov armiranobetonskih konstrukcij.



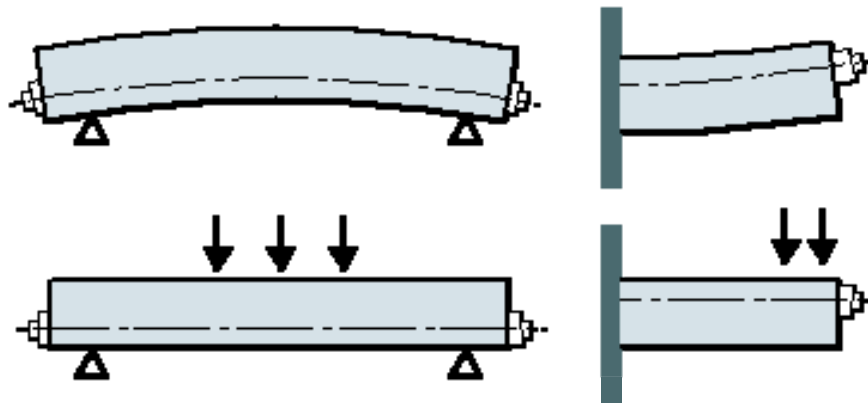




Klasično armirani betonski nosilec:



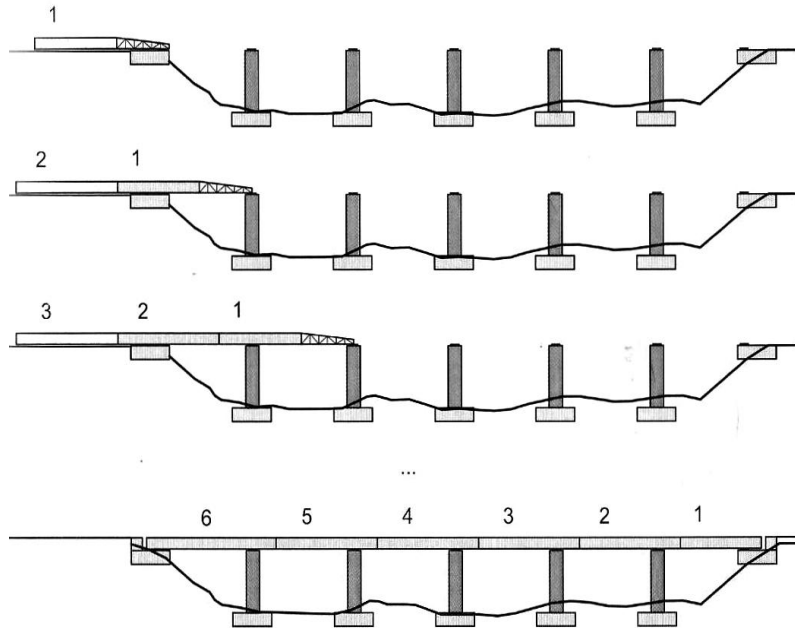
Prednapeti betonski nosilec:



- Prednapenjanje omogoča **uporabo posebnih tehnologij gradnje monolitnih mostov**, ki sicer ne bi bile izvedljive, kot sta npr.:
 - Prosta konzolna gradnja



- Narivanje prekladnih konstrukcij mostov s krajnega opornika



Glej simulacijo gradnje s postopnim navajanjem na:

http://www.conduitgroup.com.au/stories/engineering/videos/bridge_construction_3DAnimation.php

RAČUN OZIROMA DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJ

Podlaga za projektiranje, gradnjo in vzdrževanje gradbenih konstrukcij so:

- pravni predpisi (zakoni kot sta npr. Zakon o graditvi objektov in Zakon o urejanju prostora) in
- tehnični predpisi (standardi in pravilniki). Pravilniki so v obvezni uporabi, standardi pa so v osnovi neobvezni, postanejo pa lahko obvezni v povezavi s pravilniki.

Za projektiranje gradbenih konstrukcij v RS se od 1.1.2008 uporabljajo konsistentni evropski standardi za projektiranje gradbenih konstrukcij - Evrokodi:

Evrokod: Osnove projektiranja konstrukcij (SIST EN 1990)

Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije:

SIST EN 1991-1-1: Splošni vplivi – Gostote, lastna teža, koristne obtežbe stavb

SIST EN 1991-1-2: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije

SIST EN 1991-1-3: Splošni vplivi – Obtežba snega

SIST EN 1991-1-4: Splošni vplivi – Obtežbe vetra

SIST EN 1991-1-5: Splošni vplivi – Toplotni vplivi

SIST EN 1991-1-6: Splošni vplivi – Vplivi med gradnjo

SIST EN 1991-1-7: Splošni vplivi – Nezgodni vplivi

SIST EN 1991-2: Prometna obtežba mostov

Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij:

SIST EN 1992-1-1: Splošna pravila in pravila za stavbe

SIST EN 1992-1-2: Splošna pravila - Projektiranje požarnovarnih konstrukcij

SIST EN 1992-2: Betonski mostovi – Projektiranje in pravila za konstruiranje

SIST EN 1992-3: Zadrževalniki tekočin

Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij

Evrokod 4: Projektiranje sovprežnih konstrukcij iz jekla in betona

Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij

Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij

Evrokod 7: Geotehnično projektiranje

Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij:

SIST EN 1998-1: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe

SIST EN 1998-2: Mostovi

Evrokod 9: Projektiranje konstrukcij iz aluminijevih zlitin

OSNOVE KONSTRUIRANJA PO EVROKODIH - Metoda mejnih stanj

KONSTRUKCIJA MORA BITI KONSTRUIRANA IN ZGRAJENA NA TAK NAČIN, DA:

- s primerno stopnjo zanesljivosti, prestande vse obtežbe in njihove vplive, ki lahko nastopijo v času gradnje in uporabe ter ima primerno trajnost z ozirom na stroške vzdrževanja
- je s sprejemljivo verjetnostjo sposobna za namenjeno uporabo glede na predvideno življensko dobo in ceno

MEJNA STANJA:

- Mejna stanja nosilnosti (stanja porušitve različnih vrst, ki lahko ogrozijo življenja):
 - * izguba ravnotežja konstrukcije ali dela konstrukcije kot togega telesa,
 - * pretirane deformacije, porušitev ali nestabilnost konstrukcije ali njenega dela.
- Mejna stanja uporabnosti (stanja pri katerih konstrukcija ne izpolnjuje pogojev uporabnosti)
 - * razpoke, ki zmanjšujejo trajnost konstrukcij,
 - * deformacije in pomiki, ki onemogočajo normalno uporabo in/ali poslabšajo videz konstrukcije,
 - * vibracije, ki povzročajo neugodno počutje uporabnikov in škodijo objektom.







FGG-KMLK

21.07.1999

Primorje

PVP 265 - 12/1

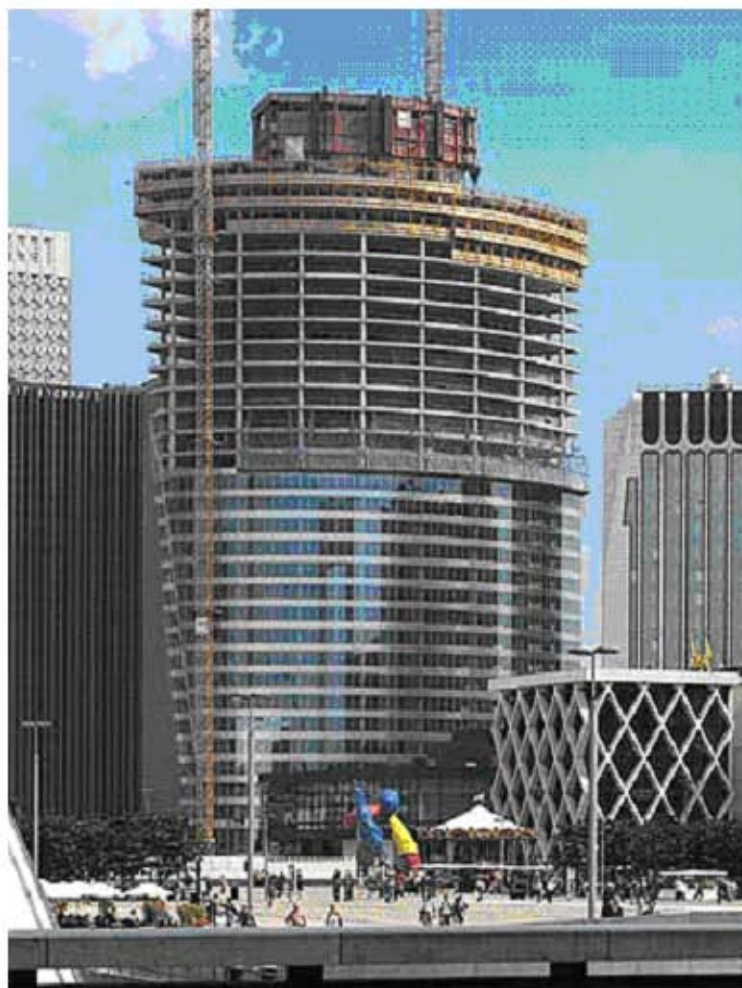
N3

11

PROJEKTNA STANJA:

- Trajna stanja - odgovarjajo času normalne uporabe
- Prehodna stanja - odgovarjajo npr. razmeram v času gradnje ali rekonstrukcije
- Nezgodna stanja
- “Potresno” stanje





VPLIVI – (POSPLOŠENA OBTEŽBA - Action - F):

- Obtežba (koncentrirana, ploskovna ali volumska) - direktna obtežba
- Vsiljene deformacije - indirektna obtežba (reologija, temperaturni vplivi in posedki)

Razdelitev vplivov glede na časovno spremenljivost:

- Stalni vplivi - G – (lastna teža, nekonstruktivni elementi, pritrjena oprema...),
P – (vpliv prednapetja)

- Spremenljivi vplivi – Q –
(predvsem koristne obtežbe in
sneg):

Npr. pri lesenih konstrukcijah:

- * dolgotrajne obtežbe (skladiščni prostori)
- * srednje-dolge obtežbe (vsiljene obtežbe) < sneg!!
- * kratkotrajne obtežbe (veter in sneg*)
- * trenutne obtežbe (nezgodne obtežbe)

- Nezgodni vplivi – A – (udarci vozil in plovil, eksplozije)

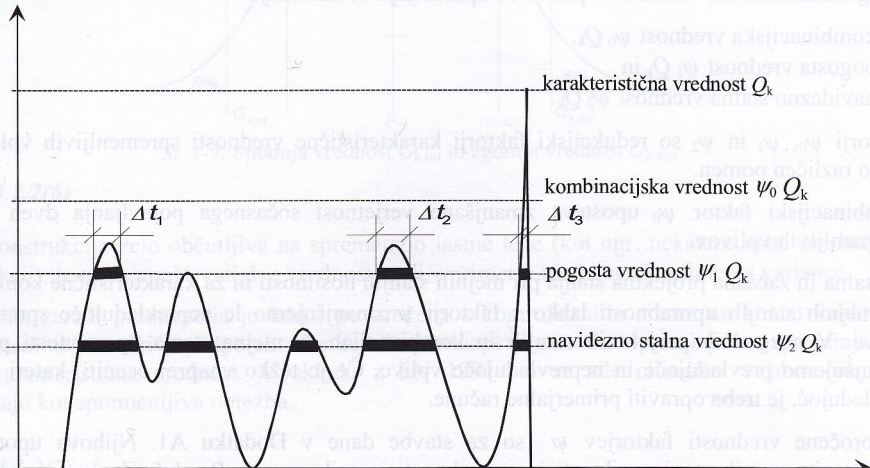
Razdelitev vplivov glede na prostorsko spremenljivost:

- Fiksni vplivi (lastna teža, stalna obtežba)
- Prosti vplivi (koristna obtežba, premična obtežba, veter, sneg) - najbolj neugodna postavitev!

Reprezentativne vrednosti spremenljivih vplivov:

- Karakteristična vrednost Q_k je glavna reprezentativna vrednost. S pomočjo faktorjev ψ_i (glej SIST EN 1990) so določene še:
- Kombinacijska vrednost $\psi_0 Q_k$
- Pogosta vrednost $\psi_1 Q_k$
- Navidezno stalna vrednost $\psi_2 Q_k$

trenutna vrednost vpliva Q



čas

Projektne vrednosti vplivov - F_d :

Splošno: $F_d = \gamma_F F_k$;

$$G_d = \gamma_G G_k$$

$$Q_d = \gamma_Q Q_k \quad \text{ali} \quad Q_d = \gamma_Q \psi_i Q_k$$

$$A_d = \gamma_A A_k \text{ (običajno podan že kar } A_d \text{)}$$

Geometrija konstrukcije: v splošnem $a_d = a_{nom}$

PROJEKTNE VREDNOSTI UČINKOV VPLIVOV - E_d :

Učinki vplivov - odziv konstrukcije: notranje sile, napetosti, deformacije, pomiki

$$E_d = E_d(F_d, a_d, X_d \dots)$$

KOMBINACIJE VPLIVOV (glej SIST EN 1990):**Mejna stanja nosilnosti:**

Osnovne kombinacije vplivov (trajna in prehodna stanja):

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{Q,i}$$

Nezgodne kombinacije vplivov (nezgodna stanja):

$$\sum \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \gamma_{PA} P_k + A_d + \gamma_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{Q,i} \quad \gamma_{GA,j} \text{ je običajno } 1$$

Parcialni varnostni faktorji za vplive (osnovne kombinacije):

	Stalni vplivi	Spremenljivi vplivi	
		prevladujoč	Preostali (kombinacijska vrednost)
Ugoden vpliv $\gamma_{F,inf}$	1,00*	0,00	0,00
Neugoden vpliv $\gamma_{F,sup}$	1,35*	1,50	1,50

Kdaj je nek stalni vpliv ugoden?

Stalni vplivi, katerih učinki v absolutnem smislu iskano količino-účinek povečujejo so neugodni, nasprotno pa so ugodni tisti vplivi, ki v absolutnem smislu zmanjšujejo iskano količino. Če je npr. upogibni moment zaradi stalne obtežbe v obravnavanem prerezu pozitiven, bomo pri določanju maksimalnega upogibnega momenta v tem prerezu stalno obtežbo upoštevali kot neugoden vpliv (torej $\gamma_{G,j} = \gamma_{G,j,sup}=1,35$), pri računu minimalnega upogibnega momenta pa bomo to isto stalno obtežbo upoštevali kot ugoden vpliv ($\gamma_{G,j}=\gamma_{G,j,inf}=1,00$).

* Za račun globalnega ravnotežja konstrukcij izjemoma lahko $\gamma_{G,inf}=0,90$ in $\gamma_{G,inf}=1,10$

Preverjanje statičnega ravnotežja se po [točki 2.4.4](#) SIST EN 1992-1-1 nanaša na projektna stanja ravnotežja – EQU kot sta sidranje in preverjanje dviganja neprekinjenih nosilcev nad ležišči. V primeru kontrole statičnega ravnotežja moramo dokazati da velja:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$$

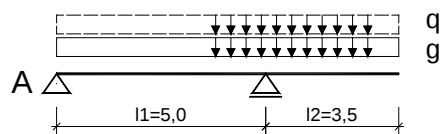
pri čemer sta

- $E_{d,dst}$ projektna vrednost učinkov, ki zmanjšujejo stabilnost
- $E_{d,stb}$ projektna vrednost učinkov, ki povečujejo stabilnost

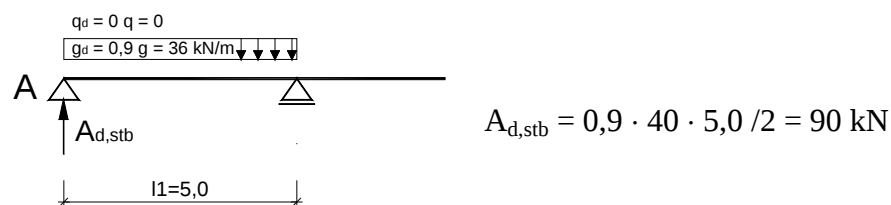
Účinek s splošno oznako E, pri kontroli statičnega ravnotežja najpogosteje predstavlja reakcija v podpori.

Računski primer: Nosilec s previsnim poljem

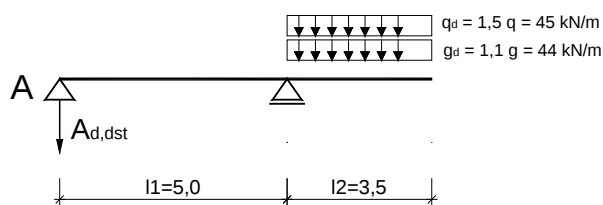
Preveriti je potrebno pogoj statičnega ravnotežja – EQU:

Stalna obtežba: $g = 40 \text{ kN/m}$ Spremenljiva obtežba: $q = 30 \text{ kN/m}$ 

Stabilizacijski del obtežbe:



Destabilizacijski del obtežbe:



$$A_{d, dst} = (1,1 \cdot 40 + 1,5 \cdot 30)(5,0 + 3,5/2) / 5,0 = 109 \text{ kN}$$

$$A_{d, dst} = 109 \text{ kN} > A_{d, stb} = 90 \text{ kN} \rightarrow \text{pogoj ni izpolnjen!}$$

$$\rightarrow \text{potrebno sidranje za silo: } \Delta A_d = A_{d, dst} - A_{d, stb} = 109 - 90 = 19 \text{ kN}$$

Mejna stanja uporabnosti:

$$\sum G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{Q,i} \quad (\text{karakteristična kombinacija vplivov})$$

$$\sum G_{k,j} + P_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{Q,i} \quad (\text{pogosta kombinacija vplivov})$$

$$\sum G_{k,j} + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{Q,i} \quad (\text{navidezno stalna kombinacija vplivov})$$

LASTNOSTI MATERIALOV -X:

Pri dimenzioniranju konstrukcij je najpomembnejša lastnost materialov njihova trdnost f (tlačna, natezna, strižna...).

Karakteristična vrednost - X_k (standardni testi, statistika-fraktila)

Projektna (računska) vrednost - X_d :

$X_d = k X_k / \gamma_M$

γ_M - materialni varnostni faktor:

Mejna stanja nosilnosti:

Osnovni obtežni primeri:

$$\gamma_M = 1,5 \quad (\text{beton})$$

$$\gamma_M = 1,15 \quad (\text{armatura in jeklo za prednapenjanje})$$

$$\gamma_M = 1,3 \quad (\text{les in nekateri materiali na osnovi lesa})$$

$$\gamma_M = 1,1 \quad (\text{jeklo})$$

Nezgodni obtežni primeri:

$$\gamma_M = 1,0$$

Mejna stanja uporabnosti:

$$\gamma_M = 1,0$$

k – korekcijski faktor:

Npr. pri betonu $k = \alpha_{cc}$ oziroma $k = \alpha_{ct}$ (s tem je lahko zajeta trajna trdnost betona)

Npr. pri lesu $k = k_{mod}$ modifikacijski faktor , ki zajame vpliv trajanja obtežbe in vsebnosti vlage na trdnost lesa:

Razredi uporabe:

1. razred: določen je z vsebnostjo vlage, ki odgovarja $T=20^\circ\text{C}$ in relativni vlagi zraka, ki prekorači 65% le v nekaj tednih na leto ($v < 12\%$)

2. razred: določen je z vsebnostjo vlage, ki odgovarja $T=20^\circ\text{C}$ in relativni vlagi zraka, ki prekorači 85% le v nekaj tednih na leto ($v < 20\%$)

3. razred: je določen s klimatskimi pogoji, ki povzročajo vlažnost lesa večjo kot pri razredu 2 (pokrite konstrukcije le izjemoma v tem razredu)

Trajanje obtežbe-razredi trajanja obtežbe:

Razred trajanja obtežbe	Kumulativno trajanje karakteristične obtežbe	Primer obtežbe
Trajna	> 10 let	lastna teža
Dolgotrajna	6 mesecev do 10 let	koristna v skladiščih
Srednje dolga	1 teden do 6 mesecev	vsiljena obtežba
Kratkotrajna	< 1 teden	sneg*, veter
Trenutna		nezgodna obtežba

* pri močnejši obtežbi snega in daljšem času delovanja se smatra za srednje dolgo obtežbo

k_{mod} za masivni, vezani in lepljeni lamelirani les (po EN 1995-1-1)

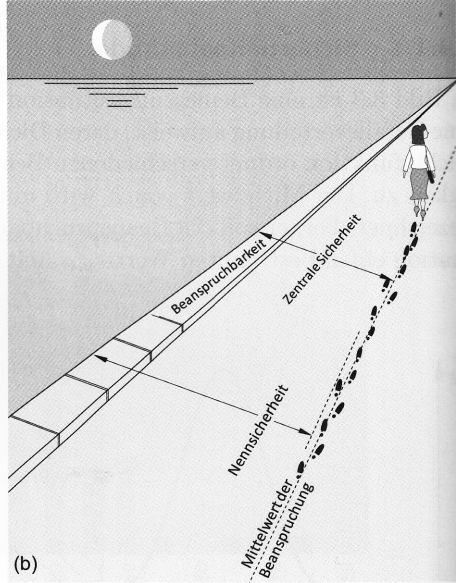
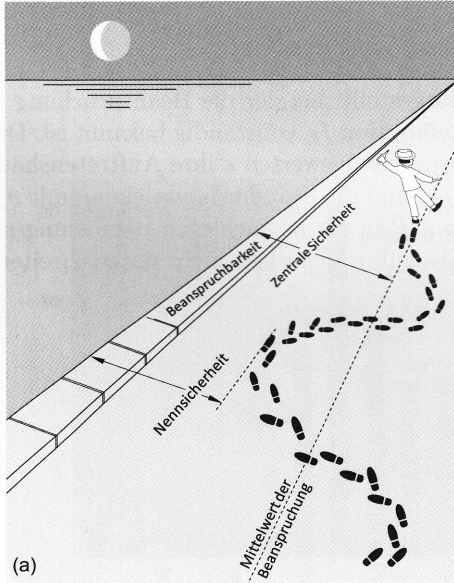
$$1,1 \geq k_{mod} \geq 0,50$$

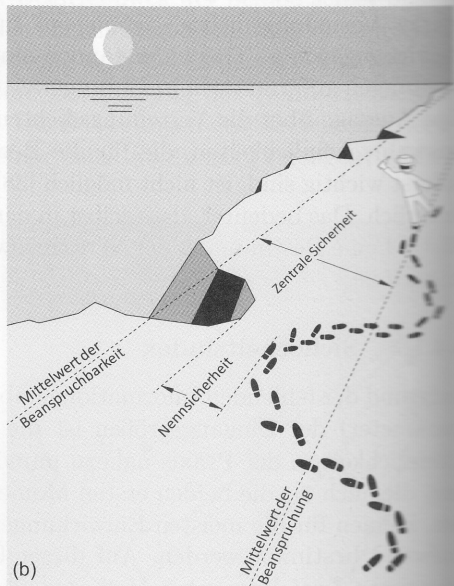
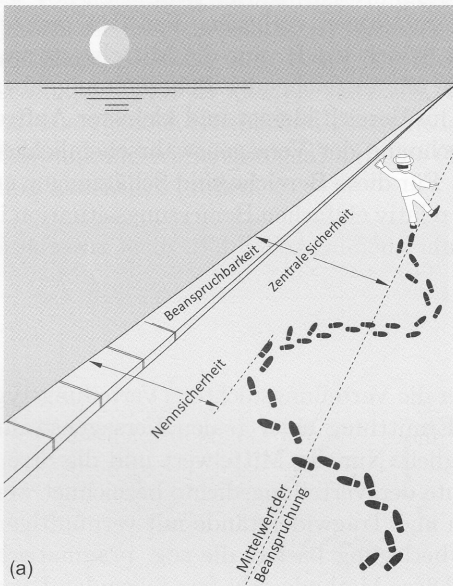
Razred trajanja obtežbe	Razred uporabe		
	1	2	3
Trajna	0,60	0,60	0,50
Dolgotrajna	0,70	0,70	0,55
Srednje dolga	0,80	0,80	0,65
Kratkotrajna	0,90	0,90	0,70
Trenutna	1,10	1,10	0,90

Če so v obravnavano obtežno kombinacijo vključene obtežbe iz **različnih razredov trajanja** obtežbe se vzame k_{mod} , ki pripada obtežbi **z najkrajšim trajanjem** (pozor - primer, ko bi bila le stalna obtežba in je k_{mod} manjši kot pri kombinaciji dveh obtežb).

KONCEPT VARNOSTI KONSTRUKCIJ

Glej zapiske s predavanj!





MEHANSKE IN REOLOŠKE LASTNOSTI BETONA, MEHKE IN PREDNAPETE ARMATURE

Mehanske in reološke lastnosti betona

Beton - časovno spremenljiv kompozitni material, ki sestoji iz:

- zrn kamenega agregata,
- cementnega kamna,
- nehidratiziranega cementa,
- por in
- kemijsko nevezane vode.

Fizikalne lastnosti betona so v odločilni meri odvisne od **mikrozgradbe hidratiziranega cementnega kamna**.

Zaradi dolgotrajnega procesa hidratacije **se s staranjem (pri zmernih obremenitvah) povečujeta trdnost in elastični modul betona**.

Pri **projektiranju betonskih konstrukcij** moramo poznati številne parametre, ki opisujejo mehansko in reološko obnašanja betona.

Mehanske lastnosti opišemo z:

- vrednostmi različnih **trdnosti betona**,
- vrednostmi **deformacijskih parametrov**,
- pogosto pa moramo poznati celotne **konstitutivne zakone** (delovne diagrame).

Med **reološke pojave betona** sodita:

- **krčenje oziroma nabrekanje**, ki je napetostno neodvisen časovni pojav in
- **lezenje**, ki je napetostno odvisen časovni pojav.

Običajno so v sodobnih standardih specifične deformacije zaradi posameznega reološkega pojava podane v obliki produkta ustrezne nazivne končne vrednosti deformacij in funkcije, ki opisuje njihov časovni razvoj.

V standardu SIST EN 1992-1-1 je privzeto, **da uporabljeni betoni** glede svojih lastnosti in proizvodnje **ustrezajo zahtevam standarda SIST EN 206-1**.

Tlačna trdnost in razvrščanje betona v trdnostne razrede

Razvrščanje betona v trdnostne razrede v EC2 temelji na tlačni trdnosti pri enoosnem standardnem preizkusu 28 dni starega betona.

Razvrščanje **v trdnostne razrede izvedemo glede na karakteristično tlačno trdnost betona f_{ck}** , ki je pri 5% fraktili (kvantili) določena **z uporabo statističnih metod na podlagi srednje oz. povprečne** vrednosti tlačne trdnosti betona f_{cm} .

Karakteristična trdnost betona f_{ck} je torej v primeru EC2 **tista vrednost za katero velja, da je verjetnost, da bo trdnost manjša od nje, 5 %**. Pri poznanih srednji vrednosti trdnosti f_{cm} in ustrezni standardni deviaciji trdnosti σ_f ter fraktili 5% velja naslednja splošna zveza poznana iz statistike:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,64 \cdot \sigma_f$$

v EC2 pa je upoštevana **poenostavitev** $f_{ck} = f_{cm} - \Delta f = f_{cm} - 8MPa \rightarrow \sigma_f = 4,9MPa$

Posebna statistična obravnava je potrebna takrat, kadar ocenjujemo lastnosti vgrajenega betona na podlagi meritev lastnosti betona **na omejenem številu preizkušancev** (imamo le oceno za srednjo vrednost trdnosti in oceno za standardno deviacijo trdnosti).

Trdnostni razred betona je označen s črko C in dvema vrednostma:

(npr. **C30/37**)

pri čemer

- prva vrednost (f_{ck}) pomeni **karakteristično trdnost betona določeno na valjih** s premerom 15 cm in višino 30 cm,
- druga vrednost ($f_{ck,cube}$) pa **na kockah** z robom 15 cm.

V SIST EN 1992-1-1 je definiranih **14 trdnostnih razredov betonov normalne teže**, ki jih uporabljamo za projektiranje betonskih konstrukcij.

- Betoni trdnostnih razredov do C50/60 sodijo med **betone običajne trdnosti**,
- betoni višjih trdnostnih razredov pa so t.i. **visokotrdni betoni** (v nekaterih računskih postopkih se pojavijo razlike glede meje).

V preglednici so v odvisnosti od trdnostnega razreda podani tudi ostali trdnostni in deformacijski parametri, ki jih potrebujemo pri projektiranju in jih bomo podrobneje obdelali v nadaljevanju. V preglednici 3.1. standarda SIST EN 1992-1-1, so podani tudi analitični izrazi za določitev posameznih parametrov na podlagi karakteristične trdnosti betona f_{ck} .

Trdnostne in deformacijske lastnosti betona normalne teže v odvisnosti od trdnostnega razreda

Lastnost	Trdnostni razredi betona													
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5
$f_{ctk, 0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} [‰]	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} [‰]	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ε_{c2} [‰]	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ε_{c3} [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Table 3.1 Strength and deformation characteristics for concrete

Strength classes for concrete															Analytical relation / Explanation
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5% fractile
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95% fractile
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	see Figure 3.2 $\varepsilon_{c1}(\rho/100) = 0,7 f_{cm}^{0,31} < 2,8$
ε_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	see Figure 3.2 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu1}(\rho/100) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
ε_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{c2}(\rho/100) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$
ε_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu2}(\rho/100) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
ε_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{c3}(\rho/100) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
ε_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu3}(\rho/100) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

Natezna trdnost betona

Natezna trdnost betona je v primerjavi z njegovo tlačno trdnostjo **razmeroma majhna** (velikostni red 10% tlačne trdnosti) in jo pri dokazu odpornosti v mejnih stanjih nosilnosti **(MSN) praviloma zanemarimo**.

Upoštevamo pa jo:

- v nekaterih dokazih mejnih stanj uporabnosti (npr. v računu širine razpok, ugotavljanje ali so prerezi razpokani ali ne za odločitev o uporabi ustreznih metod računa pomikov in napetosti),
- pri določitvi sidrnih dolžin in dolžin preklapljanja armature,
- pri določitvi minimalne potrebne armature in
- pri določitvi dolžine vnosa kabelske sile pri predhodno napetih elementih.

Natezna trdnost kaže tudi **precej večji raztros vrednosti kot tlačna trdnost betona**, pri tem pa pomembno vlogo igrajo oblika in tekstura zrn agregata še zlasti pa zunanji pogoji okolja v katerem se beton nahaja.

EC2 definira osnovno natezno trdnost betona

- kot največjo napetost doseženo pri **centričnem nateznem obremenjevanju** (za srednjo vrednost f_{ctm} ter spodnjo in zgornjo karakteristično vrednost $f_{ctk,0.05}$ in $f_{ctk,0.95}$), omenja pa še
- **cepilno natezno trdnost** $f_{ct,sp}$ (kadar določamo cepilno natezno trdnost lahko izračunamo pripadajočo osnovno vrednost z zvezo $f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp}$) in



- **upogibno natezno trdnost** $f_{ct,fl}$ (v določenih primerih jo lahko upoštevamo v računih; določimo jo po izrazu:

$$f_{ct,fl} = \max \{ (1,6 - h / 1000) f_{ct}; f_{ct} \}$$

h višina elementa v mm.

Projektne tlačne in natezne trdnosti betona

Z upoštevanjem korekcijskih koeficientov iz EC2 (gre za faktorja pretvorbe η) α_{cc} oziroma α_{ct} (priporočeni vrednosti sta sicer med 0,8 in 1,0) načelno zajamemo:

- vpliv dolgotrajnih učinkov obtežbe in
- neugodnih učinkov načina nanosa obtežbe na tlačno oziroma natezno trdnost.

Projektna tlačna trdnost betona:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C \quad \text{pri stavbah} \rightarrow \boxed{f_{cd} = f_{ck} / \gamma_C}; \quad \text{pri mostovih} \rightarrow \boxed{f_{cd} = 0,85 f_{ck} / \gamma_C}$$

Projektna natezna trdnost betona:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk,0,05} / \gamma_C \quad \text{pri stavbah in mostovih} \rightarrow \boxed{f_{ctd} = f_{ctk,0,05} / \gamma_C}$$

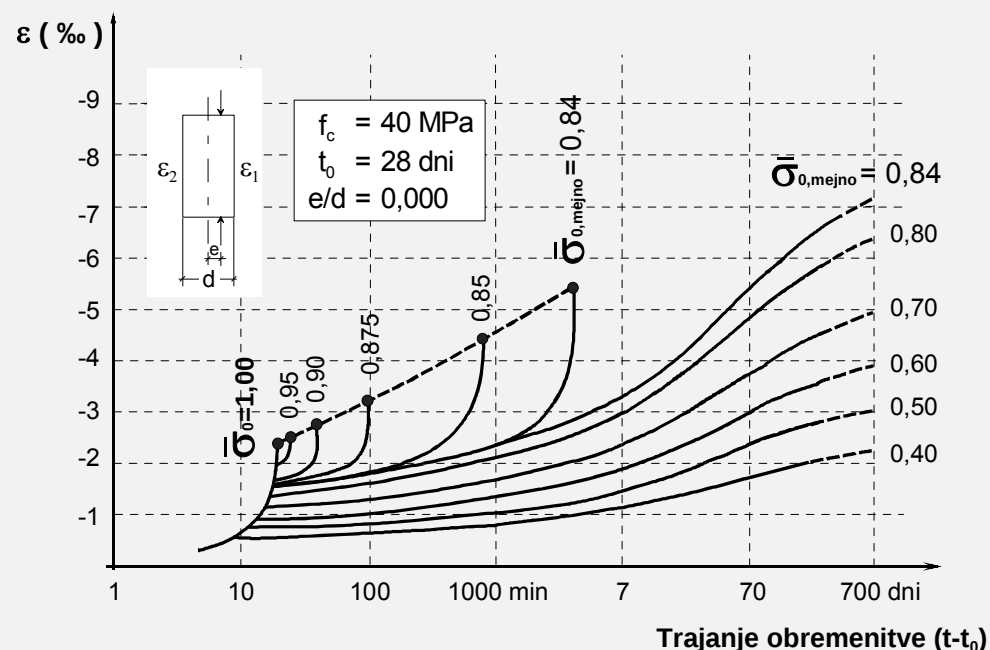
V primeru mostov lahko **manjšo vrednost** koeficienta α_{cc} pripišemo **visokim napetostim oziroma visokim nivojem napetosti** (mlad beton in običajno še intenzivno spreminjanje statičnih sistemov) v času gradnje, v času normalne uporabe pa razmeroma **visokemu deležu stalne obtežbe v celotni obtežbi**.

Pri napetostih do približno 40% kratkotrajne tlačne trdnosti betona prihaja le do omejenega **formiranja in širjenja mikrorazpok v stičnem območju oziroma v cementnem kamnu**.

Pri napetostih do približno 40% kratkotrajne tlačne trdnosti betona prihaja le do omejenega **formiranja in širjenja mikrorazpok v stičnem območju oziroma v cementnem kamnu**.

Z **večanjem nivoja** napetosti postaja **vpliv širjenja in formiranja mikrozpok**, najprej v stičnem območju pozneje pa še v cementnem kamnu, **vse večji**.

Tako se **pri napetostih med 75 in 85% kratkotrajne tlačne** trdnosti lahko zgodi, da količina sproščene deformacijske energije že **zadošča za spontano rast razpok**. Ko z napetostmi presežemo to mejo pride do **časovno odvisne porušitve** pri napetostih **manjših od kratkotrajne trdnosti**.



Primeri časovnih potekov povprečnih izmerjenih deformacij ε centrično obremenjenih vzorcev ($e/d=0$) trdnosti 40 MPa v času obremenjevanja ($t_0=28$ dni), za **različne nivoje napetosti**

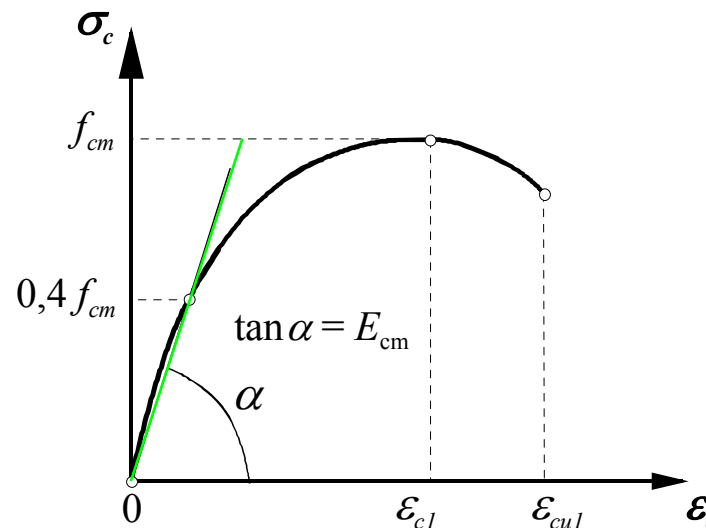
Parametri elastične deformabilnosti betona

Pri **linearni elastični analizi** odziva betonskih konstrukcij, je celotna deformabilnost opisana z **modulom elastičnosti**. V ojačenih betonskih konstrukcijah je **prevladujoč material beton**

- upoštevamo srednjo vrednost **sekantnega modula elastičnosti betona** E_{cm} , ki pripada napetostma 0 in $0,4 f_{cm}$.

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3}$$

Pri čemer je f_{ck} v MPa,
 E_{cm} pa v GPa.



Osnovne vrednosti sekantnega modula elastičnosti določenega po gornjem izrazu veljajo za beton iz **kremenčevega agregata**. V primeru agregata **iz apnenca oziroma peščenjaka** je treba dobljeno vrednost zmanjšati za 10 % oziroma 30 %, v primeru **bazalnega agregata** pa povečati za 20 %.

Za **Poissonov količnik** se lahko upošteva 0,2 za nerazpokan beton, za razpokan beton pa 0.

Za **linearni temperaturni razteznostni koeficient** se lahko upošteva vrednost $\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Časovni razvoj lastnosti betona

Upoštevamo ga kadar postopek gradnje zahteva:

- pri projektiranju **določitev lastnosti betona v času posameznih faz** gradnje (vnos prednapetja, razopaženje) ali
- želimo ugotoviti, **kdaj lahko opravimo kakšno** od predvidenih faz

Srednja vrednost tlačne trdnosti » t « dni starega betona $f_{cm}(t)$ je določena z izrazom:

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

f_{cm} srednja vrednost tlačne trdnosti 28 dni starega standardno negovanega betona,

$\beta_{cc}(t)$ funkcija, s katero je definirano časovno naraščanje tlačne trdnost betona,

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

t starost betona v dnevih,

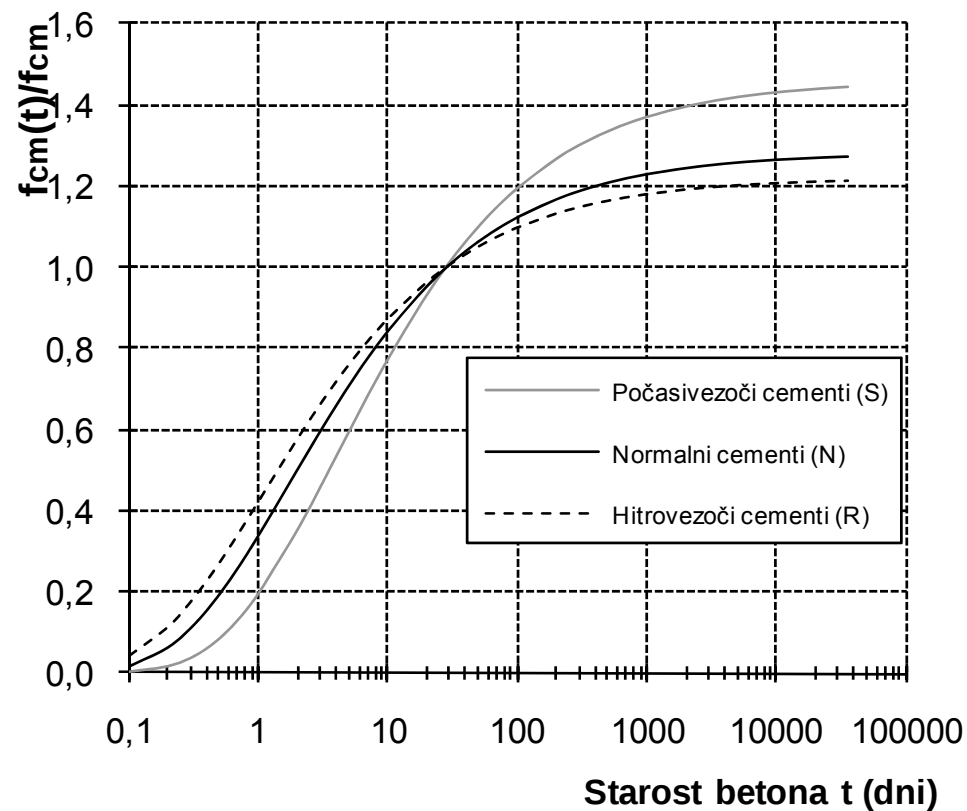
s pa koeficient, ki je odvisen od vrste cementa in znaša:

$s = 0,25$ pri normalnih in hitrovezočih cementih (razred N),

$s = 0,38$ za počasivezoče cemente (razred S) in

$s = 0,20$ za hitrovezoče cemente visokih trdnosti (razred R).

Časovni razvoj povprečne tlačne trdnosti betona



Karakteristična tlačna trdnost betona » t « dni starega betona:

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa} \quad \text{za } 3 < t < 28 \text{ dni,}$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck}(28 \text{ dni}) = f_{ck} \quad \text{za } t \geq 28 \text{ dni.}$$

Srednja vrednost natezne trdnosti » t « dni starega betona $f_{ctm}(t)$:

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^{\alpha} f_{ctm}, \quad (1)$$

f_{ctm} srednja vrednost nazivne natezne trdnosti 28 dni starega standardno negovanega betona v 100 % vlagi okolja s temperaturo $T = 20^{\circ}\text{C}$,

eksponent α :

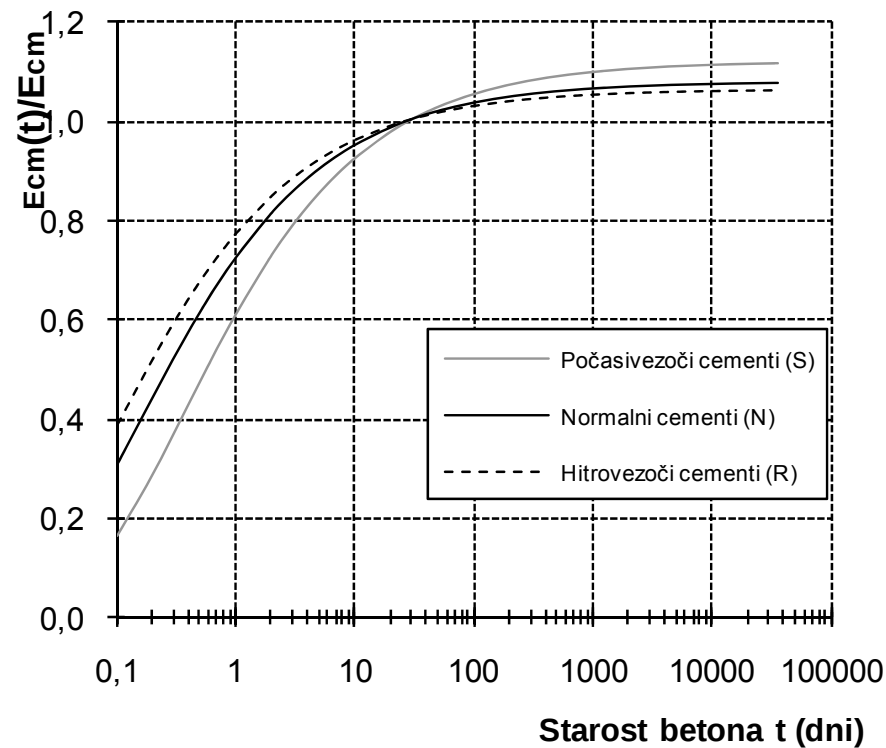
za $t < 28$ dni znaša $\alpha = 1$, za $t \geq 28$ dni pa $\alpha = 2/3$.

Srednja vrednost sekantnega modula elastičnosti $E_{cm}(t)$ »t« dni starega betona:

$$E_{cm}(t) = \left(f_{cm}(t) / f_{cm} \right)^{0,3} E_{cm} = \beta_{cc}(t)^{0,3} E_{cm},$$

f_{cm} in E_{cm} tlačna trdnost in elastični modul 28 dni starega betona,

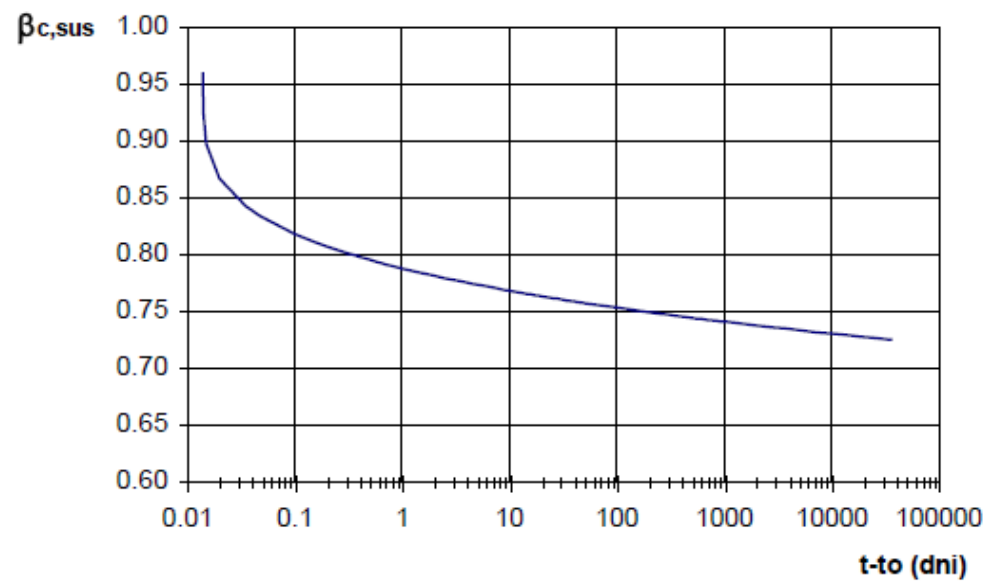
t starost betona v dnevih, $\beta_{cc}(t)$ pa funkcija določena pri spreminjanju tl. trdnosti.

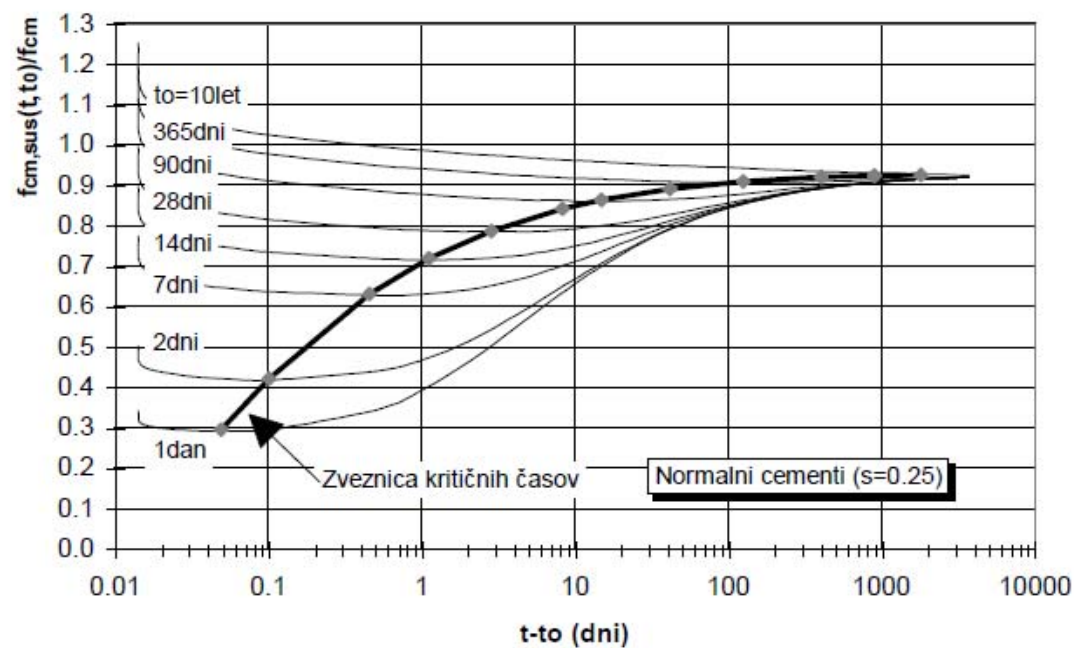


Upoštevanje trajnih visokih nivojev napetosti v CEB FIP MC 1990:

$$f_{cm,sus}(t, t_0) = \beta_{c,sus}(t - t_0) \cdot f_{cm}(t)$$

$$\beta_{c,sus}(t - t_0) = 0,96 - 0,12 \sqrt[4]{\ln [72(t - t_0)]}.$$

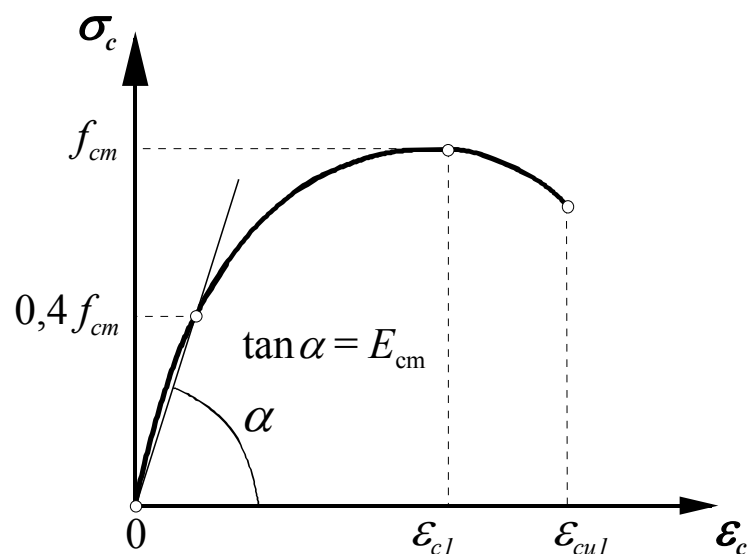




Normirana trdnost betona v odvisnosti od trajanja obremenitve $t-t_0$ in starosti ob obremenitvi t_0 po modelu predpisov CEB-FIP MC 1990

Konstitutivni zakon (delovni diagram) betona

Konstitutivni zakon betona za nelinearno analizo betonskih konstrukcij v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1:



$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$

Pri tem so $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$,

ε_{c1} je deformacija pri največji tlačni napetosti v skladu s preglednico 3.1 standarda

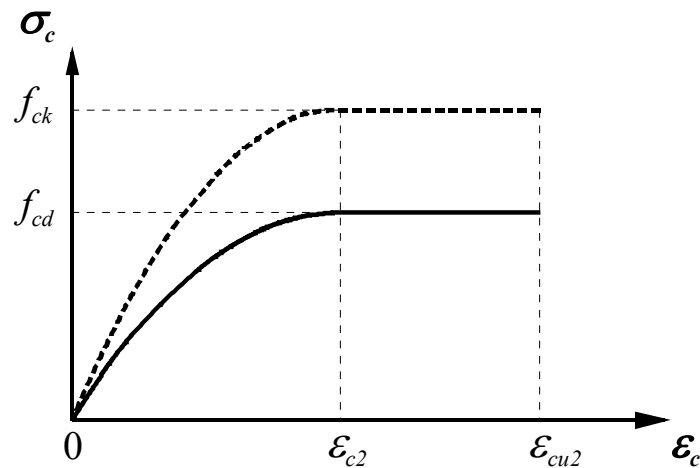
$k = 1,05 E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$,

f_{cm} pa je srednja tlačna trdnost betona.

Trdnostne in deformacijske lastnosti betona normalne teže v odvisnosti od trdnostnega razreda

Lastnost	Trdnostni razredi betona													
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5
$f_{ctk, 0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} [‰]	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} [‰]	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ε_{c2} [‰]	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ε_{c3} [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Osnovni **konstitutivni zakon betona za račun odpornosti** oziroma za dimensioniranje betonskih konstrukcij- parabola in premica:



$$0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}: \quad \sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

$$\epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu2}: \quad \sigma_c = f_{cd}$$

Pri tem so:

eksponent n ,

deformacija pri doseženi največji napetosti betona ϵ_{c2} in

mejna deformacija betona ϵ_{cu2} **parametri, ki so podani v preglednici 1,**

$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_C$ - projektna tlačna trdnost betona (pri stavbah)

Trdnostne in deformacijske lastnosti betona normalne teže v odvisnosti od trdnostnega razreda

Lastnost	Trdnostni razredi betona													
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5
$f_{ctk, 0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} [‰]	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} [‰]	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ε_{c2} [‰]	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ε_{c3} [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Po standardu SIST EN 1992-1-1 je pri računu mejne nosilnosti armiranobetonskih prerezov dovoljeno upoštevati tudi

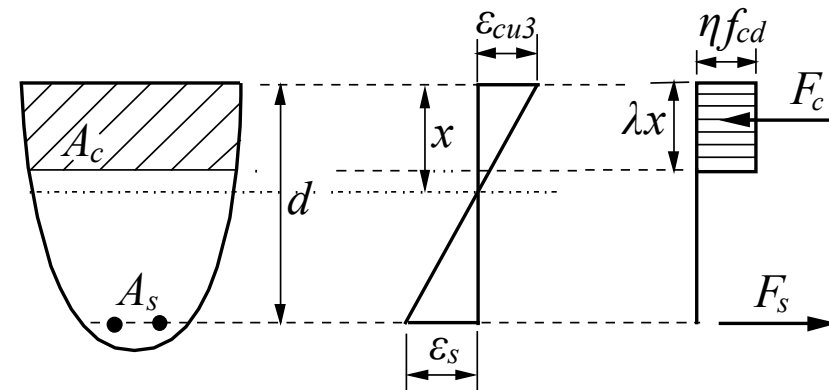
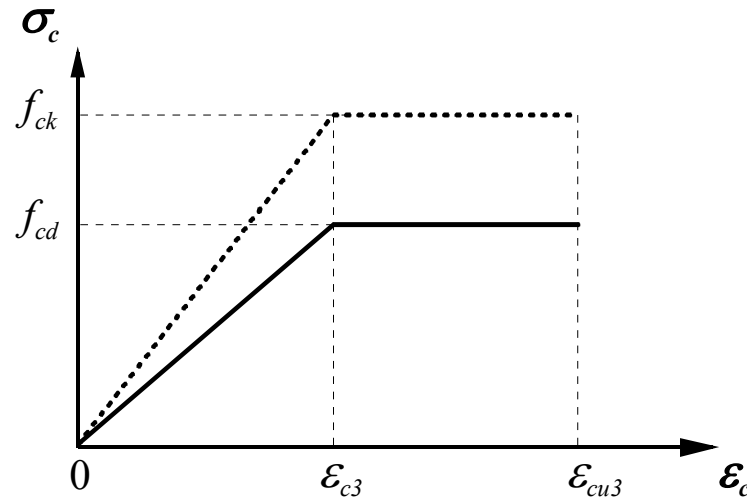
- **bilinearni delovni diagram** betona
- za področje velike ekscentričnosti osne sile, ko je nevtralna os deformacij znotraj prereza ($x < d$), pa tudi **reducirano konstantno napetost** $\eta \cdot f_{cd}$ na reducirani višini tlačne cone $\lambda \cdot x$.

Pri tem so vrednosti parametrov naslednje:

$$\lambda = 0,8 \quad \text{in} \quad \eta = 1,0$$

$$\text{za } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa,}$$

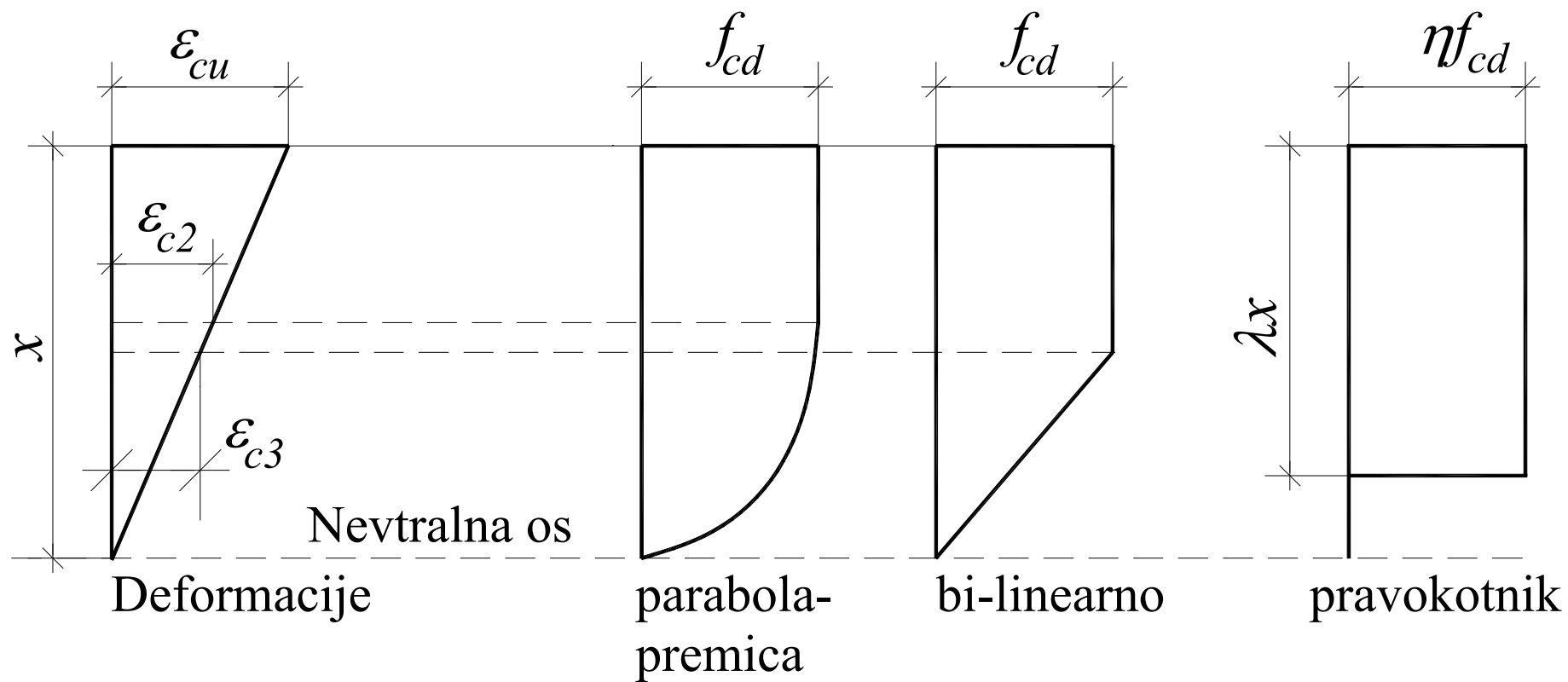
$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \quad \text{in} \quad \eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200 \quad \text{za } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$$



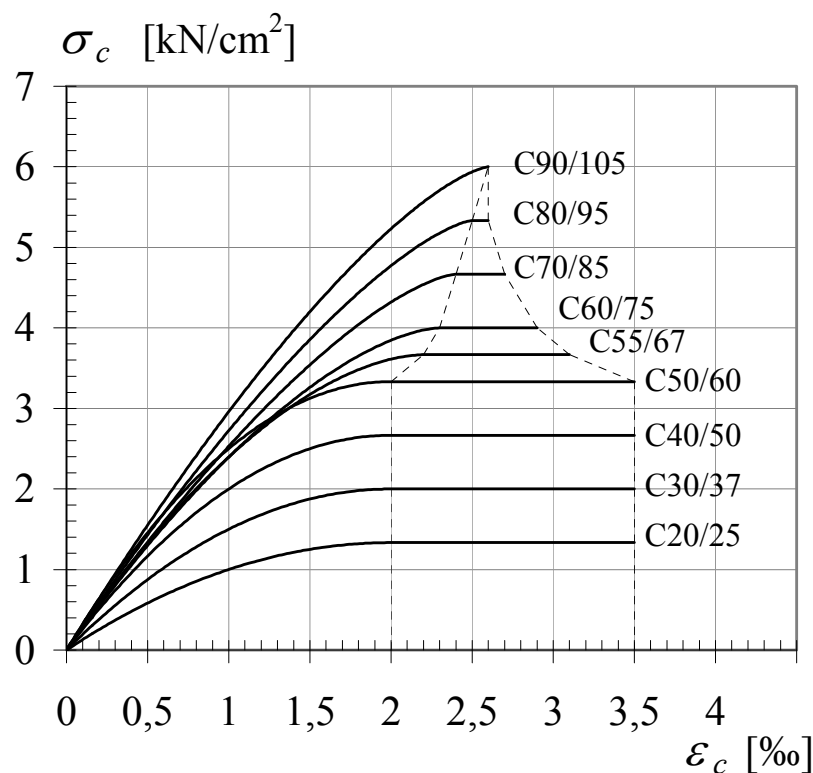
Trdnostne in deformacijske lastnosti betona normalne teže v odvisnosti od trdnostnega razreda

Lastnost	Trdnostni razredi betona													
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5
$f_{ctk, 0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} [‰]	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} [‰]	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ε_{c2} [‰]	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ε_{c3} [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

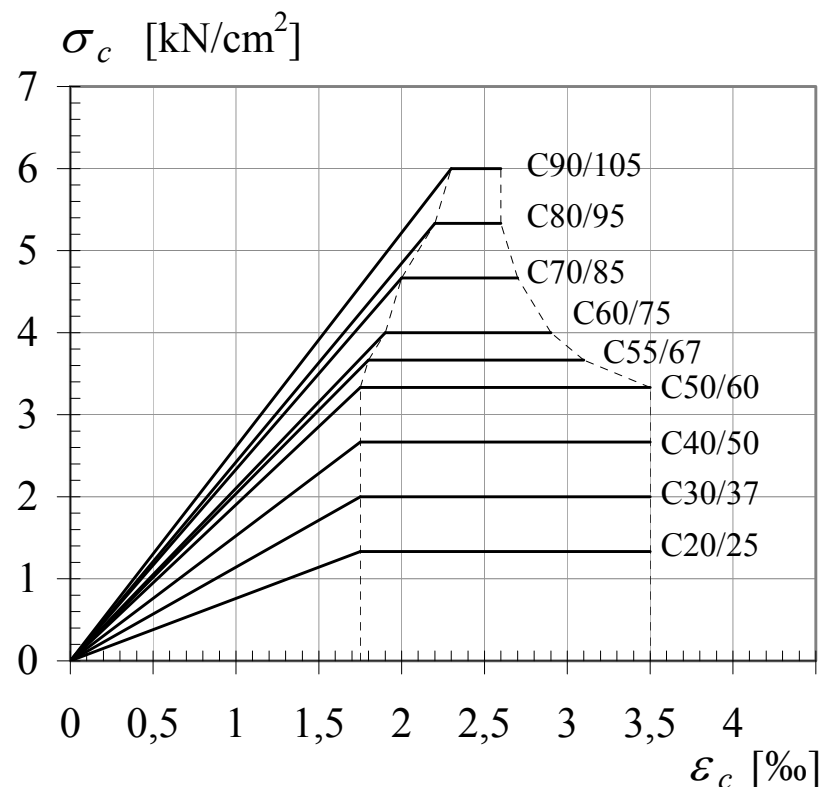
Primerjava različnih delovnih diagramov za dimenzioniranje:



Za razliko od **betonov običajnih trdnosti**, kjer so parametri konstitutivnih zakonov **enaki** za vse trdnostne razrede betona, moramo **pri betonih višjih trdnostnih razredov ($\geq C55/67$)** za vsak trdnostni razred upoštevati specifične parametre pri konstitutivnih zakonih za nelinearno analizo in dimenzioniranje konstrukcij.



Osnovni konstitutivni zakoni

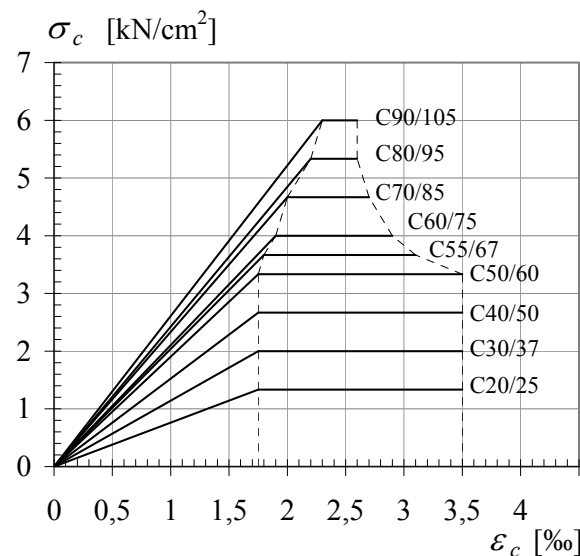
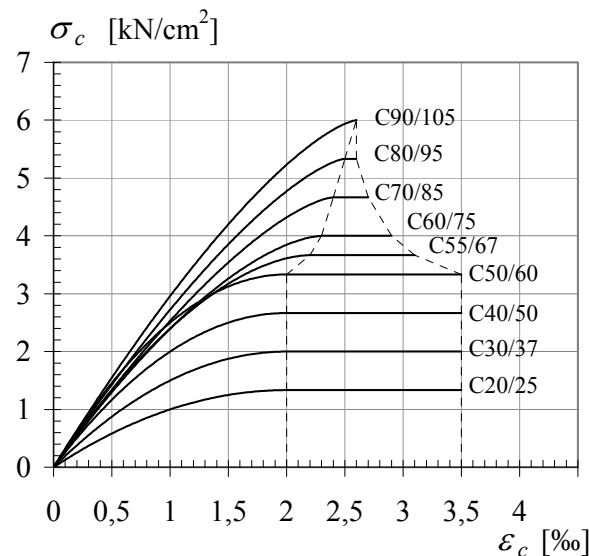


Poenostavljeni bilinearni konstitutivni zakoni

Konstitutivni zakoni betona za dimenzioniranje (pri vrednostih $\gamma_C = 1,5$ in $\alpha_{cc} = 1$)

Previdnost je potrebna predvsem pri uporabi **obstojećih pripomočkov za dimenzioniranje**, ki temeljijo na konstitutivnem zakonu s kvadratno parabolo in premico in so potrebni koeficienti normirani glede na projektno tlačno trdnost f_{cd} .

Pri izdelavi teh pripomočkov so bile upoštevane meje območij $\varepsilon_{c2} = 2,0\text{‰}$ in $\varepsilon_{cu2} = 3,5\text{‰}$. **Ti pripomočki so še vedno uporabni za betone običajne trdnosti**, pri katerih so tudi v standardu SIST EN 1992-1-1 meje območij kvadratne parabole in premice ostale enake. Uporaba teh pripomočkov tudi pri betonih visoke trdnosti pa je **neprimerna in na nevarni strani** ter ne nudi pravega vpogleda v deformacijsko stanje prereza.



Trdnostne in deformacijske lastnosti betona normalne teže v odvisnosti od trdnostnega razreda

Lastnost	Trdnostni razredi betona													
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5
$f_{ctk, 0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} [‰]	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} [‰]	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ε_{c2} [‰]	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ε_{c3} [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Konstitutivni zakon objetega betona

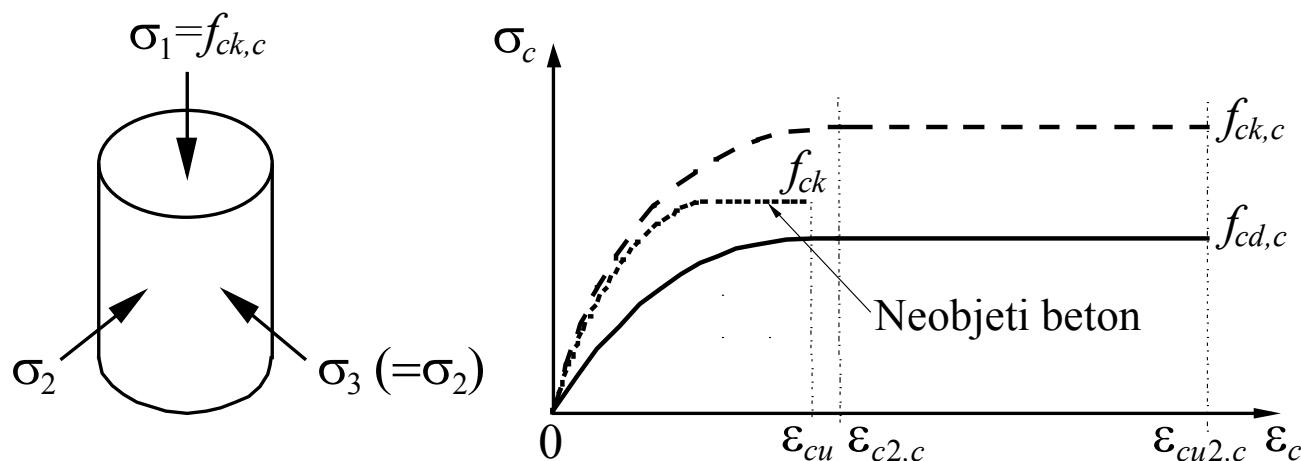
SIST EN 1992-1-1 omogoča tudi upoštevanje **ugodnega vpliva večosnega napetostnega stanja** v primeru **objetega betona**.

Povečana karakteristična tlačna trdnost in povečani karakteristični deformaciji objetega betona:

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,000 + 5,0\sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{za } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck}, \quad \varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} (f_{ck,c} / f_{ck})^2,$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,125 + 2,50\sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{za } \sigma_2 > 0,05 f_{ck}, \quad \varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2\sigma_2 / f_{ck}.$$

Pri tem je $\sigma_2 = \sigma_3$ učinkovita bočna tlačna napetost v mejnem stanju nosilnosti zaradi objetja betona

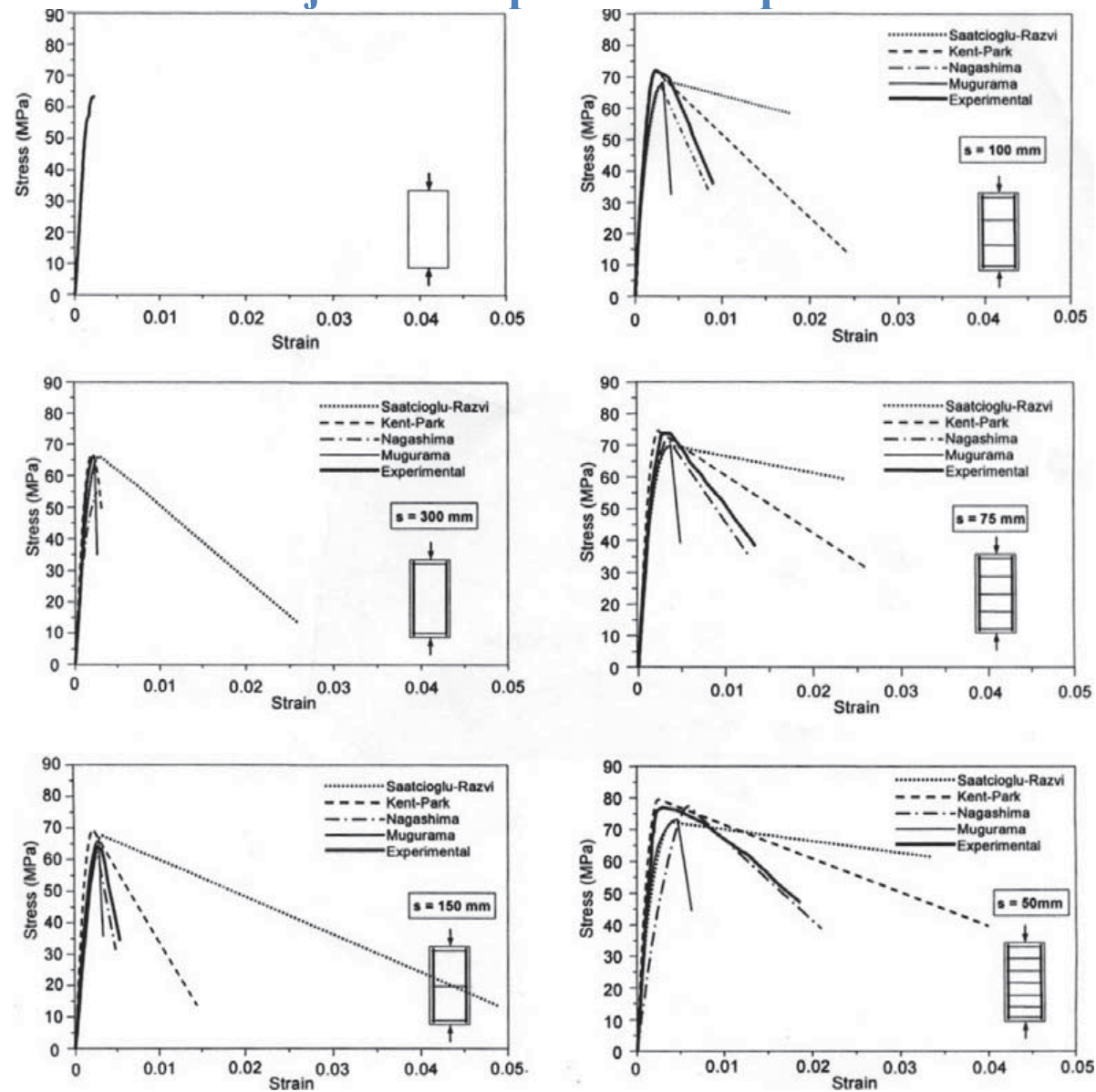


Objetje betona je mogoče doseči z ustrezno **zaprtimi stremeni ali s prečnimi vezmi**, v katerih je zaradi prečnega raztezanja betona dosežena meja plastičnosti.

- pomembno zlasti za zagotavljanje večje **duktilnosti** (potresno varno projektiranje), in **večje lokalne nosilnosti** (močno obremenjene kontaktne ploskve)
- praviloma tega učinka **računsko ne upoštevamo pri običajnem** upogibnem in strižnem dimenzioniranju.



Vpliv gostote stremen na obnašanje betona pri tlačnem preizkusu:



Lezenje betona

Lezenje betona je v največji meri odvisno od:

- starosti betona ob nanosu obtežbe,
- od vlage in temperature okolja,
- od konsistence in **trdnostnega razreda betona**,
- od dimenzij betonskega prereza,
- od deleža cementnega kamna v betonu,
- od trajanja obtežbe in
- od velikosti napetosti.

Linearna teorija lezenja: delujoča napetost betona v trenutku nanosa obremenitve t_0 je manjša od $0,45 f_{ck}(t_0)$, **vpliv ravni napetosti na količnik lezenja $\varphi(t, t_0)$ lahko zanemarimo.**

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \sigma_c / E_c.$$

Količnik lezenja $\varphi(t, t_0)$ je normiran glede na tangentni modul elastičnosti betona E_c pri starosti $t = 28$ dni, ki ga lahko določimo na podlagi ustreznega sekantnega modula E_{cm} :

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}.$$

Visok nivo napetosti: $\sigma_c > 0,45 f_{ck}(t_0)$,

→ vpliv napetosti na količnik lezenja betona $\varphi_{nl}(\infty, t_0)$ je tolikšen, da ga moramo upoštevati v računu:

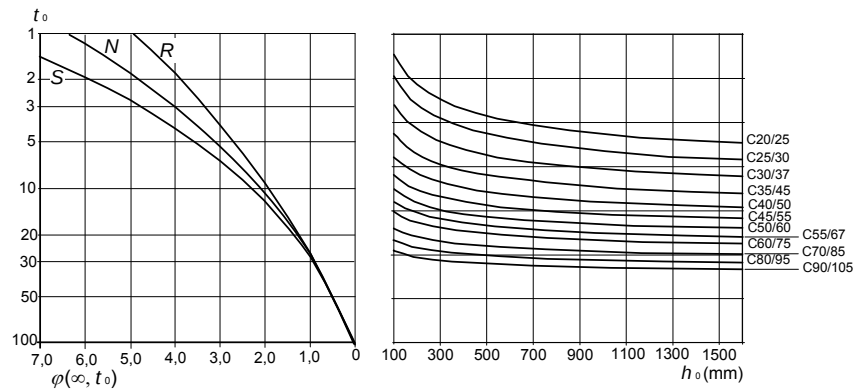
$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi_{nl}(\infty, t_0) \cdot (\sigma_c / E_c),$$

$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \exp(1,5(k_\sigma - 0,45)); \quad k_\sigma = \sigma_c / f_{ck}(t_0)$$

V mejnem stanju uporabnosti (MSU) konstrukcij je trajna **napetost betona praviloma manjša od 45 % njegove trdnosti**, tako da običajno zadošča upoštevanje linearne teorije lezenja betona. V **primeru večjih napetosti**, ki se lahko pojavijo ob prednapenjanju ali pri nelinearni analizi konstrukcije do porušitve, pa **je potrebno upoštevati nelinearno teorijo lezenja betona**.

Hitra ocena končne vrednosti količnika linearnega lezenja betona $\varphi(\infty, t_0)$:

RH = 50 % – konstrukcije v zaprtih prostorih



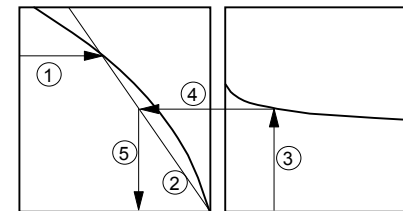
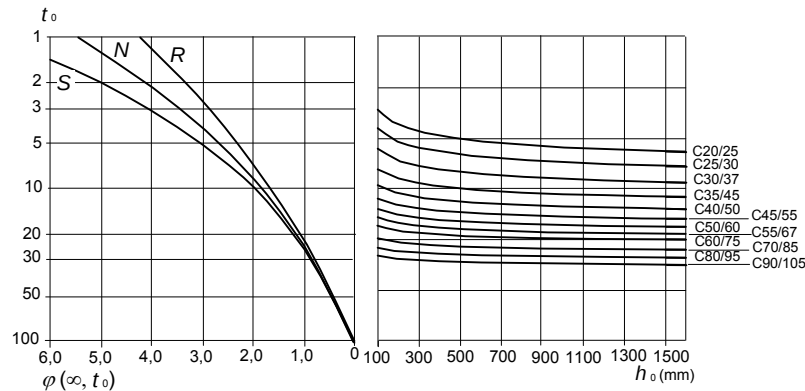
Legenda:

R – uporaba
hitrovezočega cementa

N – uporaba normalno
vezočega cementa

S – uporaba
počasivezočega cementa

RH = 80 % – konstrukcije zunaj



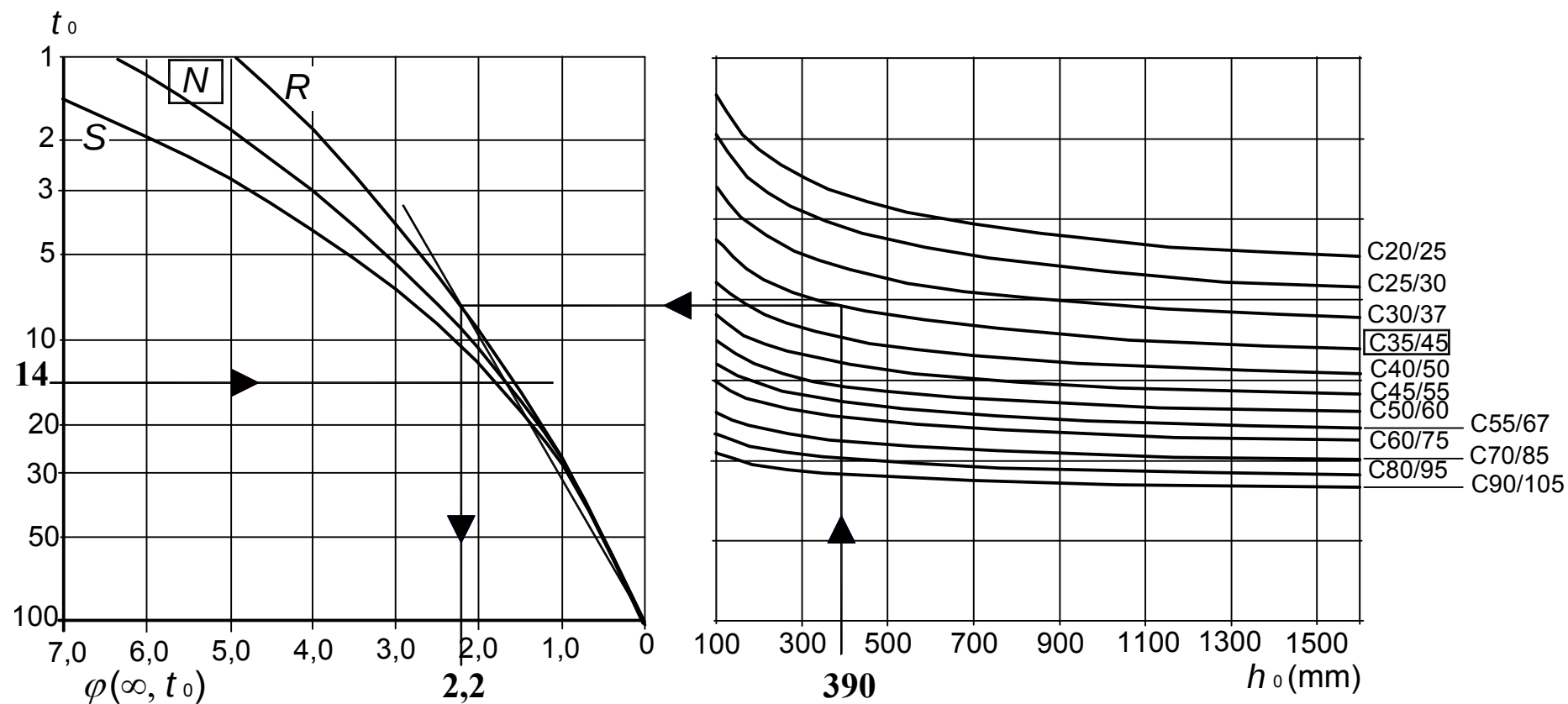
OPOMBA:

- presečišče med črtama 4 in 5 je lahko tudi nad točko 1,
- za $t_0 > 100$ je dovolj natančno, če se privzame, da je $t_0 = 100$ in se uporabi tangenta.

Primer določanja količnika lezenja - glej priročnik IZS str. 2-139

Za parametre: $t_0 = 14$ dni, beton C35/45, $RH = 50\%$, $h_0 = 390$ mm, cement N

odčitamo $\varphi(\infty, t_0) = \varphi(\infty, 14 \text{ dni}) = 2,2$



Enačbe za natančnejši račun količnika lezenja betona pa so podane v Dodatku B standarda SIST EN 1992-1-1, in sicer v točki B1.

Krčenje betona

Deformacija krčenja betona je **odvisna od istih parametrov kot lezenje betona z izjemo napetosti**, ki na krčenje betona ne vpliva.

Celotno krčenje betona ε_{cs} je v globalu sestavljeno iz:

- **krčenja zaradi sušenja** ε_{cd} in iz
- **avtogenega krčenja** ε_{ca} , ki se razvije v prvih urah oziroma dnevih po začetku vezanja cementa

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

Časovni razvoj deformacije **krčenja betona zaradi sušenja**:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0},$$

časovni razvoj deformacije zaradi **avtogenega krčenja betona**:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty).$$

Pri tem so: $\varepsilon_{cd,0}$ - nazivna (končna) vrednost krčenja betona zaradi sušenja
 t - čas v dnevih

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{(t - t_s) - 0,04 \sqrt{h_0^3}} \quad \begin{array}{l} \text{funkcija časovnega} \\ \text{– razvoja krčenja} \\ \text{zaradi sušenja} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Koeficient nazivne} \\ \text{velikosti} \\ \text{prereza} \end{array}$$

k_h – koeficient nazivne velikosti prereza
 $h_0 = 2A_c/u$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) \quad \begin{array}{l} \text{funkcija časovnega} \\ \text{– razvoja avtogenega} \\ \text{krčenja} \end{array}$$

$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ – končna vrednost
 avt. krčenja betona

h_0 [mm]	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Za natančnejšo določitev deformacije krčenja betona so v Dodatku B standarda SIST EN 1992-1-1 podani ustrezni matematični izrazi.

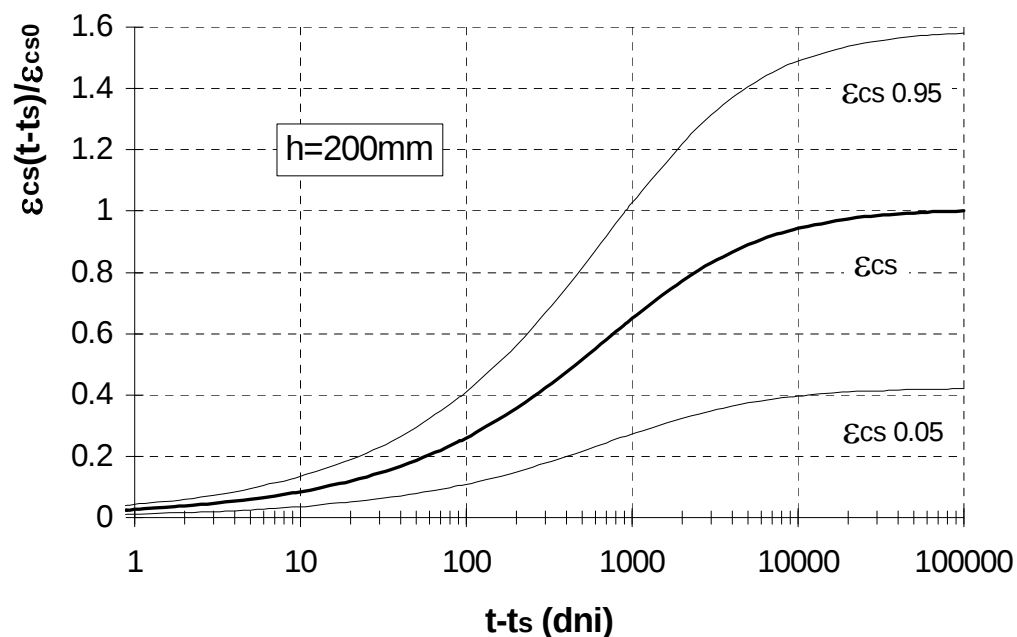
Nazivne vrednosti neoviranega krčenja betona iz cementa CEM

*Nazivne vrednosti neoviranega krčenja betona iz cementa CEM
razreda N zaradi sušenja $\varepsilon_{cd,0}$ (v ‰)*

$f_{ck}/f_{ck,cub}$ e (MPa)	Relativna vlažnost okolja [%]					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

Dodatek B se uporablja za račun deformacije krčenja in lezenja betona vključno z določanjem njihovega časovnega razvoja. **Eksperimentalno določene vrednosti** lahko kažejo okoli ustreznih vrednosti ocenjenih po tem dodatku **raztros do $\pm 30\%$** .

Kjer je zaradi velike občutljivosti konstrukcije na lezenje in krčenje **potrebna večja natančnost**, je potrebno **reološke vplive in njihov časovni razvoj določiti eksperimentalno**.

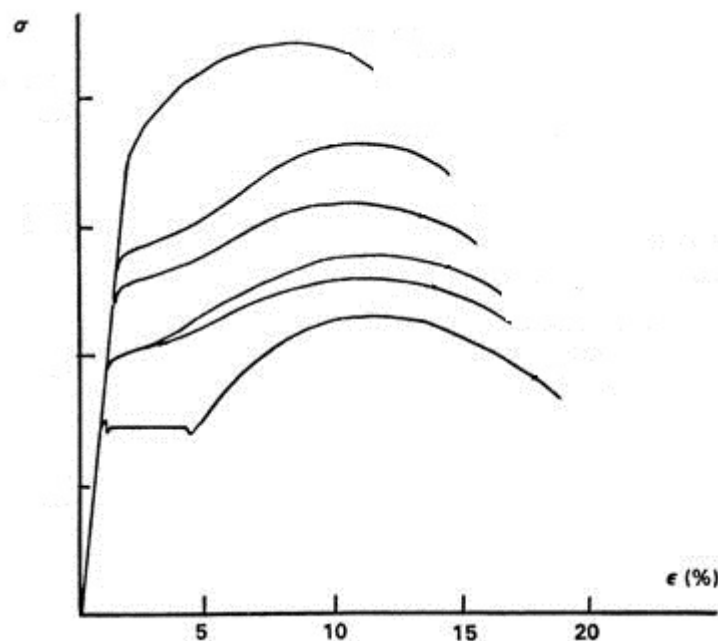


Meji območja s 5%-no verjetnostjo odstopanja deformacije krčenja

Mehanske in reološke lastnosti jekel za armiranje in prednapenjanje

Lastnosti jekla so odvisne zlasti od njegove **kemijske sestave in načina obdelave**.

Najpomembnejša nekovinska sestavina jekla, ki ima največji vpliv na lastnosti jekel, ki jih uporabljamo za ojačevanje betonskih konstrukcij **je ogljik (C)**. S povečevanjem vsebnosti ogljika načelno pridobivamo na trdnosti, hkrati pa se jeklu zmanjšujeta duktilnost in njegova varivost.



Nizka trdnost in velika duktilnost je značilna za jekla z vsebnostjo ogljika pod 0,2%, za jekla z vsebnostjo ogljika nad 0,8% pa je značilna izredno visoka trdnost in zelo omejena duktilnost. Pri jeklih za armiranje je vsebnost ogljika navzgor omejena na približno 0,25%, pri jeklih za prednapenjanje pa znaša vsebnost ogljika običajno med 0,6 in 0,9%.

Kot nečistoče v jeklu, ki so glede vsebnosti omejene s predpisanimi zgornjimi mejnimi vrednostmi, pa se pojavljajo žveplo (S), fosfor (P) in dušik (N).

Z **legirnimi dodatki lahko jeklu do določene mere priredimo lastnosti**. V splošnem se kot legirni elementi pri jeklih uporabljajo mangan (Mn), silicij (Si), krom (Cr), nikelj (Ni), molibden (Mo), baker (Cu), v manjših količinah pa tudi titan (Ti) in vanadij (V).

Običajno se za armiranje in prednapenjanje betonskih konstrukcij uporablja **nelegirana (ogljikova) ali nizko legirana jekla**.

Močnejše legirana jekla za armiranje konstrukcij in prednapenjanje so smiselna predvsem za zagotavljanje korozijske odpornosti v **najbolj agresivnem okolju**, kadar s cenejšimi ukrepi le-te ni mogoče doseči. V ta namen so primerna t.i. običajna avstenitna nerjavna jekla, ki vsebujejo preko 12% kroma in preko 7% niklja.

V osnovi protikorozijsko zaščito jekla zagotavlja že sama krovna plast betona, saj je beton močno alkalen material ($\text{pH} > 11$), ki na površini jeklene armature tvori **stabilen tanek pasivni zaščitni film** iz železovega oksida. Problem korozije se pojavi v povezavi s **karbonatizacijo** betona (reakcija med ogljikovim dioksidom iz zraka in kalcijevim hidroksidom, ki se nahaja v cementnem kamnu), pri kateri pade alkalnost betona in s tem njegova sposobnost zaščititi jeklo pred korozijo.

Jeklo za armiranje

V skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 je za armiranje konstrukcij predvidena le uporaba varivih jeklenih proizvodov, ki imajo **rebrasto ali nazobčano** površino.

Standard SIST EN 1992-1-1 se glede:

- značilnosti varivega armaturnega jekla,
- razvrščanja,
- metod preizkušanja lastnosti za potrjevanje skladnosti,
- označevanja in
- postopkov proizvodnje

opira na standard SIST EN 10080.

Ta standard sicer **govori tudi o gladkih armaturnih palicah**, ki pa jih po standardu SIST EN 1992-1-1 **ne uporabljamo** kot statično potrebno armaturo.

Za armiranje konstrukcij se lahko v skladu s SIST EN 1992-1-1 uporabi naslednje proizvode:

- **Armaturne palice**

Dobavijo se kot ravne palice, ki so povezane v snope.

Običajna dolžina palic je 12 m, po naročilu so dobavljive tudi večje dolžine.

V standardu EN 10080, so kot priporočeni podani naslednji nazivni premeri palic: **6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 28, 32**, 40 in 50 mm.

Palice s premerom večjim od 32 mm se obravnavajo kot palice velikih premerov so v določenih kontrolah podvržene dodatnim ali strožjim pogojem.



- **Armaturne palice in žice v kolutih**

Palice in žice končnih dolžin dobavljene v navitih kolutih, ki se pred uporabo odvijajo iz le-teh.

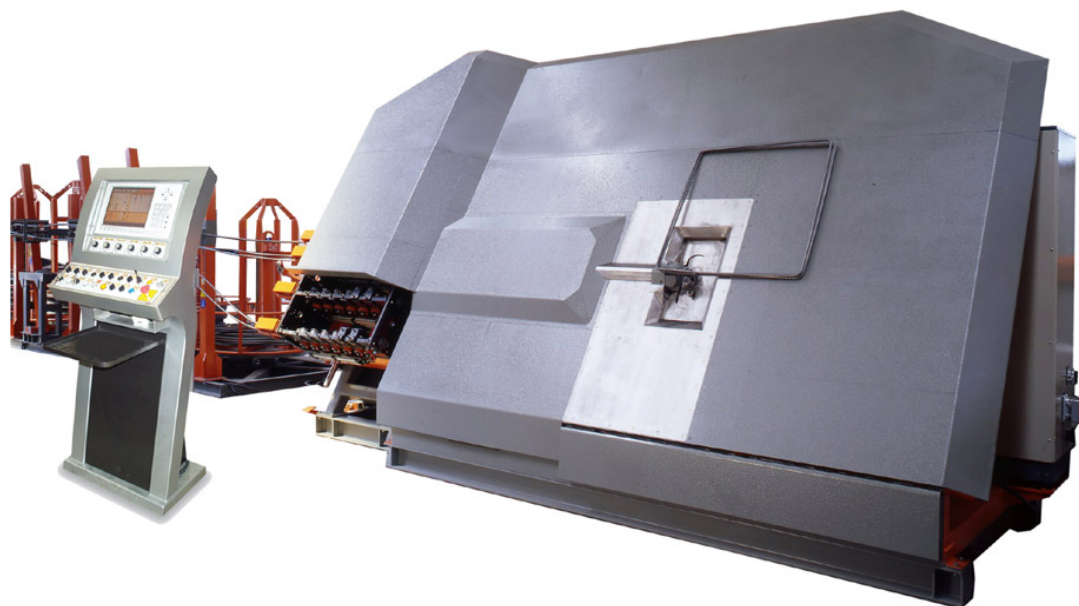
Primerne so zlasti za avtomatizirano proizvodnjo armature tipskih oblik (npr. stremena) manjših premerov.

V kolutih se po standardu SIST EN 10080 dobavljajo palice in žice s premerom od **4 do 16 mm**, pri tem je korak 0,5 mm pri premerih do 10 mm in 1 mm pri večjih premerih.





<http://www.youtube.com/watch?v=D4v-BHJN3PM> <http://www.youtube.com/watch?v=SJRsdPQmSn8&feature=related>



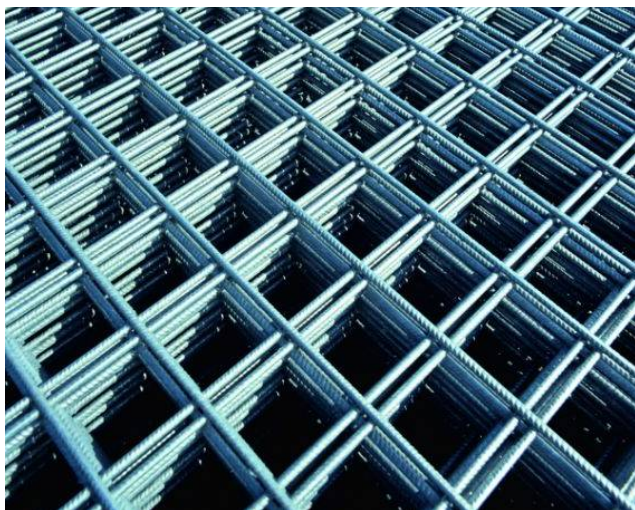
- **Varjene armaturne mreže**

Varjene mreže tvorita dve plasti med seboj pravokotnih rebrastih palic, ki so v vseh križanjih strojno zvarjene po elektro uporovnem postopku.

Mreže so lahko iz tipskega programa proizvajalcev, pri nekoliko višji ceni pa je možno dobiti tudi mreže po naročilu (npr. posebne mreže za armiranje sten v območju stika s stropovi).

Na tržišču obstajajo mreže, ki imajo večji prerez (na enoto dolžine) v eni smeri (R mreže) in mreže z enakim prerezom v obeh smereh (Q mreže)

Za izdelavo varjenih mrež se po standardu SIST EN 10080 uporabljajo palice s premerom od **5 do 16 mm**, pri tem je korak 0,5 mm pri premerih do 10 mm in 1 mm pri večjih premerih.





:TIPIZIRANE ARMATURNE MREŽE KOVINAR JESENICE (marec 2011)
Nosilne v eni smeri

Tip	Masa (kg)	Površina	Razmak palic		Premer palic		Dolžina L (mm)	Širina B (mm)
			P _L (mm)	P _C (mm)	d _L (mm)	d _C (mm)		
<i>R92</i>	<i>13,00</i>	<i>gladka</i>	<i>150</i>	<i>250</i>	<i>4,20</i>	<i>4,20</i>	<i>5000</i>	<i>2200</i>
<i>R 139</i>	<i>16,80</i>	<i>gladka</i>	<i>100</i>	<i>250</i>	<i>4,20</i>	<i>4,20</i>	<i>5000</i>	<i>2200</i>
R 131	22,00	rebrasta	150	250	5,00	5,00	6000	2200
R 189	28,10	rebrasta	150	250	6,00	5,00	6000	2200
R 196	28,50	rebrasta	100	250	5,00	5,00	6000	2200
R 283	37,40	rebrasta	100	250	6,00	5,00	6000	2200
R 335	43,70	rebrasta	150	250	8,00	5,00	6000	2200
R 385	48,00	rebrasta	100	250	7,00	5,00	6000	2200
R 424	56,60	rebrasta	150	250	9,00	6,00	6000	2200
R 503	60,30	rebrasta	100	250	8,00	5,00	6000	2200
R 524	67,30	rebrasta	150	250	10,00	6,00	6000	2200
R 636	77,60	rebrasta	100	250	9,00	6,00	6000	2200
R 785	97,40	rebrasta	100	250	10,00	7,00	6000	2200

TIPIZIRANE ARMATURNE MREŽE KOVINAR JESENICE (marec 2011)
Nosilne v dveh smereh

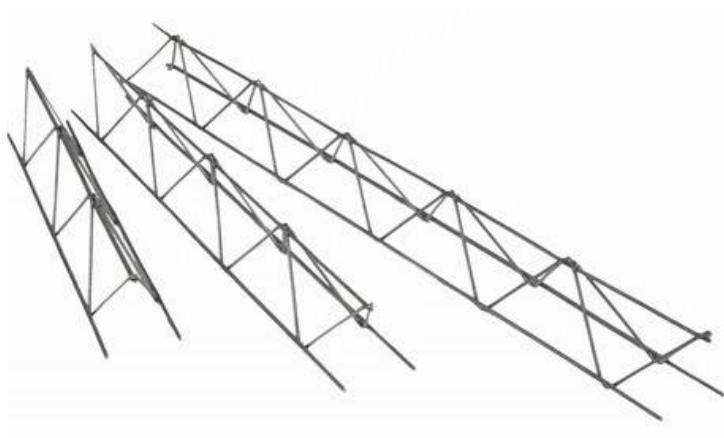
Tip	Masa (kg)	Površina	Razmak palic		Premer palic		Dolžina L (mm)	Širina B (mm)
			P _L (mm)	P _C (mm)	d _L (mm)	d _C (mm)		
<i>Q 139</i>	<i>24,00</i>	<i>gladka</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>4,20</i>	<i>4,20</i>	<i>5000</i>	<i>2200</i>
Q 131	27,40	rebrasta	150	150	5,00	5,00	6000	2200
Q 189	39,50	rebrasta	150	150	6,00	6,00	6000	2200
Q 196	40,70	rebrasta	100	100	5,00	5,00	6000	2200
Q 226	47,40	rebrasta	125	125	6,00	6,00	6000	2200
Q 257	53,80	rebrasta	150	150	7,00	7,00	6000	2200
Q 283	58,60	rebrasta	100	100	6,00	6,00	6000	2200
Q 308	64,50	rebrasta	125	125	7,00	7,00	6000	2200
Q 335	70,30	rebrasta	150	150	8,00	8,00	6000	2200
Q 385	79,70	rebrasta	100	100	7,00	7,00	6000	2200
Q 424	88,80	rebrasta	150	150	9,00	9,00	6000	2200
Q 503	104,30	rebrasta	100	100	8,00	8,00	6000	2200
Q 524	109,80	rebrasta	150	150	10,00	10,00	6000	2200
Q 636	131,70	rebrasta	100	100	9,00	9,00	6000	2200
Q 785	162,90	rebrasta	100	100	10,00	10,00	6000	2200

- **Varjene armaturne lestve in nosilci**

Dvo ali tri dimenzionalni sestavi iz zgornjega pasu (palice), enega ali več spodnjih pasov (palic) in kontinuirnih ali posamičnih diagonal.

Lestve in nosilci se uporabljajo za prečno armiranje elementov (prevzem prečne sile), podpiranje zgornje armature plošč ali za vzdrževanje razmaka med bočnima armaturama ob površinah stene.

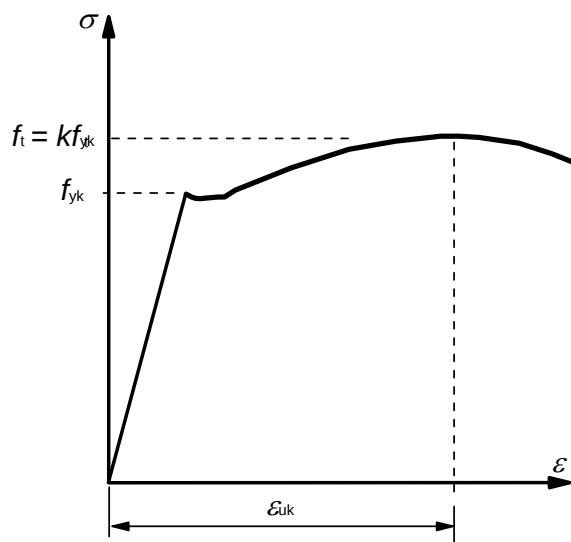
Za izdelavo teh elementov se po standardu SIST EN 10080 uporabljajo palice in žice s premerom od **4 do 16 mm**, pri tem je korak 0,5 mm pri premerih do 10 mm in 1 mm pri večjih premerih.



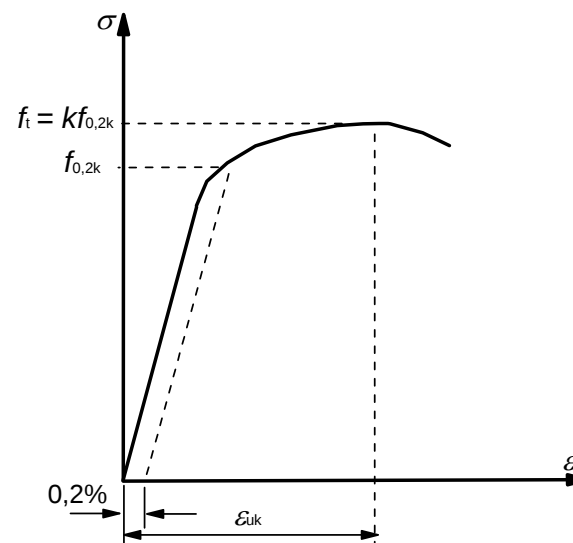
Trdnost in delovni diagram (konstitutivni zakon) jekla sta močno odvisna od postopkov obdelave.

Delovni diagram **vroče valjanega jekla** ima na meji elastičnosti izrazit raven del oziroma plato, pri **hladno obdelanih jeklih** pa tega horizontalnega dela delovnega diagrama ni.

Meja elastičnosti vroče valjanega jekla je določena z napetostjo pri **horizontalnem delu** diagrama, pri hladno obdelanem jeklu pa z **dogovorno napetostjo**, pri kateri po razbremenitvi ostane 0,2 % nepovratne plastične deformacije



vroče valjano jeklo



hladno obdelano jeklo

Karakteristična meja elastičnosti f_{yk} oziroma karakteristična konvencionalna (dogovorna) meja elastičnosti $f_{0,2k}$ se nanaša na nazivni prečni prerez proizvoda.

To je najpomembnejša lastnost na podlagi katere se tudi označuje armaturna jekla, po standardu SIST EN 1992-1-1 **pa naj bi znašala med 400 in 600 MPa**. Najpogosteje se danes za armiranje uporablja jeklo z oznako **S500**, kar pomeni da je meja elastičnosti oziroma konvencionalna meja elastičnosti 500 MPa.

Projektna vrednost meje elastičnosti: $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_S$ oziroma $f_{yd} = f_{0,2k} / \gamma_S$.

Varnostni faktor za jeklo znaša pri osnovnih in prehodnih situacijah: $\gamma_S = 1,15$.

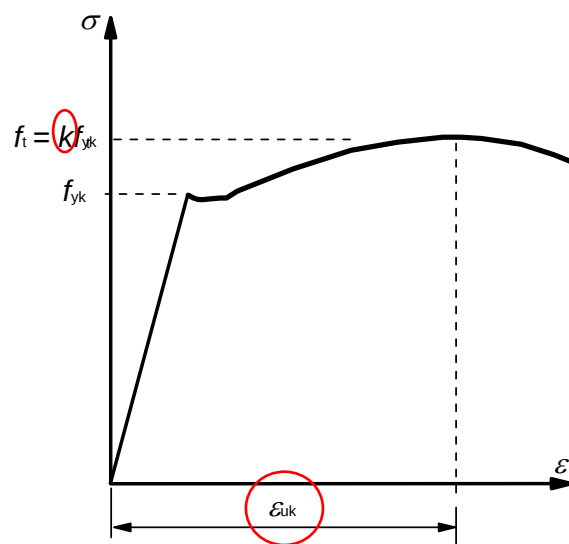
Projektna deformacija na meji elastičnosti: $\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s$,

za modul elastičnosti armaturnega jekla upoštevamo $E_s = 200$ GPa.

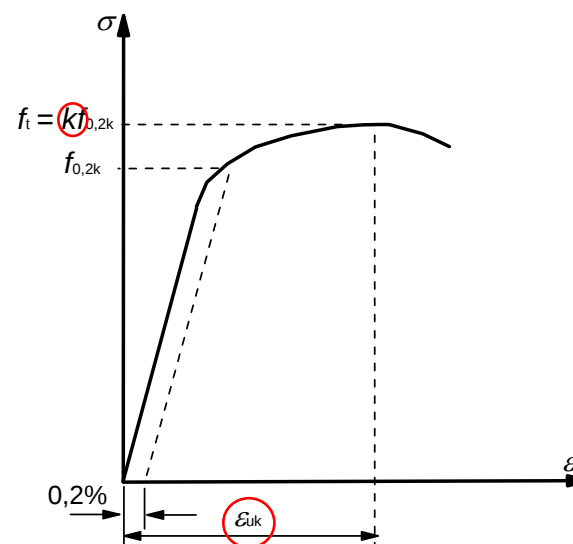
Duktilnost armature je določena **z raztezkom pri največji sili ε_{uk}** in **z razmerjem med natezno trdnostjo in napetostjo na meji elastičnosti $(f_t/f_y)_k$** .

Duktilnost jekla je obratno proporcionalna njegovi meji elastičnosti.

V primerih, ko je duktilnost ključna lastnost (npr. pri potresno varnem projektiranju) je zelo pomembno, da **dejanska meja elastičnosti** v večjem obsegu **ne preseže karakteristične meje elastičnosti** (omejitev v SIST EN 1992-1-1: $f_{y,max} \leq 1,3 f_{yk}$).



vroče valjano jeklo



hladno obdelano jeklo

V dodatku C standarda SIST EN 1992-1-1 so predvideni trije razredi duktilnosti s podanimi zahtevami glede vrednosti razmerja $k = (f_t/f_y)_k$ in glede deformacije ε_{uk} :

Lastnost	Razred duktilnosti armature		
	A	B	C
Karakteristična meja elastičnosti f_{yk} ali $f_{0,2k}$ [MPa]	400 do 600		
Najmanjša vrednost $k = (f_t/f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$
Karakteristična deformacija pri največji sili, ε_{uk} [%]	≥ 25	≥ 50	≥ 75

Ostale minimalne zahteve glede lastnosti jeklene armature, ki se v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 lahko uporablja za armirane in prednapete betonske konstrukcije, so podane v Dodatku C standarda SIST EN 1992-1-1:

Product form	Bars and de-coiled rods			Wire Fabrics			Requirement or quantile value (%)
Class	A	B	C	A	B	C	-
Characteristic yield strength f_{yk} or $f_{0,2k}$ (MPa)	400 to 600						5,0
Minimum value of $k = (f_t/f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	10,0
Characteristic strain at maximum force, ε_{uk} (%)	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	10,0
Bendability	Bend/Rebend test			-			
Shear strength	-			$0,3 A f_{yk}$ (A is area of wire)			Minimum
Maximum deviation from nominal mass (individual bar or wire) (%)	Nominal bar size (mm) ≤ 8 > 8			$\pm 6,0$ $\pm 4,5$			5,0

Pri računu odpornosti prerezov lahko upoštevamo:

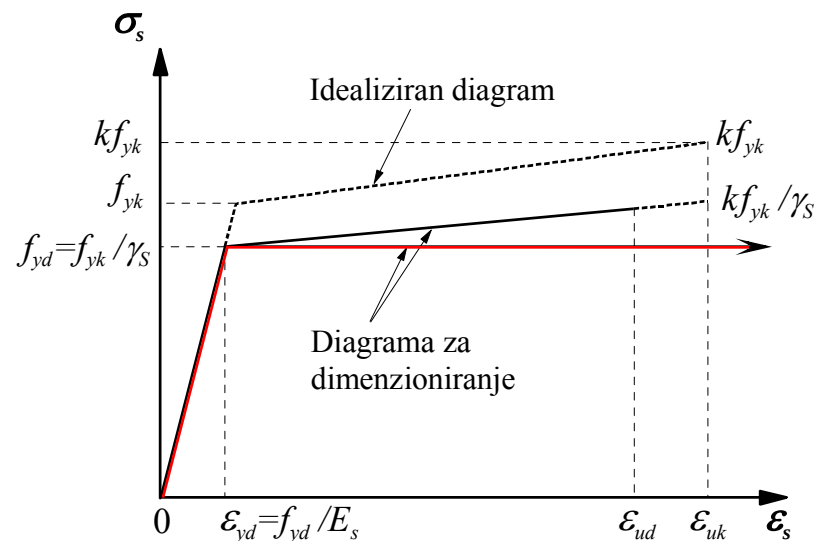
- Poenostavljen bilinearni delovni diagram jekla brez utrditve. Deformacija ε_{ud} ni omejena.
- Lahko pa upoštevamo tudi delovni diagram jekla z utrditvijo po linearnem zakonu(, to je z nagnjeno zgornjo vejo diagrama. Pri diagramu z nagnjeno zgornjo vejo se za mejno deformacijo jekla ε_{ud} upošteva priporočeno vrednost, ki znaša $\varepsilon_{ud} = 0,9 \cdot \varepsilon_{uk}$.

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} : \sigma_s = E_s \varepsilon_s$$

$$\varepsilon_{yd} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud} : \sigma_s = f_{yd}$$

– če ne upoštevamo utrditve

$$\sigma_s = f_{yd} \left[1 + (k - 1) \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{yd}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{yd}} \right] \quad \text{– če upoštevamo utrditev}$$



Pri računu odpornosti prerezov lahko upoštevamo:

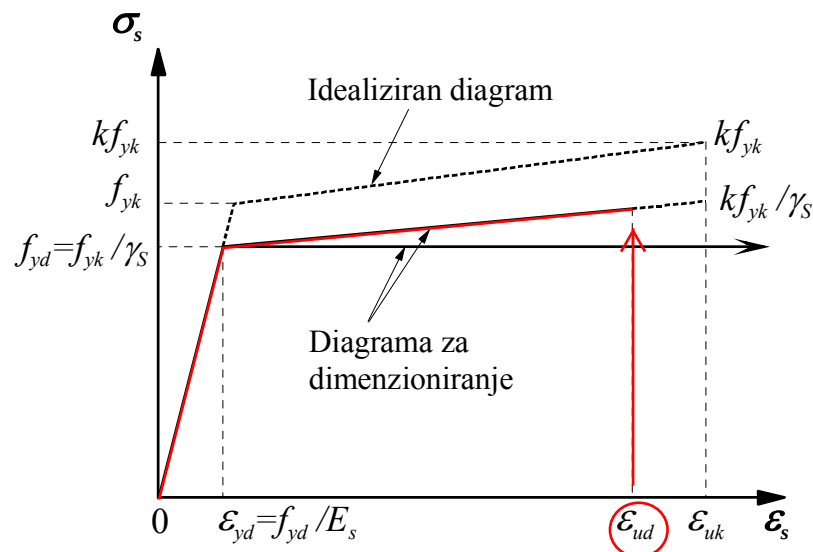
- Poenostavljen bilinearni delovni diagram jekla brez utrditve. Deformacija ε_{ud} ni omejena.
- Lahko pa upoštevamo tudi delovni diagram jekla z utrditvijo po linearnem zakonu(, to je z nagnjeno zgornjo vejo diagrama. Pri diagramu z nagnjeno zgornjo vejo se za mejno deformacijo jekla ε_{ud} upošteva priporočeno vrednost, ki znaša $\varepsilon_{ud} = 0,9 \cdot \varepsilon_{uk}$.

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} : \sigma_s = E_s \varepsilon_s$$

$$\varepsilon_{yd} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud} : \sigma_s = f_{yd}$$

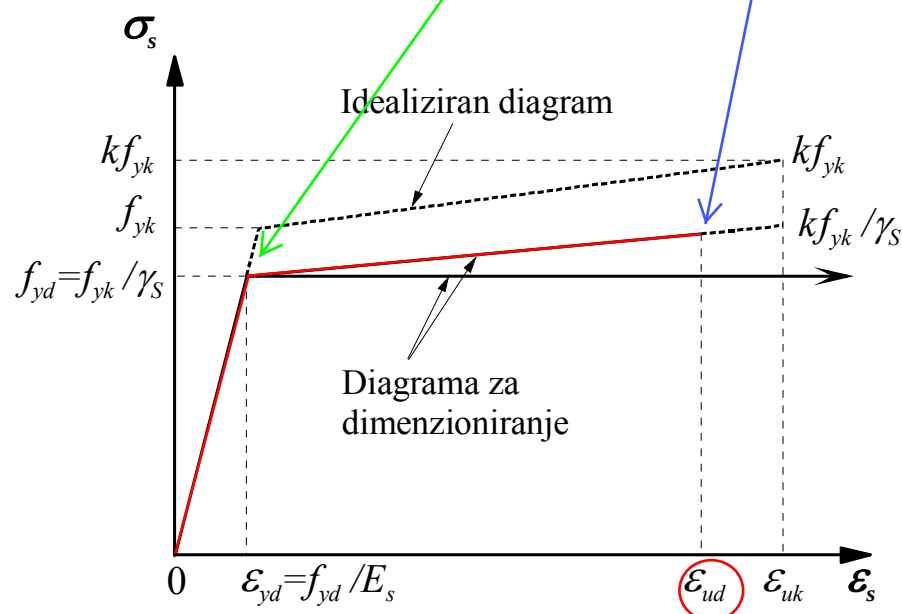
– če ne upoštevamo utrditve

$$\sigma_s = f_{yd} \left[1 + (k-1) \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{yd}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{yd}} \right] \quad \text{– če upoštevamo utrditev}$$



Parametri računskega delovnega diagrama armaturnega jekla z utrditvijo za armaturo S500 z duktilnostjo razredov A in B, ki so določeni z upoštevanjem najmanjših dovoljenih vrednosti za k in ε_{uk} :

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



Jeklo za prednapenjanje

Standard SIST EN 1992-1-1 se glede lastnosti in zahtev za jekla za prednapenjanje opira na standard SIST EN 10138.

Za prednapenjanje konstrukcij po tem standardu uporabljamo:

- **palice** (vroče valjane in obdelane palice trdnostnih razredov 1030, 1100 in 1230 MPa),
- **žice** (kaljena žica trdnostnega razreda 1570 MPa v kolobarjih, in hladno vlečene žice trdnostnih razredov 1570, 1670, 1870 in 1860 MPa) in

- **vrvi** (stabilizirana pramena iz žic, trdnostnih razredov 1860, 1960 in 2060 MPa za vrvi iz po treh žic ter trdnostnih razredov 1770, 1860, 1960 in 2060 MPa za vrvi iz sedmih žic).







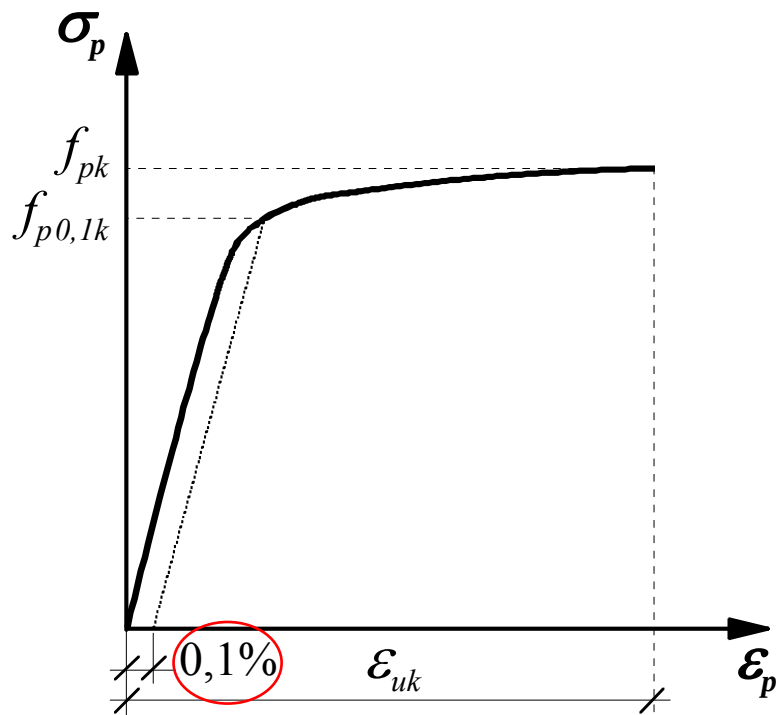


Jeklo za prednapenjanje se razvrsti glede na:

- trdnost, označeno z vrednostjo 0,1-odstotne dogovorne napetosti ($f_{p0,1k}$), vrednostjo razmerja med natezno trdnostjo in dogovorno napetostjo ($f_{pk}/f_{p0,1k}$) in raztezkom pri največji obremenitvi (ε_{uk})
- razred relaksacije
- dimenzijo in
- lastnosti površine.

Delovni diagram jekel za prednapenjanje na meji elastičnosti pred utrditvijo nima horizontalnega dela.

Meja elastičnosti teh jekel je določena z dogovorno napetostjo, pri kateri ob razbremenitvi ostane 0,1 % nepovratne plastične deformacije

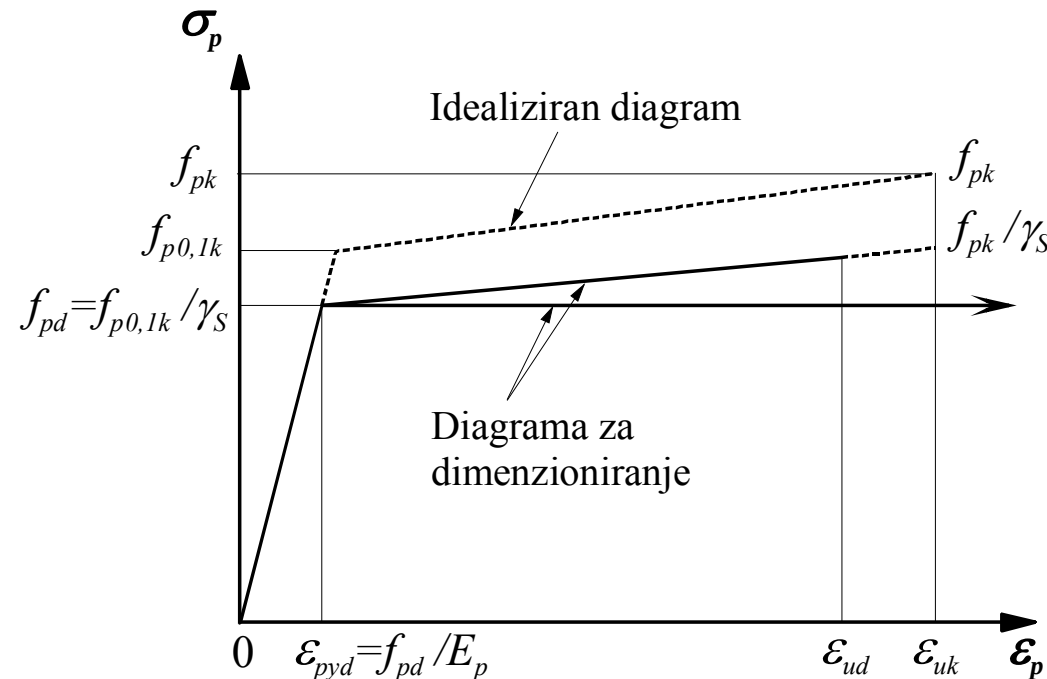


Pri računu odpornosti prereza lahko upoštevamo:

- ali delovni diagram brez utrditve in neomejeno mejno deformacijo ($\varepsilon_{ud} \rightarrow \infty$)
- ali pa delovni diagram z linearno utrditvijo in omejeno mejno deformacijo ε_{ud} Splošno priporočilo standarda SIST EN 1992-1-1 za projektno mejno deformacijo ε_{ud} je: $\varepsilon_{ud} = 0,9 \cdot \varepsilon_{uk}$,

če pa ni poznanih dovolj podatkov, se upošteva priporočeni vrednosti:

$$\varepsilon_{ud} = 0,02 \text{ in } f_{p0,1k}/f_{pk} = 0,9.$$



Za projektno vrednost trdnosti jekla f_{pd} se privzame: $f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_S$.

Varnostni faktor za prednapeto jeklo znaša pri osnovnih in prehodnih situacijah: $\gamma_S = 1,15$.

Delovni diagram jekla za prednapenjanje, ki se uporablja za dimenzioniranje, je določen z izrazi:

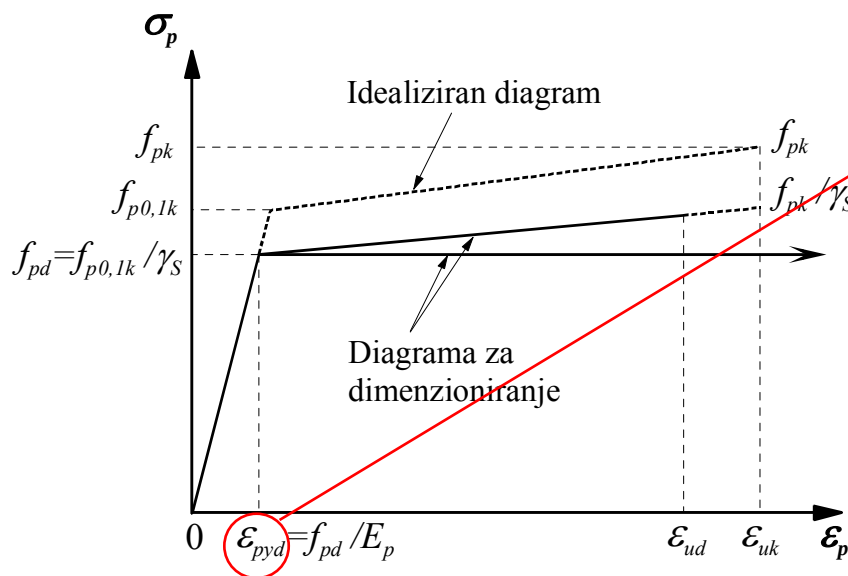
$$0 \leq \varepsilon_p < \varepsilon_{pyd} : \sigma_p = E_p \varepsilon_p$$

$$\varepsilon_{pyd} \leq \varepsilon_p \leq \varepsilon_{ud} : \sigma_p = f_{pd}$$

– brez utrditve

$$\sigma_p = f_{pd} + \left(\frac{f_{pk} - f_{p0,1k}}{\gamma_S} \right) \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{pyd}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{pyd}}$$

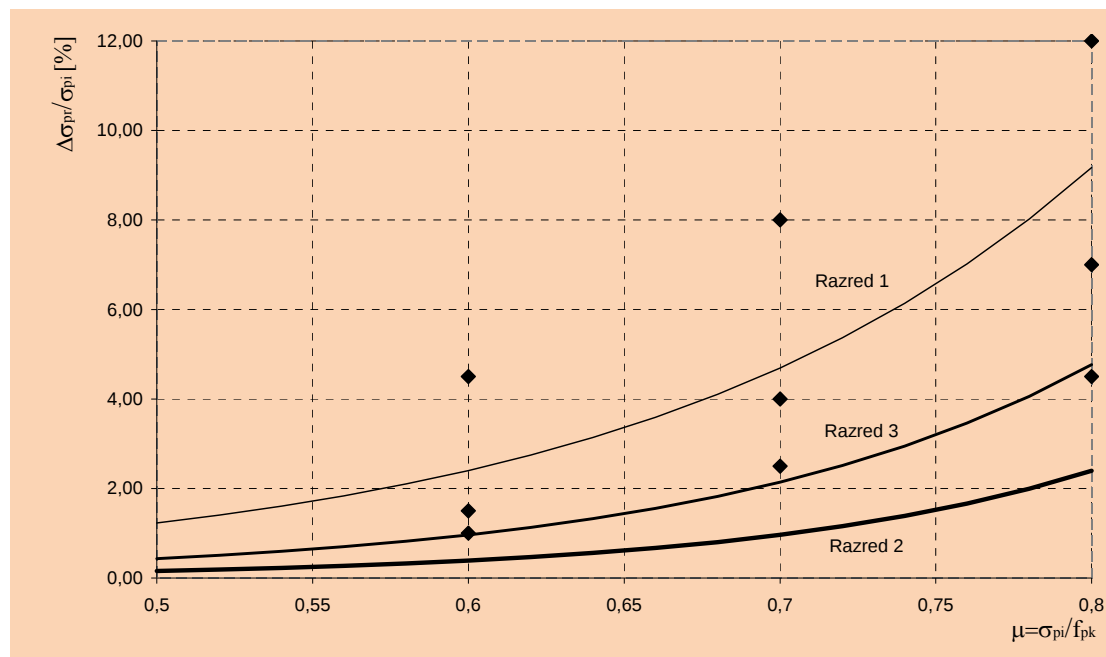
– z utrditvijo



Relaksacija jekla za prednapenjanje

Padec prednapetja zaradi relaksacije se lahko dobi iz **certifikatov proizvajalcev**, ki temeljijo na kontroli proizvodnje ali pa se ga kot razmerje med padcem napetosti $\Delta\sigma_{pr}$ in začetno napetostjo prednapetja σ_{pi} v odstotkih določi z uporabo ustreznih **matematičnih izrazov**.

V standardu SIST EN 1992-1-1 so v ta namen **podani izrazi (3.28) do (3.30)**. Relaksacija določena po teh izrazih je približno za polovico manjša od vrednosti relaksacije, ki so bile v grafični obliki podane v predstandardu ENV 1992-1-1 in v modelu predpisov CEB–FIP Model Code 1990.



Prvotnim vrednostim relaksacije se v primeru uporabe enakih matematičnih nastavkov bistveno bolje približamo če namesto izrazov podanih v standardu uporabimo ustreznega izmed spodnjih izrazov, ki so **dobljeni z optimizacijo parametrov a in b** po metodi najmanjše vsote kvadratov odstopanj.

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = \textcircled{a} \cdot \rho_{1000} e^{\textcircled{b} \cdot \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$$

Razred 1: $\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 37,23 \rho_{1000} e^{4,63\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$ za žice in vrvi za prednapenjanje,

Razred 2: $\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 8,26 \rho_{1000} e^{6,74\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$ za kable za prednapenjanje z nizko relaksacijo,

Razred 3: $\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 8,37 \rho_{1000} e^{6,70\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$ za vroče valjane in obdelane palice,

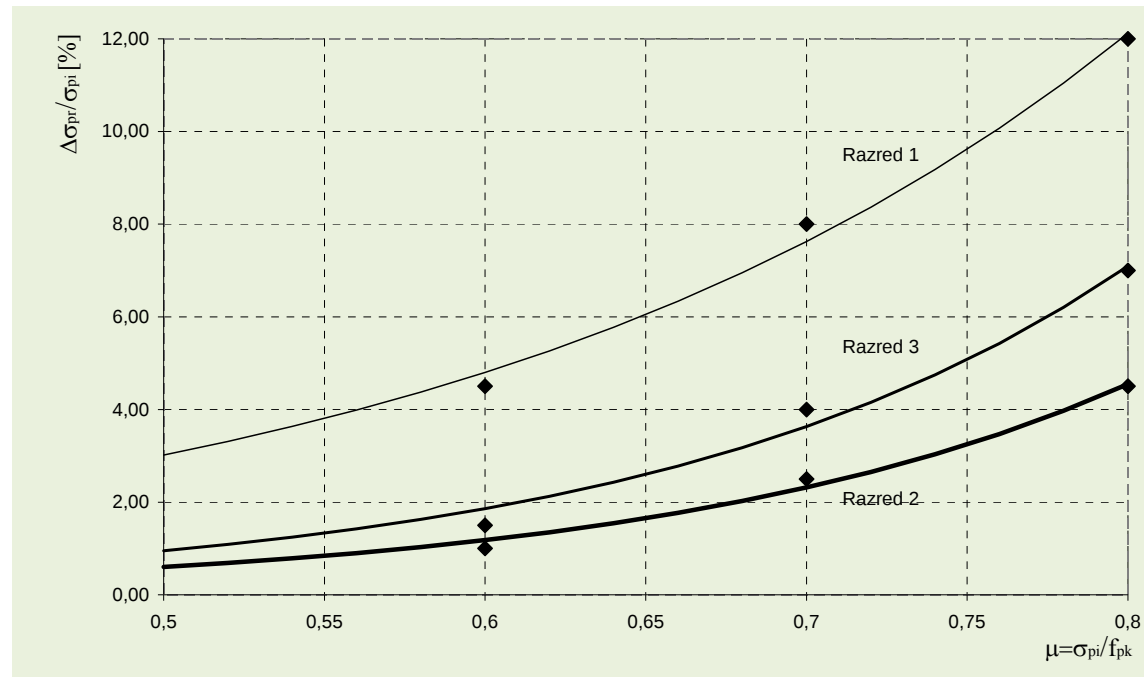
t čas v urah,

$\mu = \sigma_{pi}/f_{pk}$ raven začetne napetosti,

ρ_{1000} pa je delež padca napetosti zaradi relaksacije v prvih 1000 urah pri temperaturi $T = 20^\circ\text{C}$ (v %).

Za vrednost relaksacije ρ_{1000} se lahko privzame da je:

- 8 % za razred 1 (za žice in vrvi za prednapenjanje),
- 2,5 % za razred 2 (za kable za prednapenjanje z nizko relaksacijo) in
- 4 % za razred 3 (za vroče valjane in obdelane palice) ali
- pa se vzame vrednost iz certifikata.



DOKAZI MEJNIH STANJ NOSILNOSTI

Obravnavamo mejna stanja nosilnosti (MSN):

- z ustreznimi računskimi postopki **dokazujemo potrebno varnost konstrukcije** proti poružitvi,
- oziroma **izvajamo ustrezno dimenzioniranje konstrukcije**.

Potrebna varnost konstrukcije je zagotovljena:

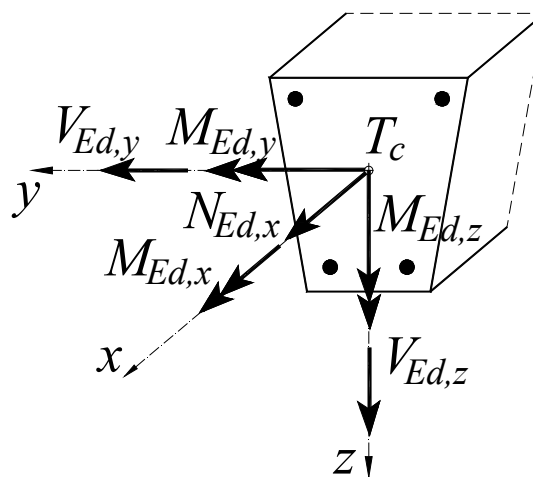
$$\{E_d\} \leq \{R_d\}$$

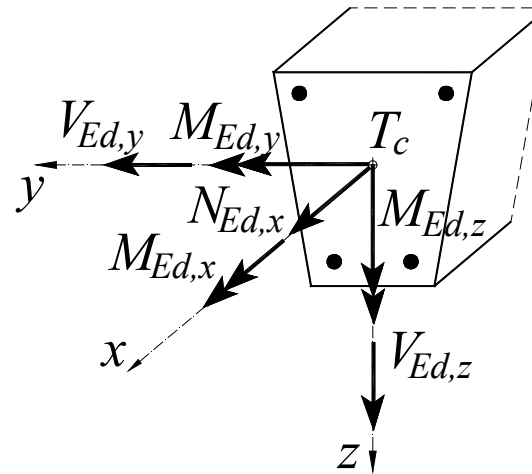
-vektor mejne odpornosti (nosilnosti) $\{R_d\}$

-vektorju mejne obremenitve $\{E_d\}$.

Z upoštevanjem **posameznih komponent** v obeh vektorjih lahko gornji pogoj zapišemo na naslednji način:

$$\{E_d\} = \begin{Bmatrix} N_{Ed,x} \\ M_{Ed,y} \\ M_{Ed,z} \\ V_{Ed,y} \\ V_{Ed,z} \\ M_{Ed,x} \end{Bmatrix} \leq \{R_d\} = \begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} N_{Rd,x}(\varepsilon_u, f_{cd}, f_{yd}, \sigma_c(\varepsilon), \sigma_s(\varepsilon), geometrije) \\ M_{Rd,y}(\varepsilon_u, f_{cd}, f_{yd}, \sigma_c(\varepsilon), \sigma_s(\varepsilon), geometrije) \\ M_{Rd,z}(\varepsilon_u, f_{cd}, f_{yd}, \sigma_c(\varepsilon), \sigma_s(\varepsilon), geometrije) \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} V_{Rd,y}(\text{rušnega mehanizma}, f_{cd}, f_{yd}, geometrije) \\ V_{Rd,z}(\text{rušnega mehanizma}, f_{cd}, f_{yd}, geometrije) \\ M_{Rd,x}(\text{rušnega mehanizma}, f_{cd}, f_{yd}, geometrije) \end{Bmatrix} \end{Bmatrix}.$$





Dejanska konstrukcija, ki je obtežena z zunanjimi vplivi:

- **hkrati oziroma istočasno lahko deluje vseh šest ali pa**
- **samo nekaj komponent** vektorja obremenitve $\{E_d\}$.

Osno-upogibne in strižne komponente vektorja odpornosti $\{R_d\}$ **med seboj niso povsem neodvisne** in bi jih bilo koristno določati simultano.

Inženirski pristop k dimenzioniranju armiranobetonskih konstrukcij:

Osnovne upogibne komponente $N_{Rd,x}, M_{Rd,y}, M_{Rd,z}$ vektorja mejne odpornosti $\{R_d\}$

računsko določamo ločeno in neodvisno od

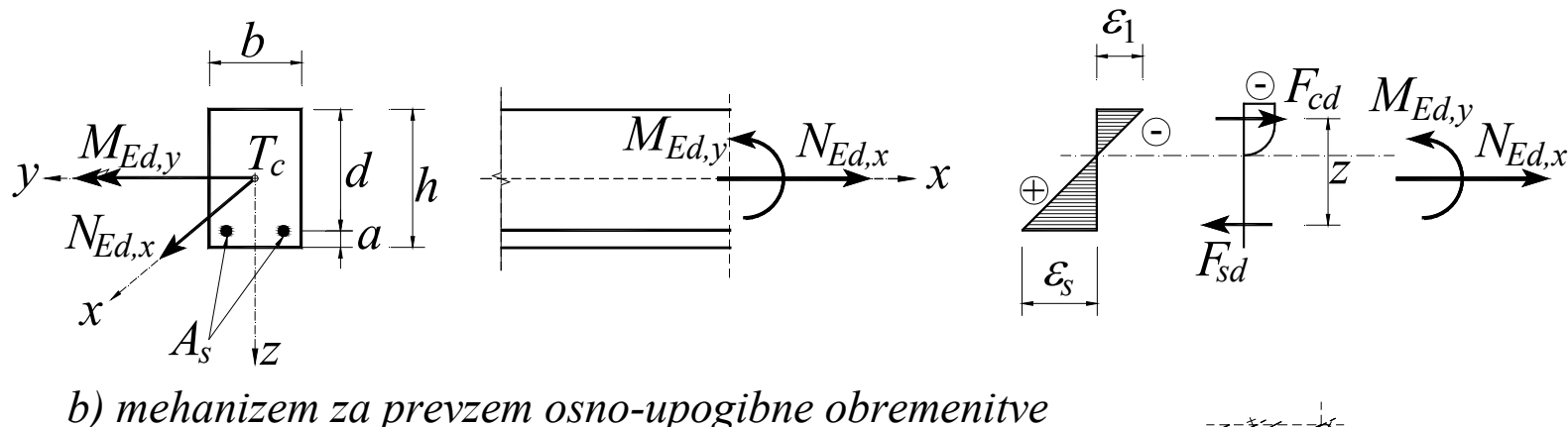
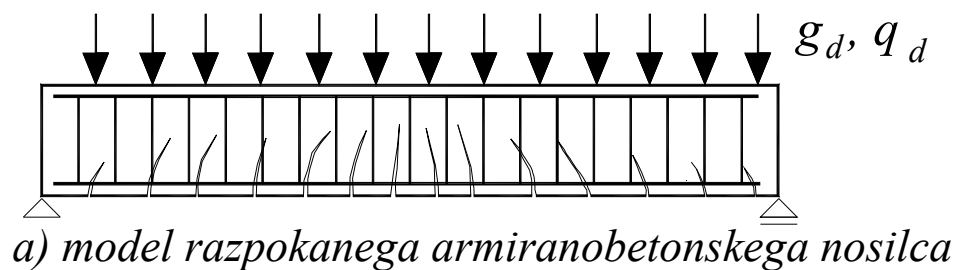
komponent **mejne strižne odpornosti** $V_{Rd,y}, V_{Rd,z}$ in $M_{Rd,x}$.

Vzroki:

- različne **definicije mejnega stanja** osno-upogibne in strižne odpornosti elementov konstrukcije
- **poenostavitev računa**

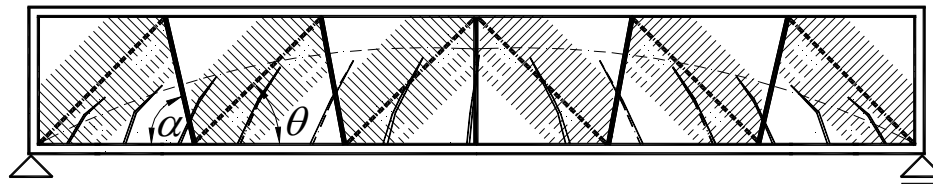
Osno-upogibna mejna odpornost elementov konstrukcije

- določamo na podlagi privzetega **upogibnega porušnega mehanizma na nivoju prečnega prereza**.

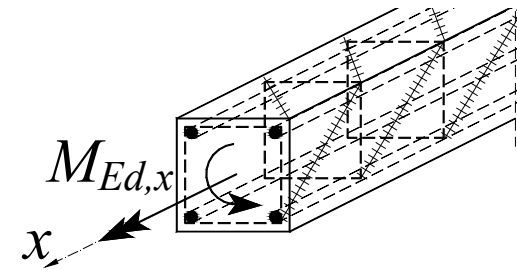


Mejna strižno nosilnost elementa konstrukcije

- določamo na podlagi porušnega mehanizma nadomestnega paličja na celotnega nivoju elementa konstrukcije



c) mehanizem ravninskega paličja za prevzem prečne sile



d) mehanizem prostorskega paličja za prevzem torzije $M_{Ed,x}$

Projektna obremenitev konstrukcije {Ed}

- V vseh mejnih stanjih običajno določimo z analizo konstrukcije **po linearni teoriji elastičnosti**
- Možne pa so tudi druge metode analize).
- Pri tem moramo upoštevati **najneugodnejše projektne vplive** (obtežbo) oziroma najneugodnejšo **kombinacijo ustreznih projektnih vplivov** (obtežb), če jih je več, ki pridejo smiselno v poštev.
- Projektne vplive oziroma njihove kombinacije je treba upoštevati v skladu s skupinama standardov **EVROKOD** in **EVROKOD 1** ter standardom za betonske konstrukcije SIST EN 1992-1-1.

V primeru kontrole v **trajnih in prehodnih stanjih**, to je pri **osnovnih kombinacijah vplivov** mora biti izpolnjen pogoj:

$$\left\{ E_d \left(\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P(P) + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right) \right\} \leq \left\{ R_d \left(\varepsilon_u, f_{yd}, f_{cd}, geom., ruš.meh. \right) \right\}$$

Dimenzioniranje armiranobetonskih konstrukcij:

$$\{E_d\} = \{R_d\}.$$

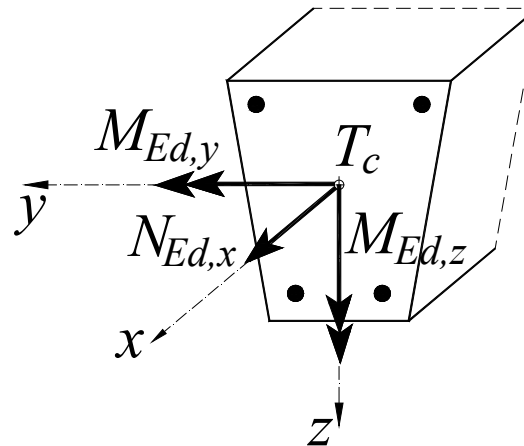
Projektna odpornost in dimenzioniranje AB prerezov na osno-upogibno obremenitev

Osno-upogibna obremenitev prereza - upogib z ali brez osne sile

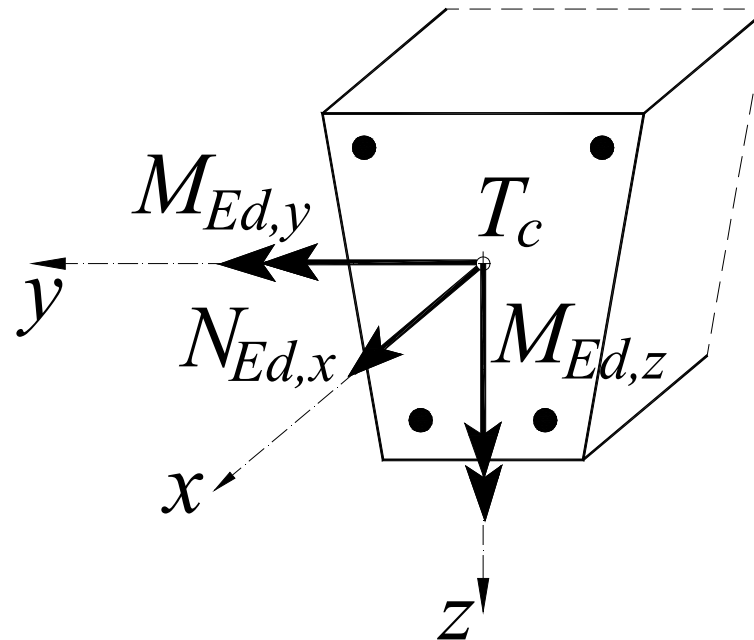
Poljubna kombinacija tistih komponent vektorja obremenitve $\{E_d\}$, ki povzročajo v prerezu normalne napetosti σ :

- osna sila $N_{Ed,x}$
- upogibna momenta $M_{Ed,y}$ in $M_{Ed,z}$ glede na težišče betonskega prereza T_c

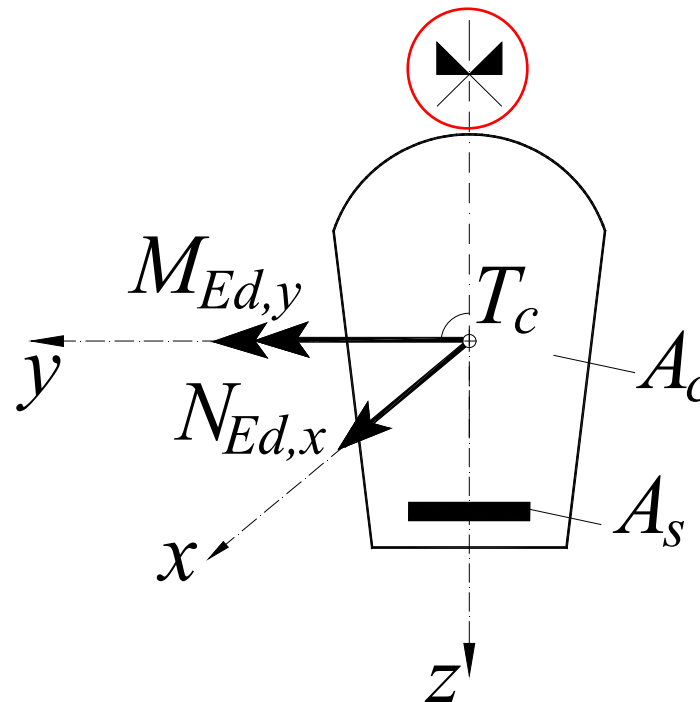
$$\{E_d\} = \{N_{Ed,x}, M_{Ed,y}, M_{Ed,z}\} \quad \text{Pogosto tudi } \{E_d\} = \{N_{d,x}, M_{d,y}, M_{d,z}\}$$



Kadar na prerez delujeta oba upogibna momenta $M_{Ed,y}$ in $M_{Ed,z}$ govorimo o splošnem primeru **dvojnega (dvoosnega) upogiba** z ali brez osne sile.



Pri prerezih kjer deluje **le en upogibni moment** ($M_{Ed,z} = 0$ ali $M_{Ed,y} = 0$) in je prerez pri tem v smislu betona in armature **simetričen** glede na os, ki poteka skozi težišče betona in je pravokotna na vektor upogibnega momenta, lahko govorimo o **primeru enojnega (enoosnega) upogiba** z ali brez osne sile.



Prereze, ki ne ustrezajo zahtevanemu pogoju simetrije moramo, **kljub obremenitvi z le enim upogibnim momentom obravnavati** po splošnih postopkih za dvojni upogib (nevtralna **os ni vzporedna** z vektorjem upogibnega momenta)!

Predpostavke in poenostavitve računa osno-upogibne odpornosti prerezov

Splošno uveljavljene predpostavke in poenostavitve, ki so povzete tudi v standardu SIST EN 1992-1-1:

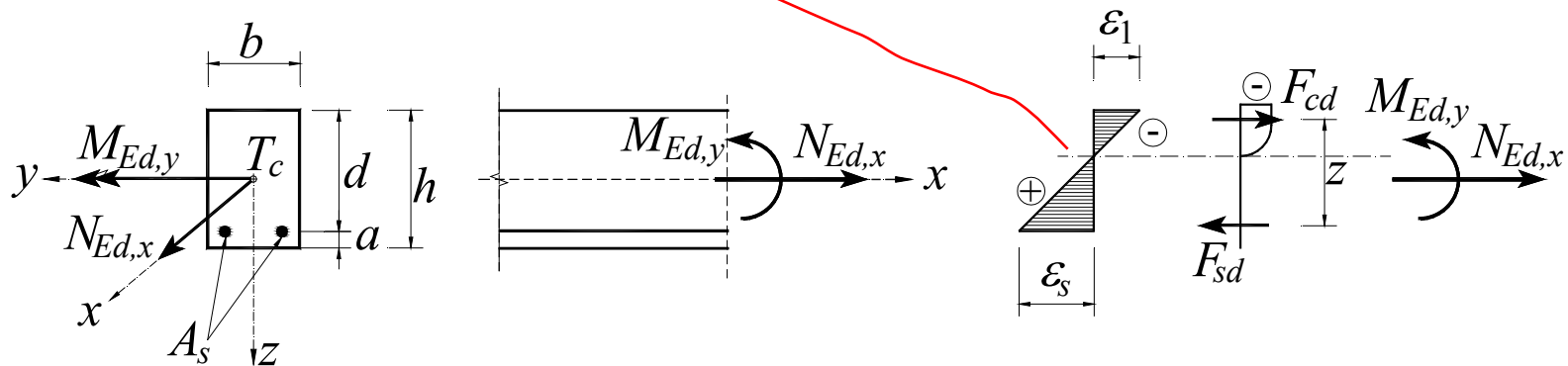
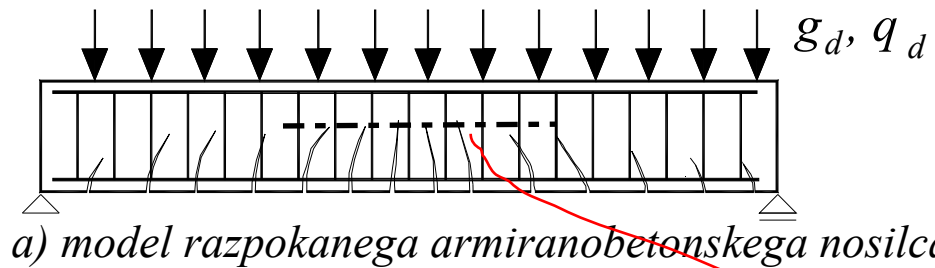
- velja Bernoulli-Navier-ova hipoteza o **ravninskih prerezih**. Prerezi, ki so bili ravni pred obremenitvijo ostanejo ravni tudi po nastopu le-te. Deformacije prereza lahko v splošnem opišemo z deformacijsko ravnino:

$$\varepsilon(y, z) = c_0 + c_1 \cdot z + c_2 \cdot y$$

- deformacija **povezane armature** je v tlačni in natezni coni enaka **deformaciji v okoliškem betonu**. Predpostavljena je popolna sprijemnost med palicami armature in okoliškim betonom. Ta stik ostane intakten vse do porušitve prereza.

$$\varepsilon_s(y, z) = \varepsilon_c(y, z) = \varepsilon(y, z)$$

- **natezno nosilnost betona** v računu upogibne odpornosti **zanemarimo**. Ker natezne nosilnosti betona ne upoštevamo oblika natezne cone pod nevtralno osjo ne vpliva na odpornost.

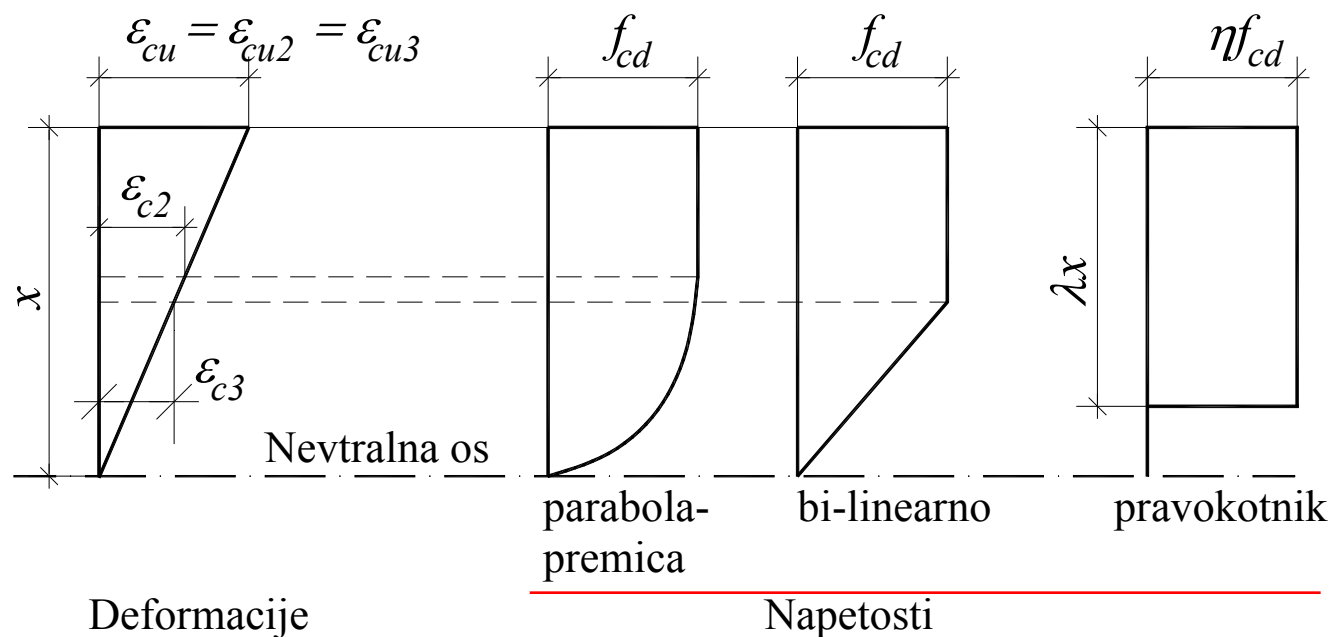


- **napetosti v tlačnem betonu so določene na podlagi poenostavljenega delovnega diagrama betona za dimensioniranje.**

O osnovni poenostavljeni diagram za dimensioniranje prerezov, ki je kombinacija parabole in premice,

O za vse vrste osno-upogibne obremenitve lahko upoštevamo tudi poenostavljeni bilinearni diagram,

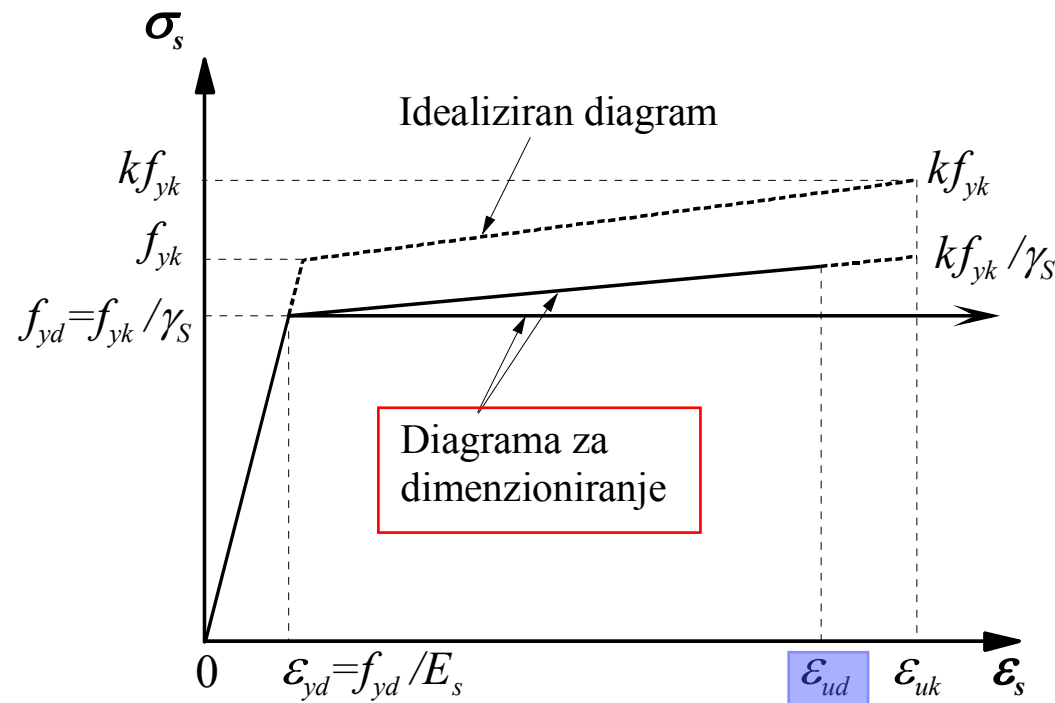
O za primer velike ekscentričnosti (nevtralna os v prerezu) pa tudi najenostavnejši diagram v obliki pravokotnika



- **napetosti v armaturi** so določene na podlagi računskega **delovnega diagrama jekla za dimenzioniranje prerezov**.

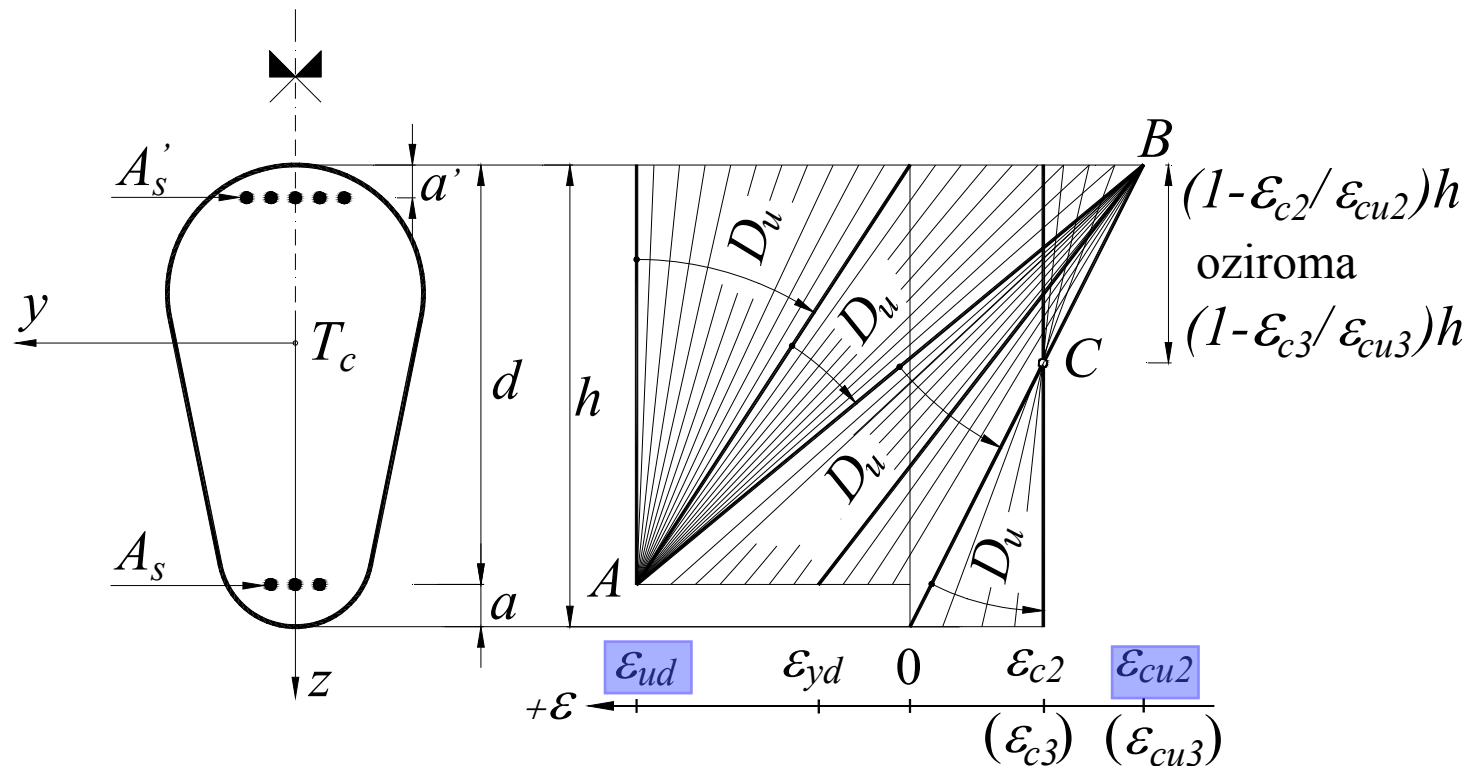
O enostavnejši diagram jekla brez utrditve pri katerem mejna deformacija ε_{ud} ni omejena,

O delovni diagram jekla z utrditvijo to je z nagnjeno zgornjo vejo diagrama. Upoštevanje tega diagrama prinese v običajnih razmerah le zanemarljivo zmanjšanje potrebne količine armature in ni prav pogosto v vsakdanji inženirski praksi.



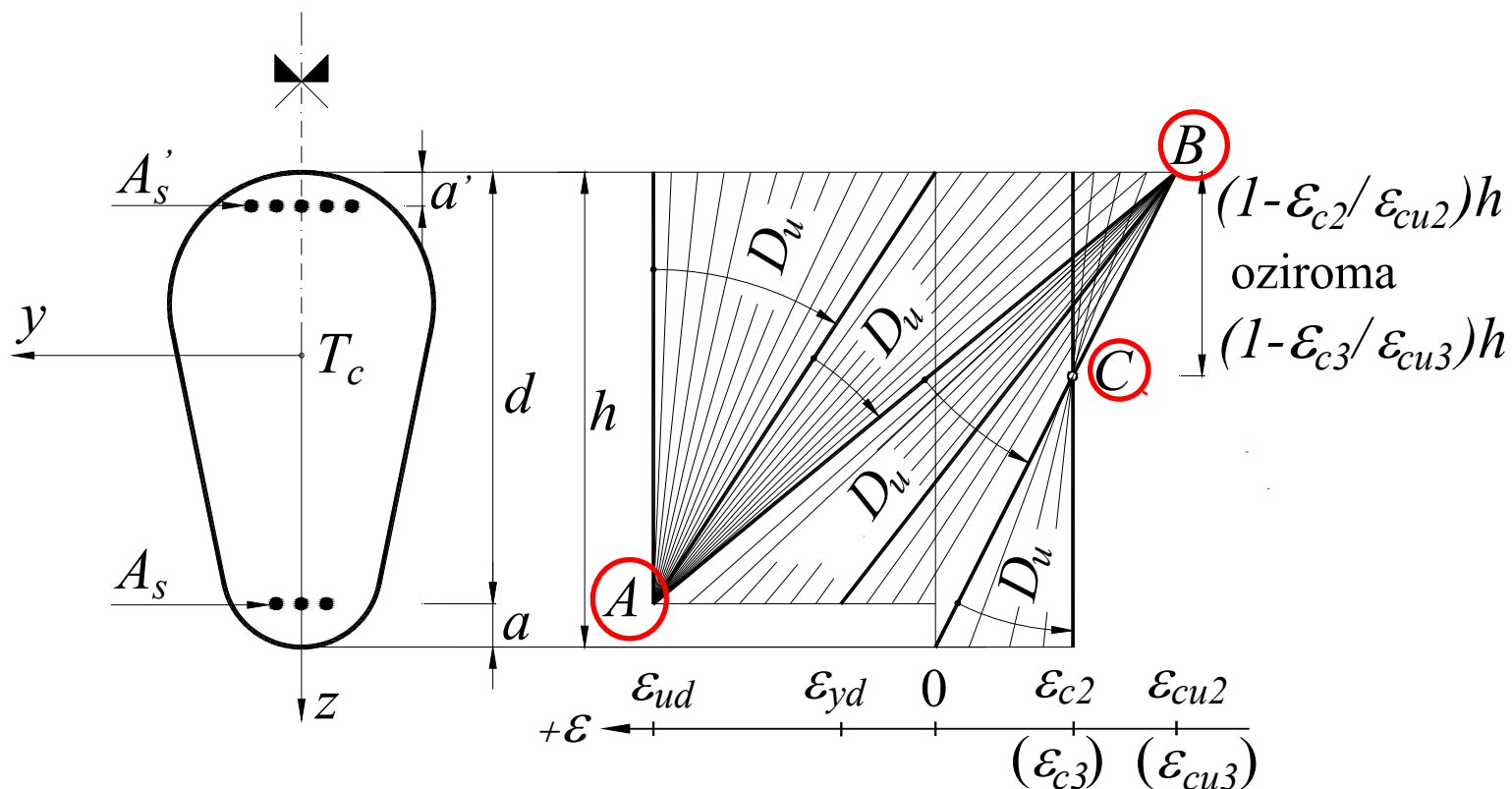
Mejna osno-upogibna odpornost armiranega betonskega prereza je določena z **mejno deformacijsko ravnino** (D_u).

Deformacijska ravnina pri kateri je vsaj v eni ali več točkah betona oziroma armature dosežena konvencionalna mejna deformacija ε_{cu2} (ali ε_{cu3}) oziroma ε_{ud} .



Točke **A**, **B** in **C** so t.i. vrlišča deformacijskih ravnin.

Točka A je določena z mejno deformacijo natezne armature ϵ_{ud} ,
 točka B z mejno tlačno deformacijo betona pri upogibu ϵ_{cu2} (ali ϵ_{cu3}),
 točka C pa z mejno tlačno deformacijo pri čistem tlaku ϵ_{c2} (ali ϵ_{c3}).



Vektor osno-upogibne mejne odpornosti poznane prerez { R_d }

Integracija napetosti betona in armature po prečnem prerezu:

$$\{R_d\} = \left\{ \begin{array}{l} N_{Rd,x} = \iint_A \sigma_{xx} dA = \iint_{A_c} \sigma_c dA_c + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma_{si} \\ M_{Rd,y} = \iint_A z \sigma_{xx} dA = \iint_{A_c} z_c \sigma_c dA_c + \sum_{i=1}^n z_{si} A_{si} \sigma_{si} \\ M_{Rd,z} = -\iint_A y \sigma_{xx} dA = -\iint_{A_c} y_c \sigma_c dA_c - \sum_{i=1}^n y_{si} A_{si} \sigma_{si} \end{array} \right\}$$

Napetosti betona in armature **s pomočjo delovnih diagramov** obeh materialov izrazimo z deformacijami ($\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c)$, $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_s)$)

→ **vektor osno-upogibne odpornosti prereza lahko zapišemo z deformacijami in projektnima trdnostma obeh materialov f_{cd} in f_{yd} :**

$$\{R_d\} = \left\{ \begin{array}{l} N_{Rd,x} \left(D_u, f_{cd}, f_{yd}, geometrija \right) \\ M_{Rd,y} \left(D_u, f_{cd}, f_{yd}, geometrija \right) \\ M_{Rd,z} \left(D_u, f_{cd}, f_{yd}, geometrija \right) \end{array} \right\}$$

Vsaki mejni deformacijski ravnini D_u , enolično pripada en sam vektor mejne nosilnosti znanega prereza $\{R_d\}$.

Če s **spreminjanjem mejnih deformacijskih** ravnin po korakih pokrijemo celotno deformacijsko območje mejnih deformacijskih ravnin in za vsako izbrano lego mejne deformacijske ravnine določimo pripadajoči vektor osno-upogibne mejne odpornosti prereza, dobimo **vse možne vektorje mejne odpornosti** znanega armiranobetonskega prereza.

Na ta način so pripravljene vsi razpoložljivi **pripomočki za praktično** dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov na osno-upogibno obremenitev **v brezdimenzijski obliki**.

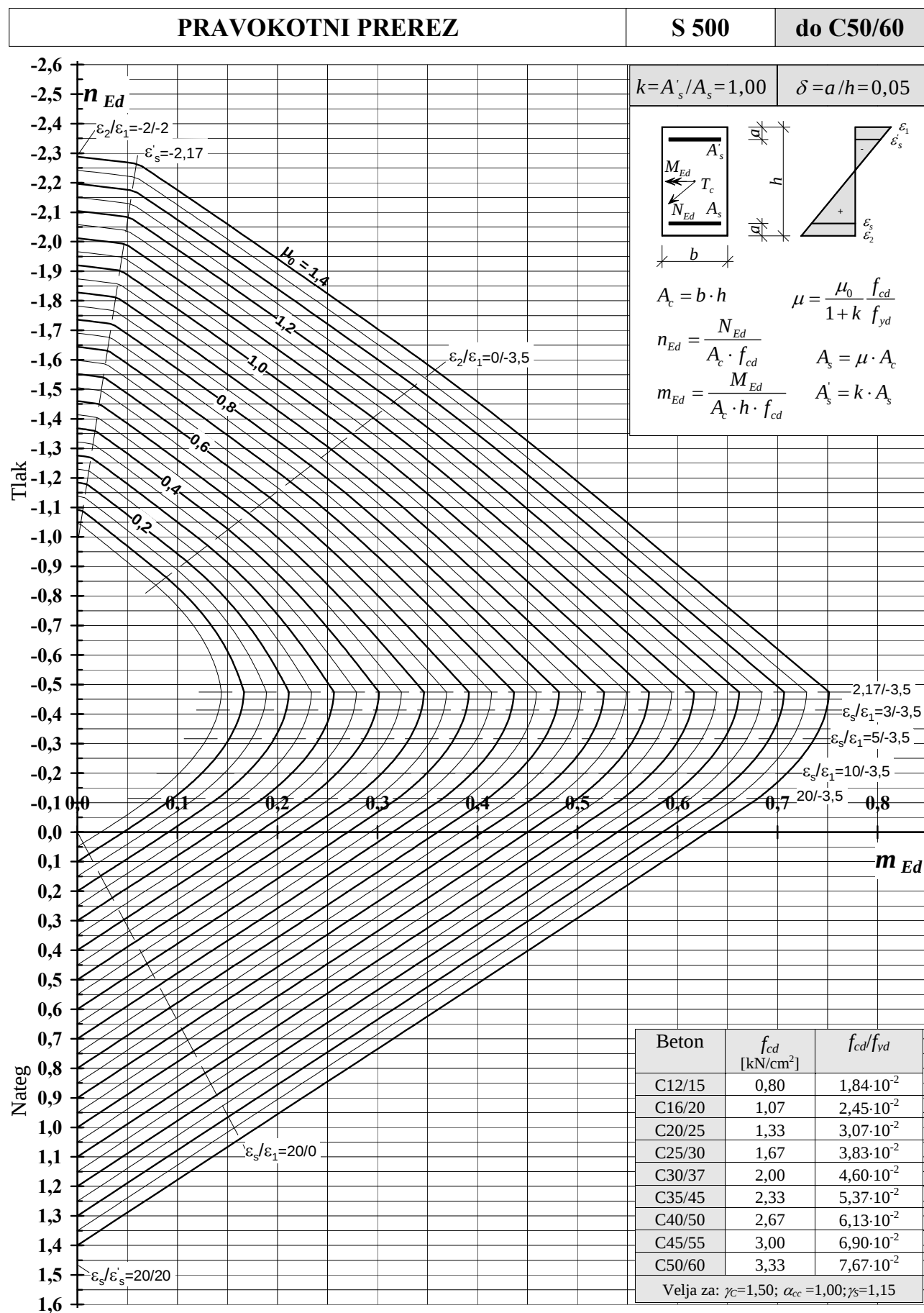


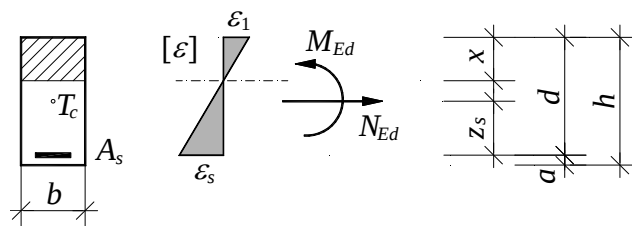
Diagram 1

Pr. P1-1. Velika ekscentričnost – enojna armatura: vsi trdnostni razredi betona (pri $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$)

$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

$$k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \rightarrow k_s \text{ in } k_x$$

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s}; \quad x = k_x \cdot d$$



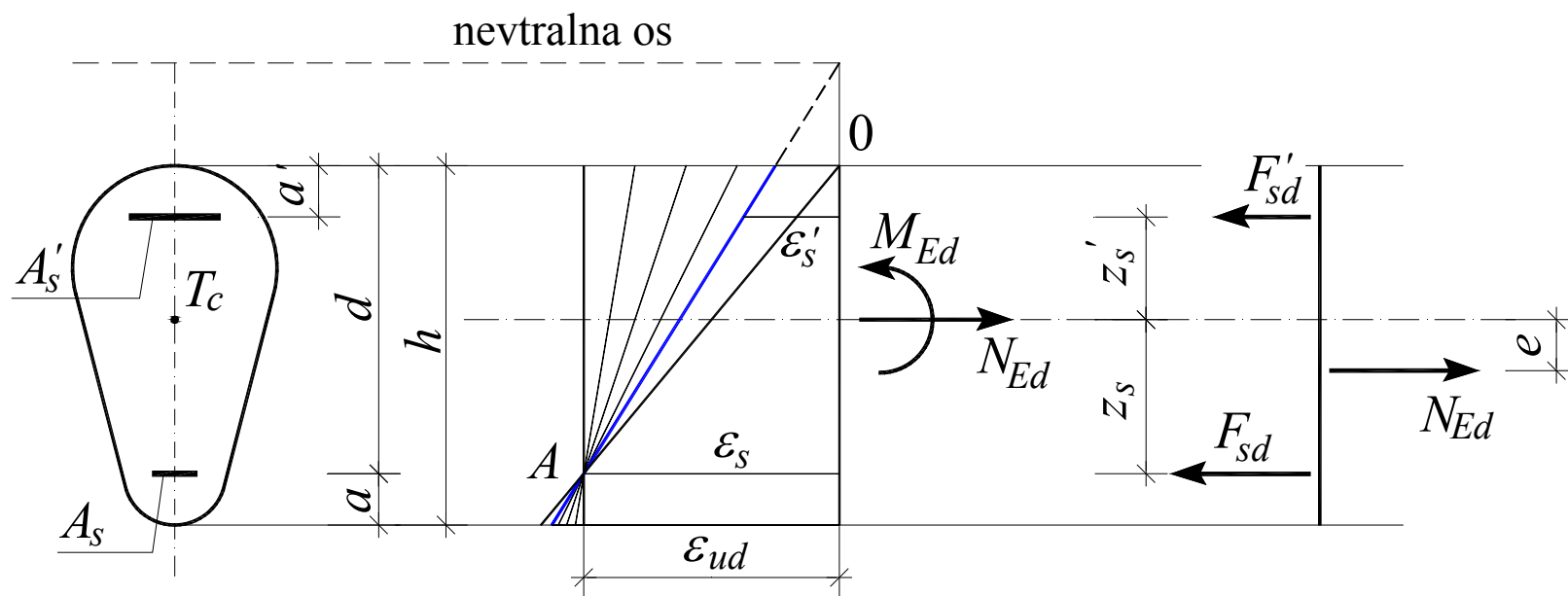
Armatura			ε_s [%]		Beton					
S 500-A	S 500-B	S 500			≤ C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
σ_s [kN/cm ²]	σ_s [kN/cm ²]	σ_s [kN/cm ²]			ε_1 [%]					
					-3,5	-3,1	-2,9	-2,7	-2,6	-2,6
30,00	30,00	30,00	1,5	k_x	0,700	0,674	0,659	0,643	0,634	0,634
				k_s	1,411	1,359	1,331	1,303	1,290	1,288
		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

Zaradi posebnosti in poenostavitve računa ločimo tipične kombinacije obremenitve:

$$N_{Ed,x} \rightarrow N_{Ed}$$

$$M_{Ed,y} \rightarrow M_{Ed}$$

Ekscentrični nateg - mala ekscentričnost



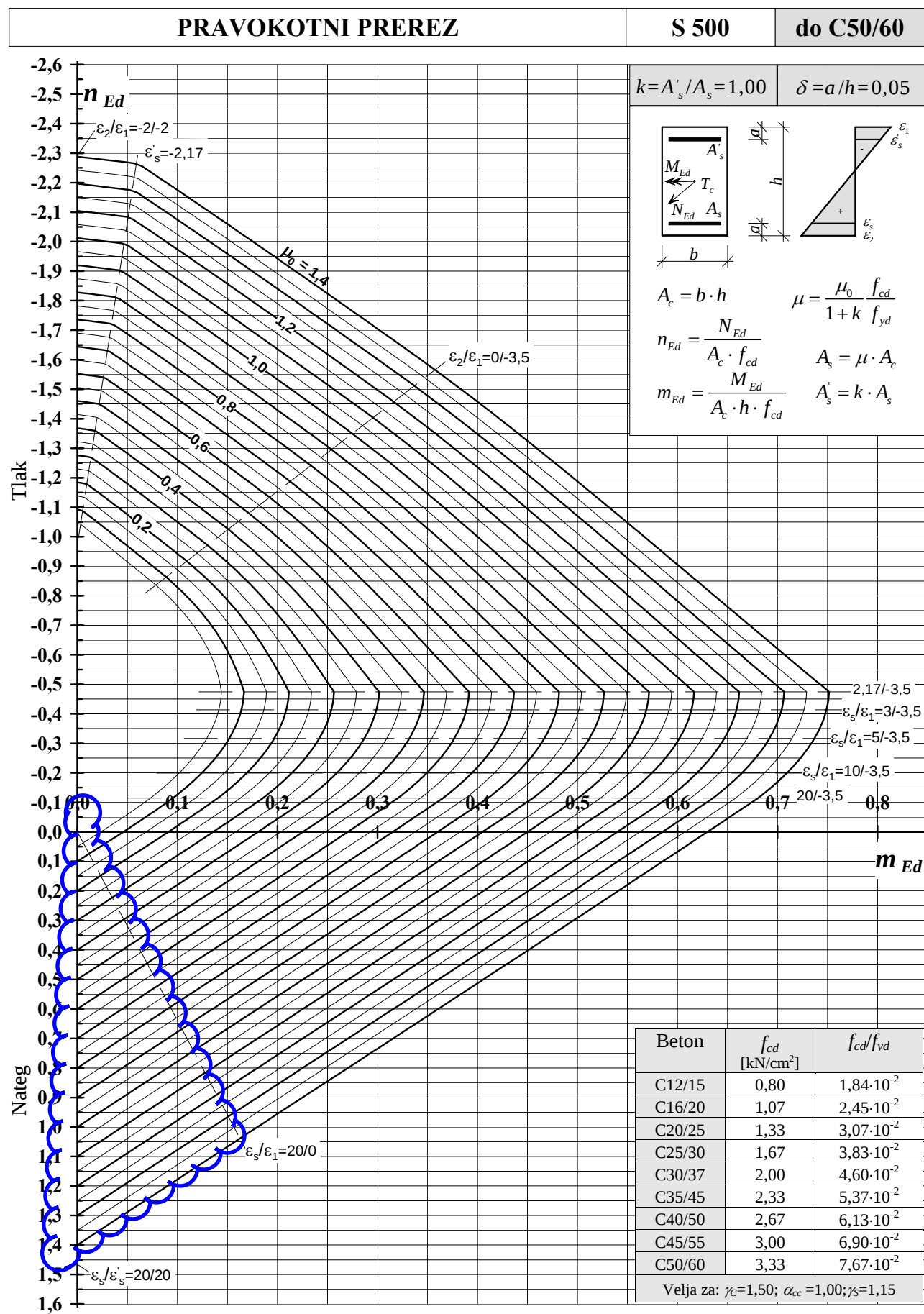
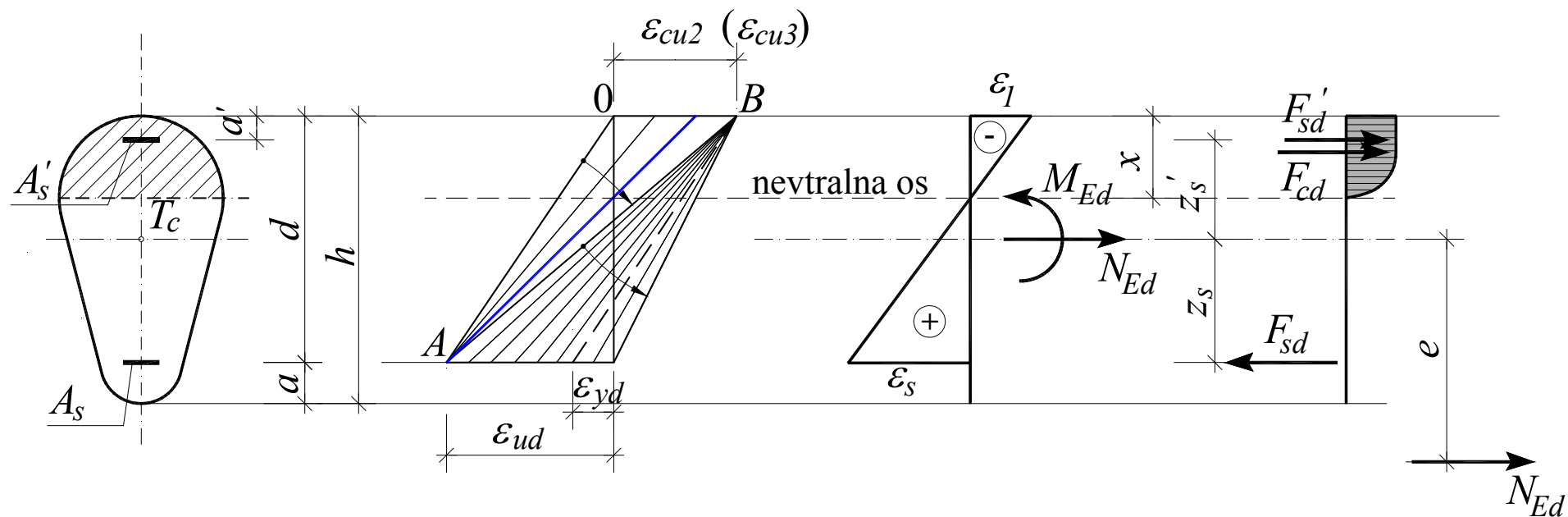


Diagram 1

Upogib z ali brez osne sile - velika ekscentričnost



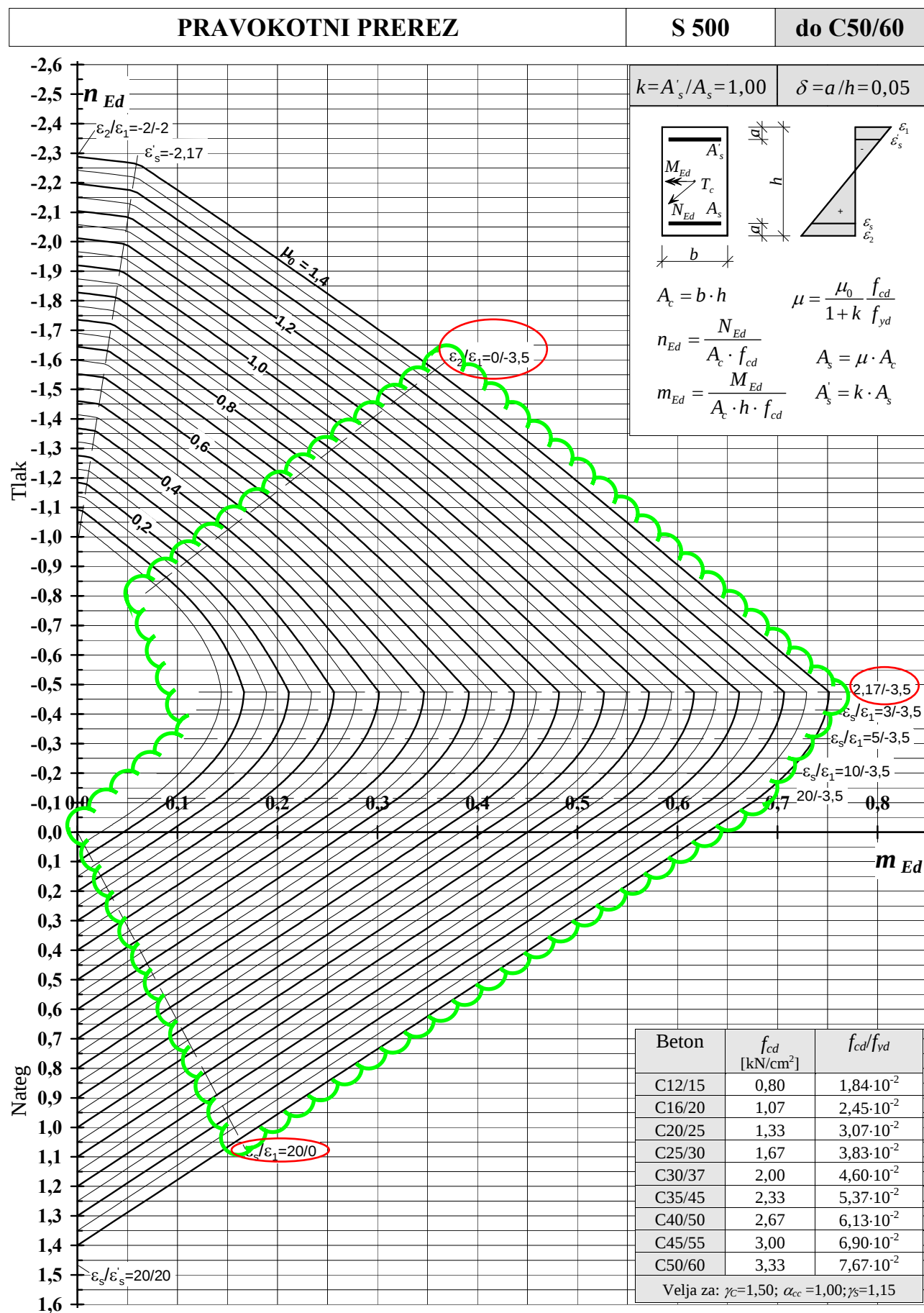
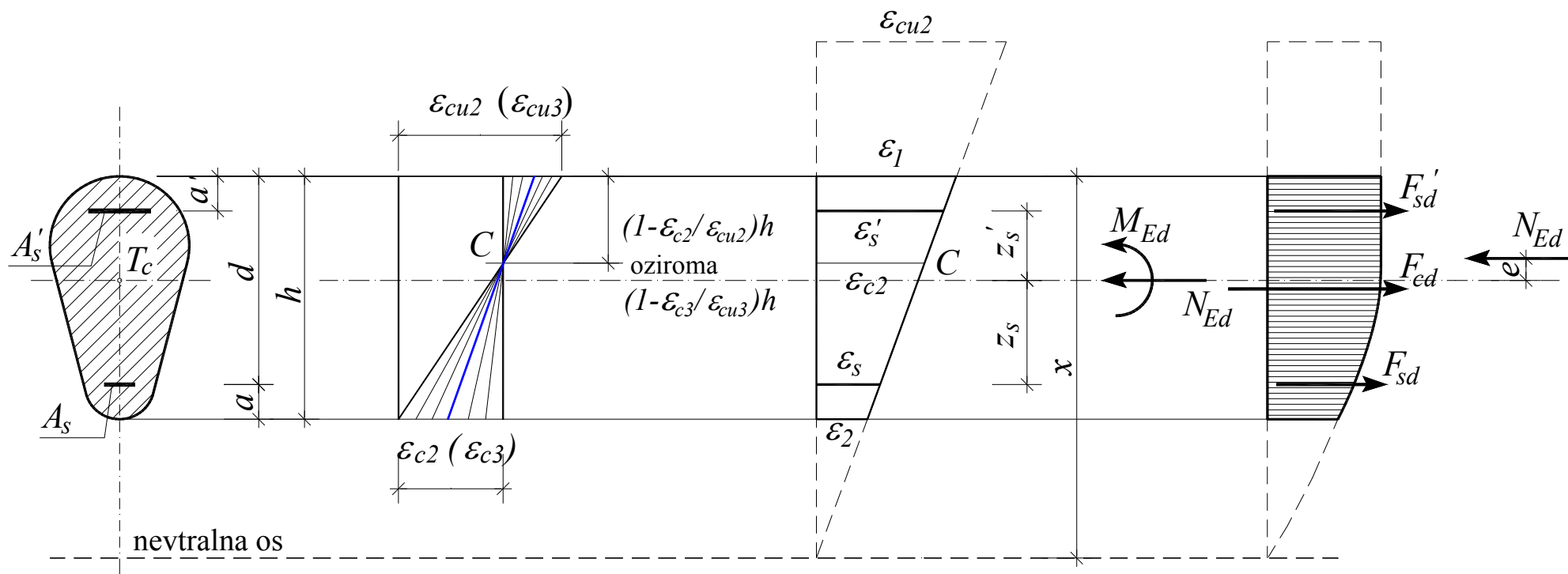


Diagram 1

Ekscentrični tlak - mala ekscentričnost



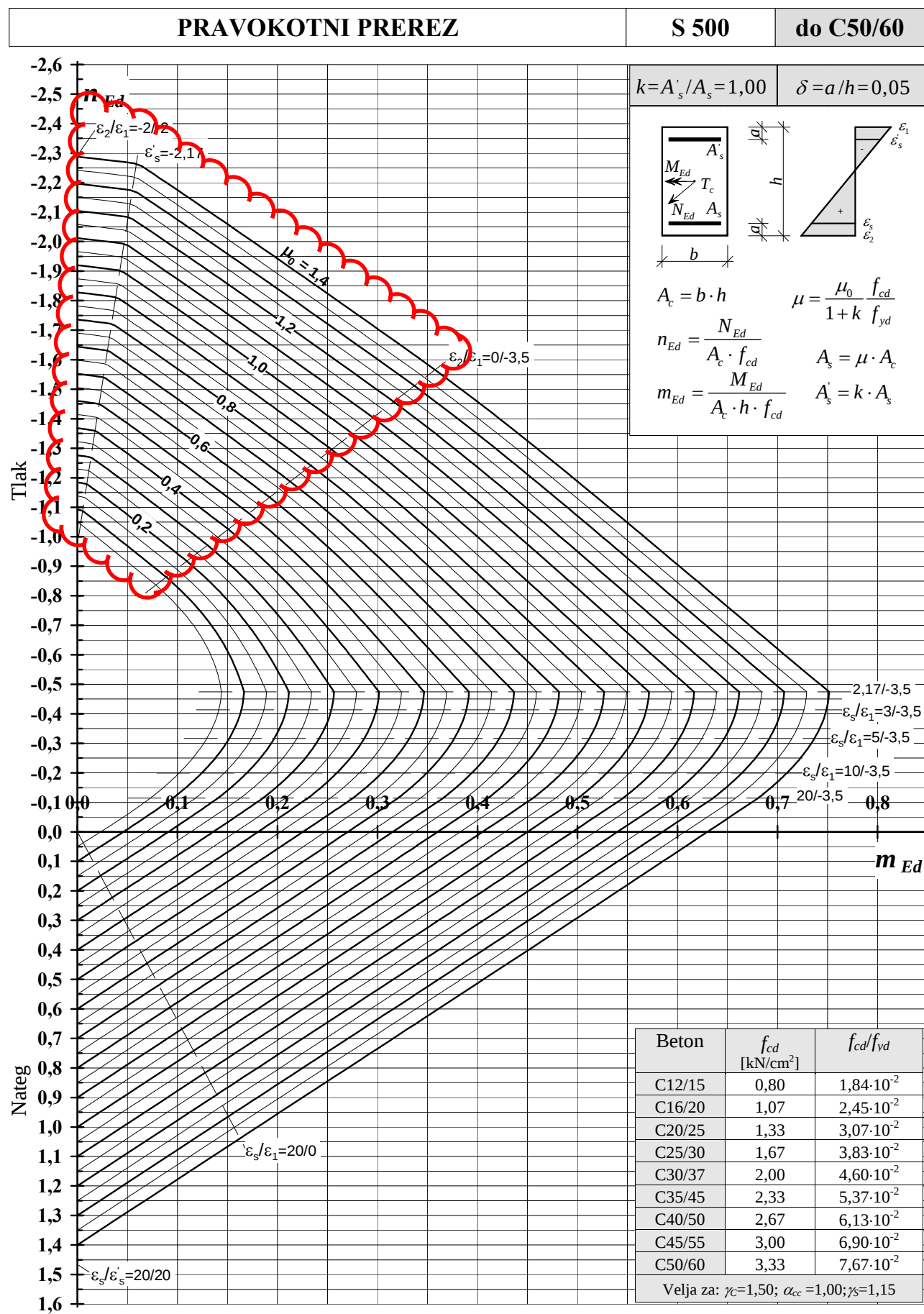
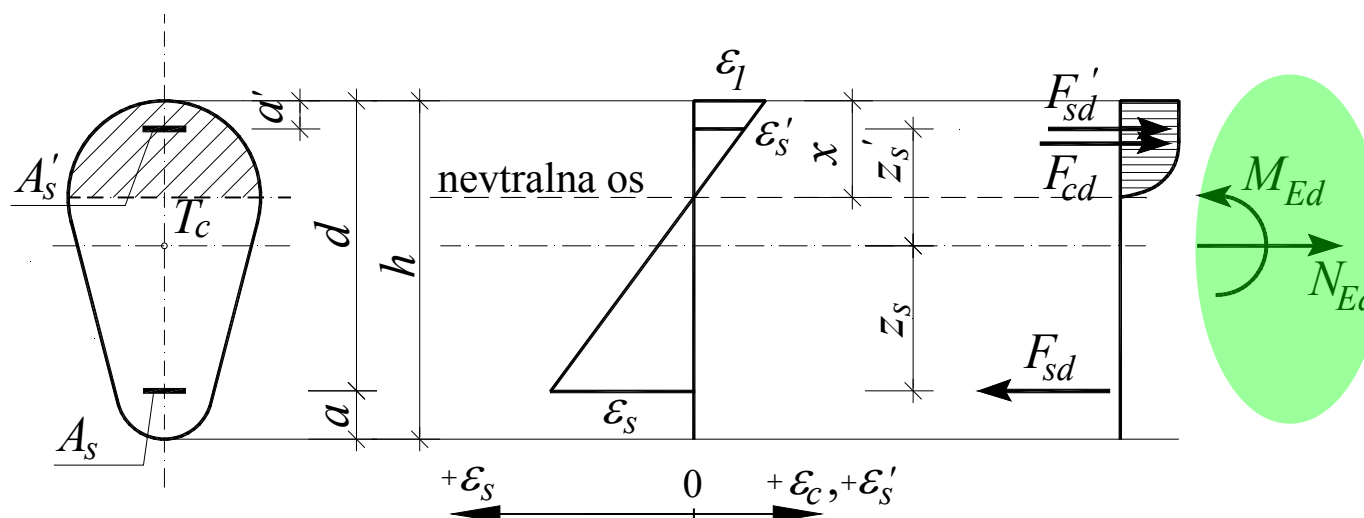


Diagram 1

Enojni upogib z ali brez osne sile - velika ekscentričnost

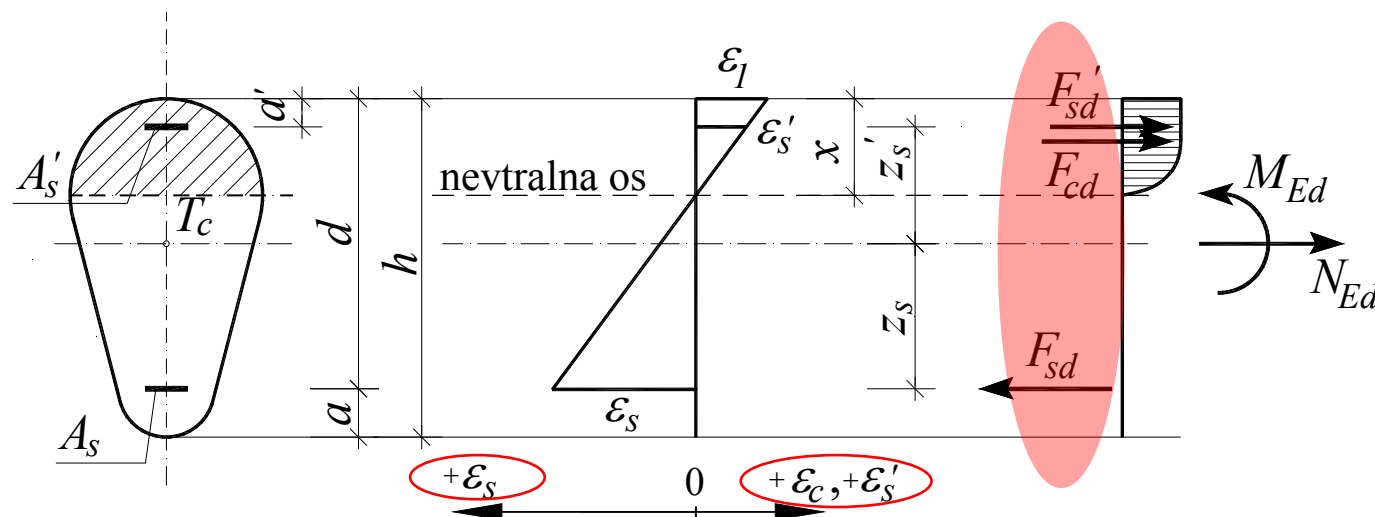
Obravnavamo splošen primer obremenitve prereza:

- $M_{Ed} > 0$ in:
- $N_{Ed} > 0$ (natezna osna sila)
 - $N_{Ed} < 0$ (tlačna osna sila)
 - $N_{Ed} = 0$ (čisti upogib)



Dvojno armirani prerezi: $A_s \neq 0$, $A_s' \neq 0$

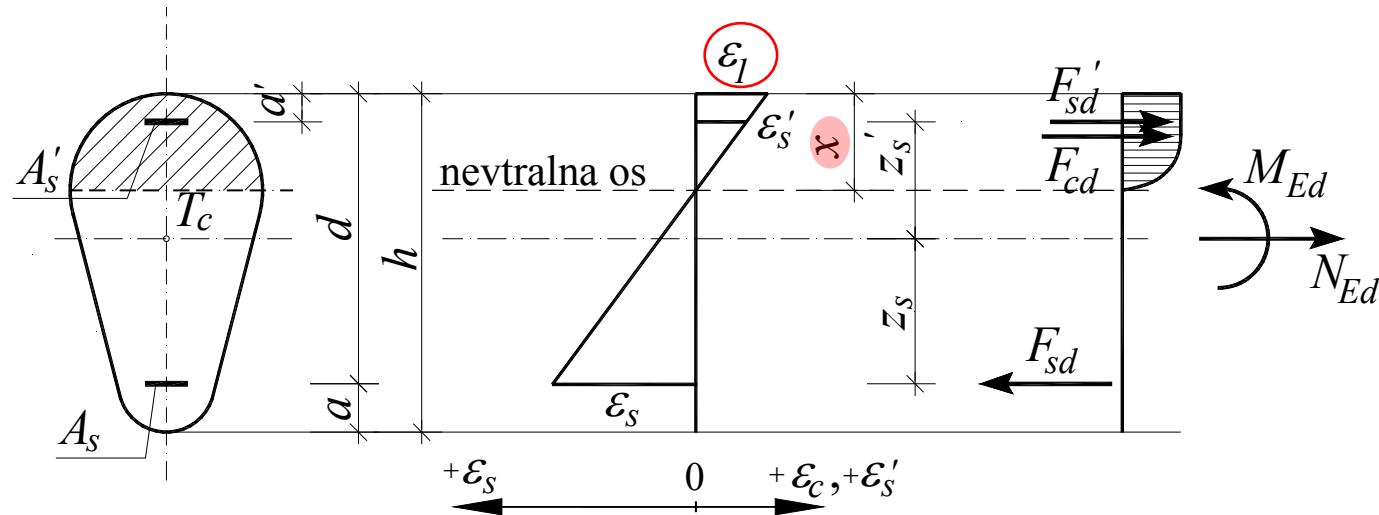
Enojno armirani prerezi: $A_s \neq 0$, $A_s' = 0$



V izpeljavah upoštevamo:

- deformacije in napetosti betona kakor tudi deformacije in napetosti armature **s pozitivnimi vrednostmi**
- temu ustrezno so **rezultirajoče sile F_{cd} , F_{sd} in F'_{sd}** , ki predstavljajo odpornost prereza **le pozitivne**, na slikah pa je vedno prikazana njihova pravilna smer delovanja.

Pri veliki ekscentričnosti osne sile → nevtralna os deformacij znotraj prereza

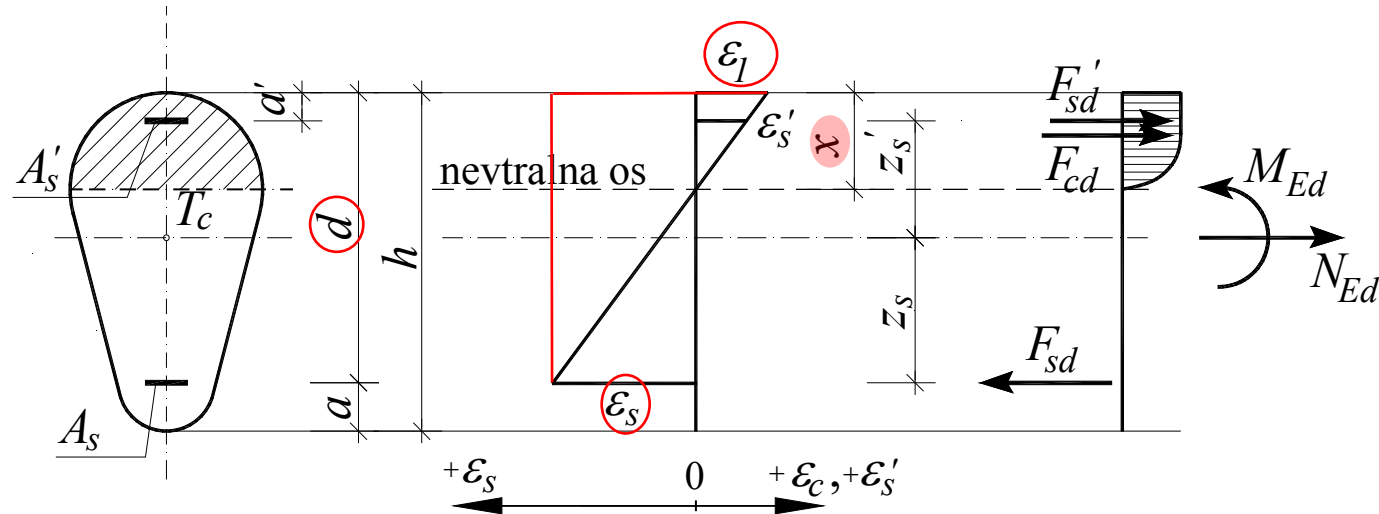


Višino tlačene cone x izrazimo s pomočjo deformacij:

$$\frac{\varepsilon_l}{x} = \frac{\varepsilon_l + \varepsilon_s}{d} \rightarrow x = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_l + \varepsilon_s} d$$

Višino tlačne cone pogosto zapišemo s pomočjo **koeficienta višine tlačne cone k_x** :

$$\boxed{x = k_x \cdot d}, \quad k_x = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_l + \varepsilon_s} = \frac{1}{1 + \varepsilon_s / \varepsilon_l}$$



Višino tlačene cone x izrazimo s pomočjo deformacij:

$$\frac{\varepsilon_l}{x} = \frac{\varepsilon_l + \varepsilon_s}{d} \rightarrow x = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_l + \varepsilon_s} d$$

Višino tlačne cone pogosto zapišemo s pomočjo **koeficienta višine tlačne cone k_x** :

$$\boxed{x = k_x \cdot d}, \quad k_x = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_l + \varepsilon_s} = \frac{1}{1 + \varepsilon_s / \varepsilon_l}$$

Koeficient višine tlačne cone **je osnovni pokazatelj duktilnosti prerezov** (možnost plastifikacije armature pred izčrpanjem nosilnosti betona - izogibamo se krhkim porušitvam betona).

Pogoj plastifikacije armature ($\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}$) ob hkratni polni izkoriščenosti betona ($\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$) **omejuje vrednost koeficienta višine tlačne cone navzgor:**

$$k_x \leq \frac{1}{1 + \varepsilon_{yd} / \varepsilon_{cu2}}$$

Betoni normalne trdnosti: $\varepsilon_{cu2} = 3,5\text{‰}$

Jeklo S500: $\varepsilon_{yd} = 500 / (1,15 \cdot 20000) = 0,00217 = 2,17\text{‰}$

$$k_x \leq \frac{1}{1 + 2,17 / 3,5} = 0,62$$

V standardu SIST EN 1992-1-1 so v povezavi z **drugimi načini analize notranjih sil** podane tudi bolj stroge omejitve razmerja:

- **Linearna analiza z omejeno prerazporeditvijo notranjih sil:** razmerje $k_x = x / d$ je omejeno v odvisnosti od koeficienta prerazporeditve δ , ki je definiran kot razmerje med momentom po prerazporeditvi in momentom po teoriji elastičnosti ($\delta \leq 1$).

- Pri **plastični analizi** ni potrebno posebej dokazovati rotacijske sposobnosti pri $k_x = x / d \leq 0,25$ za $\leq C50/60$ in

$$k_x = x / d \leq 0,15 \text{ za } \geq C55/67$$

sicer pa velja splošna omejitev tudi, če se dokazuje rotacijska sposobnost:

$$k_x = x / d \leq 0,45 \text{ za } \leq C50/60 \text{ in}$$

$$k_x = x / d \leq 0,35 \text{ za } \geq C55/67.$$

Običajna linearna analiza, pri kateri standard SIST EN 1992-1-1 ne podaja dodatnih omejitev glede višine tlačne cone:

- izogibamo se pretirano **visokim stopnjam armiranja** z natezno armaturo. To lahko pri upogibnih elementih dosežemo s smiselno **omejitvijo koeficienta višine** tlačne cone na $k_x = x / d \leq 0,45$ pri betonih normalne trdnosti (do C50/60) oziroma na $k_x = x / d \leq 0,35$ pri betonih visoke trdnosti.

Betoni normalne trdnosti: $\varepsilon_{cu2} = 3,5\text{‰}$; $k_x \leq 0,45$ $\varepsilon_s = ?$

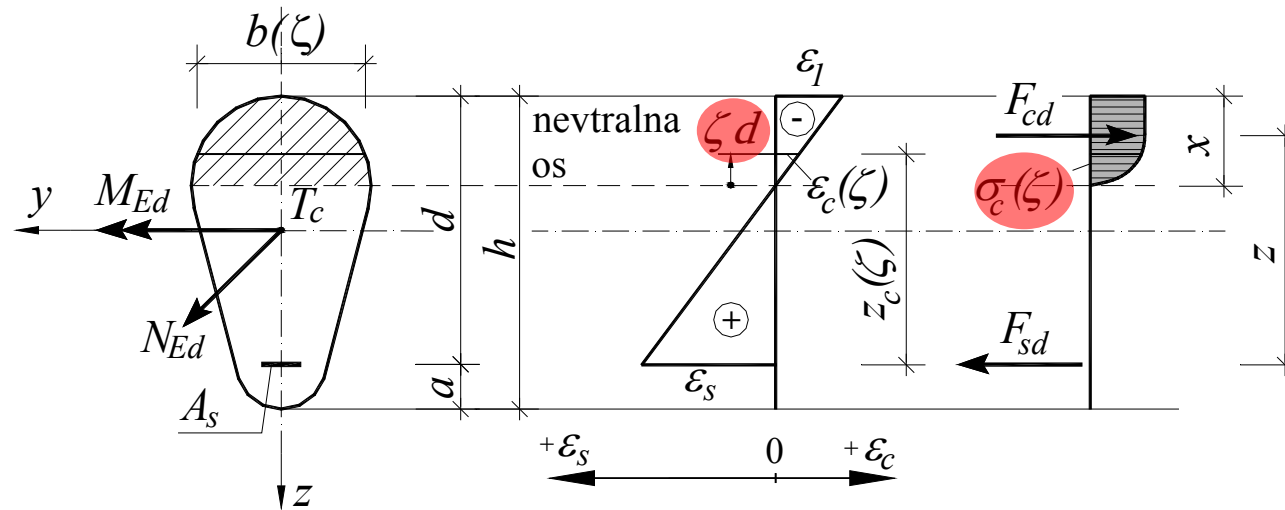
$$k_x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_s} = \frac{1}{1 + \varepsilon_s / \varepsilon_1} = \frac{1}{1 + \varepsilon_s / 3,5} \leq 0,45 \rightarrow \boxed{\varepsilon_s \geq 4,27\text{‰}}$$

Povzetek za upogibne elemente iz betonov običajne trdnosti in jekla S500:

Osnovno zagotavljanje duktilnosti prerezov - vsaj plastifikacija jekla: $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} = 2,17\text{‰}$ ($k_x \leq 0,62$).

Po možnosti pa upoštevati bolj strogo omejitev: $\varepsilon_s \geq 4,27\text{‰}$ ($k_x \leq 0,45$).

Osnovni parametri osno-upogibne odpornosti poljubnih enojno armiranih prerezov



Enojno armirani prerez - velika ekscentričnost (oznake za izpeljavo izrazov)

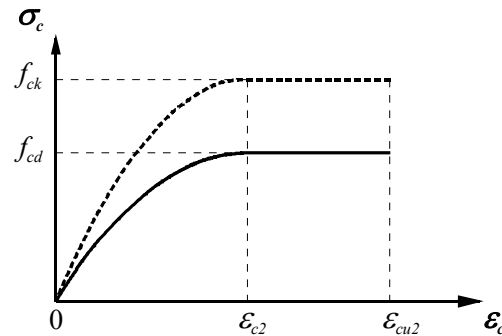
Vpeljemo brezdimenzionalno koordinato ζ z izhodiščem v višini nevtralne osi

Deformacija betona na poljubnem mestu $\varepsilon_c(\zeta)$:

$$\frac{\varepsilon_l}{x} = \frac{\varepsilon_c(\zeta)}{\zeta \cdot d} \rightarrow \varepsilon_c(\zeta) = \frac{\varepsilon_l \cdot \zeta \cdot d}{x} = \frac{\varepsilon_l \cdot \zeta}{k_x}; \quad 0 \leq \zeta \leq k_x$$

Napetosti betona v odvisnosti od brezdimenionalne koordinate ζ :

Osnovni delovni diagram za dimenzioniranje prerezov (parabola-premica)



$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} : \quad \sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

$$\varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} : \quad \sigma_c = f_{cd}$$

Betoni običajne trdnosti $\leq C50/60$:

$$\varepsilon_{c2} = 2\text{‰}; \quad \varepsilon_{cu2} = 3,5\text{‰}; \quad n = 2$$

Za višje trdnostne razrede druge vredn.

*Osnovni delovni diagram betona za
dimenzioniranje prerezov*

Meji deformacij $\varepsilon_c = \varepsilon_{c2}$ ustreza naslednja koordinata ζ :

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{k_x} = \varepsilon_{c2} \rightarrow \zeta = \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_1} k_x = k_{x2}$$

$$0 \leq \zeta \leq k_{x2}: \quad \sigma_c(\zeta) = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \text{ oZ. } \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right]$$

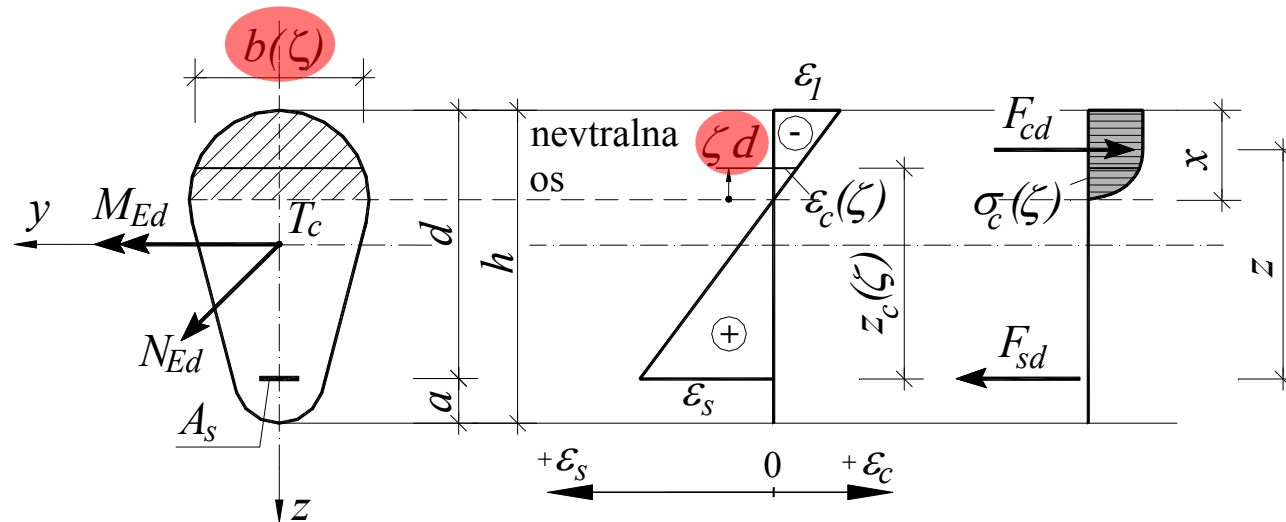
$$k_{x2} < \zeta \leq k_x: \quad \sigma_c(\zeta) = f_{cd} \quad \text{oZ.} \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = 1$$

Napetosti betona zapisane s pomočjo normiranih vrednosti:

$$\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot f_{cd}$$

Vpeljemo še oblikovno funkcijo $\beta(\zeta)$ s katero opišemo potek širine betonskega prereza v tlačni coni:

$$\beta(\zeta) = \frac{b(\zeta)}{\bar{b}} \rightarrow b(\zeta) = \beta(\zeta) \cdot \bar{b}$$



$\bar{b}$ - poljubna smiselno izbrana primerjalna širina $\rightarrow$ pogosto je to največja širina prereza.

Rezultanto napetosti v betonu F_{cd} dobimo z **integracijo napetosti betona** po prerezu betona:

$$F_{cd} = \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) \cdot dA$$

$$dA = b(\zeta) \cdot d \cdot d\zeta = \bar{b} \cdot \beta(\zeta) \cdot d \cdot d\zeta$$

$$\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot f_{cd}$$

$$F_{cd} = \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) \cdot dA = \int_0^{k_x} f_{cd} \cdot \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \bar{b} \cdot \beta(\zeta) \cdot d \cdot d\zeta = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d \cdot \int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta.$$

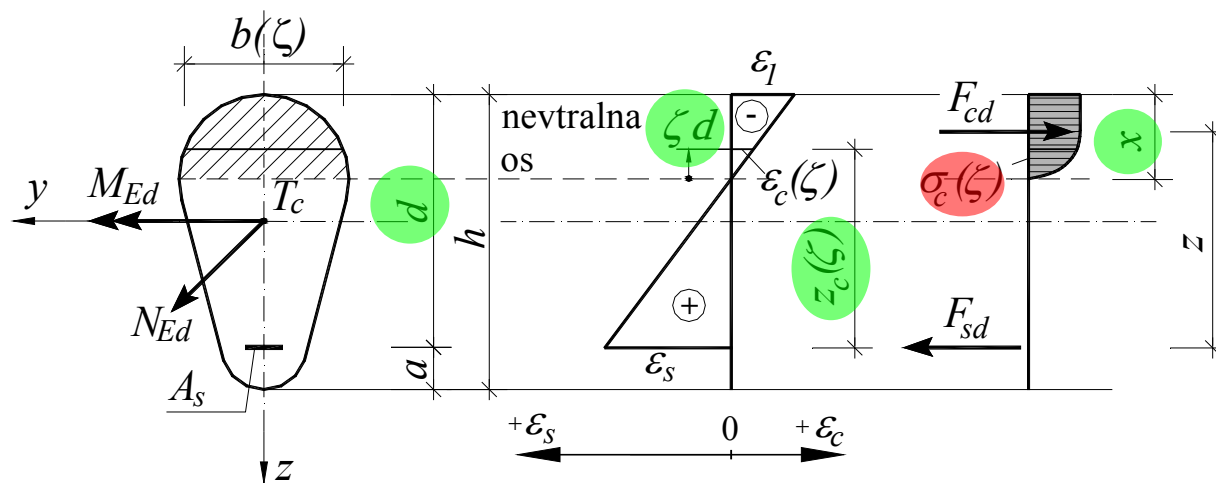
Integracijsko območje moramo praviloma razdeliti na dve območji:

$$0 \leq \zeta \leq k_{x2} \quad \text{ter} \quad k_{x2} < \zeta \leq k_x.$$

Z upoštevanjem poteka normiranih napetosti $\bar{\sigma}_c$ dobimo:

$$F_{cd} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d \cdot \left\{ \int_0^{k_{x2}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_x} \beta(\zeta) \cdot d\zeta \right\}.$$

Statični moment napetosti betona σ_c k težišču natezne armature dobimo z naslednjo integracijo:



$$M_{cd,s} = \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) \cdot z_c(\zeta) \cdot dA$$

Upoštevamo: $z_c = d - x + \zeta \cdot d = (1 - k_x + \zeta) \cdot d$; $dA = b(\zeta) \cdot d \cdot d\zeta = \bar{b} \cdot \beta(\zeta) \cdot d \cdot d\zeta$ $\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot f_{cd}$

$$M_{cd,s} = \int_0^{k_x} f_{cd} \cdot \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot d \cdot \bar{b} \cdot \beta(\zeta) \cdot d \cdot d\zeta = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot \int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot d\zeta$$

k_d - brezdimenzionalni koeficient upogibne nosilnosti betonskega dela prereza:

$$M_{cd,s} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot k_d$$

$$k_d = \int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot d\zeta$$

Integracijsko območje moramo praviloma **razdeliti na dve podobmočji**:

$$0 \leq \zeta \leq k_{x2} \quad \text{ter} \quad k_{x2} < \zeta \leq k_x.$$

Z upoštevanjem poteka normiranih napetosti $\bar{\sigma}_c$:

$$0 \leq \zeta \leq k_{x2}: \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right]$$

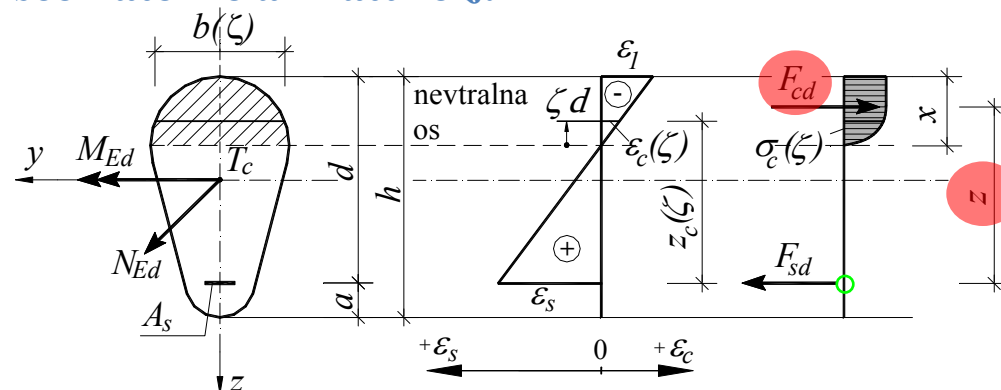
$$k_{x2} < \zeta \leq k_x: \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = 1$$

dobimo končno obliko izraza za koeficient k_d :

$$k_d = \int\limits_{\textcircled{0}}^{\textcircled{k_{x2}}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta + \int\limits_{\textcircled{k_{x2}}}^{\textcircled{k_x}} (1 - k_x + \zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta$$

Ročica rezultante napetosti betona glede na težišče natezne armature z :

$$M_{cd,s} = F_{cd} \cdot z \rightarrow z = \frac{M_{cd,s}}{F_{cd}}$$



$$z = \frac{M_{cd,s}}{F_{cd}} = \frac{\cancel{f_{cd}} \cdot \cancel{\bar{b}} \cdot d^2 \cdot \int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot d\zeta}{\cancel{f_{cd}} \cdot \cancel{\bar{b}} \cdot d \cdot \int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta} = \frac{\int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot d\zeta}{\int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta} \cdot d = k_z \cdot d$$

Koeficient ročice rezultante napetosti betona glede na težišče natezne armature $k_z = z / d$:

$$k_z = \frac{\int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot d\zeta}{\int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta}$$

oz.

$$k_z = \frac{k_d}{\int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta}$$

Z upoštevanjem ustreznih integracijskih področij in poteka normiranih napetosti $\bar{\sigma}_c$:

$$0 \leq \zeta \leq k_{x2} \quad \text{ter} \quad k_{x2} < \zeta \leq k_x.$$

Z upoštevanjem poteka normiranih napetosti $\bar{\sigma}_c$:

$$0 \leq \zeta \leq k_{x2}: \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right]$$

$$k_{x2} < \zeta \leq k_x: \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = 1$$

dobimo končno obliko izraza za koeficient k_z :

$$k_z = \frac{\int_0^{k_{x2}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \cdot (1 - k_x + \zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_x} (1 - k_x + \zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta}{\int_0^{k_{x2}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_x} \beta(\zeta) \cdot d\zeta}$$

Predhodno podani izrazi so podlaga za izdelavo **enostavnih pripomočkov za praktično dimenzioniranje prerezov:**

Za različne mejne lege deformacijske ravnine $\varepsilon_1 / \varepsilon_s$ izračunamo pripadajoče koeficiente:

- k_d ,
- k_x in
- $k_z \rightarrow$ običajno podan v obliki $k_s = 1 / k_z$

in jih zapišemo v obliki preglednic.

Preglednice vnaprej pripravimo za različne oblike prerezov:

- pravokotnik,
- »T« oz. »I« prereze, ki jih opišemo s parametri oblike.

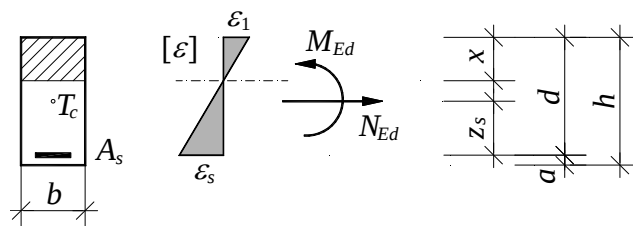
Pri **betonih visoke trdnosti** moramo zaradi različnih mejnih deformacij ε_{c2} , ε_{cu2} in eksponenta n **pripraviti (in uporabljati) za vsak trdnostni razred ločene pripomočke.**

Pr. P1-1. Velika ekscentričnost – enojna armatura: vsi trdnostni razredi betona (pri $\varepsilon_l = \varepsilon_{cu2}$)

$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

$$k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \rightarrow k_s \text{ in } k_x$$

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s}; \quad x = k_x \cdot d$$



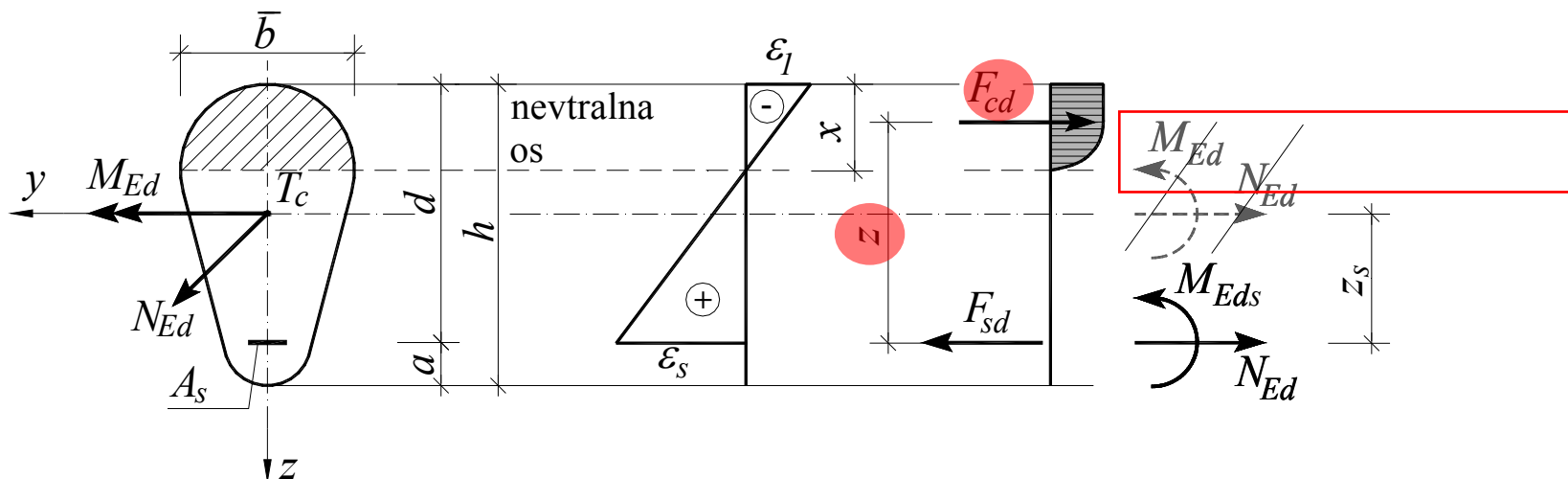
Armatura			ε_s [‰]		Beton					
S 500-A	S 500-B	S 500			≤ C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
σ_s [kN/cm ²]	σ_s [kN/cm ²]	σ_s [kN/cm ²]			ε_l [‰]	ε_l [‰]	ε_l [‰]	ε_l [‰]	ε_l [‰]	ε_l [‰]
					-3,5	-3,1	-2,9	-2,7	-2,6	-2,6
30,00	30,00	30,00	1,5	k_x	0,700	0,674	0,659	0,643	0,634	0,634
				k_s	1,411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

Izrazi za določitev potrebne natezne armature enojno armiranih prerezov:

Projektna obremenitev glede na težišče natezne armature:

$$N_{Eds} = N_{Ed}$$

$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$



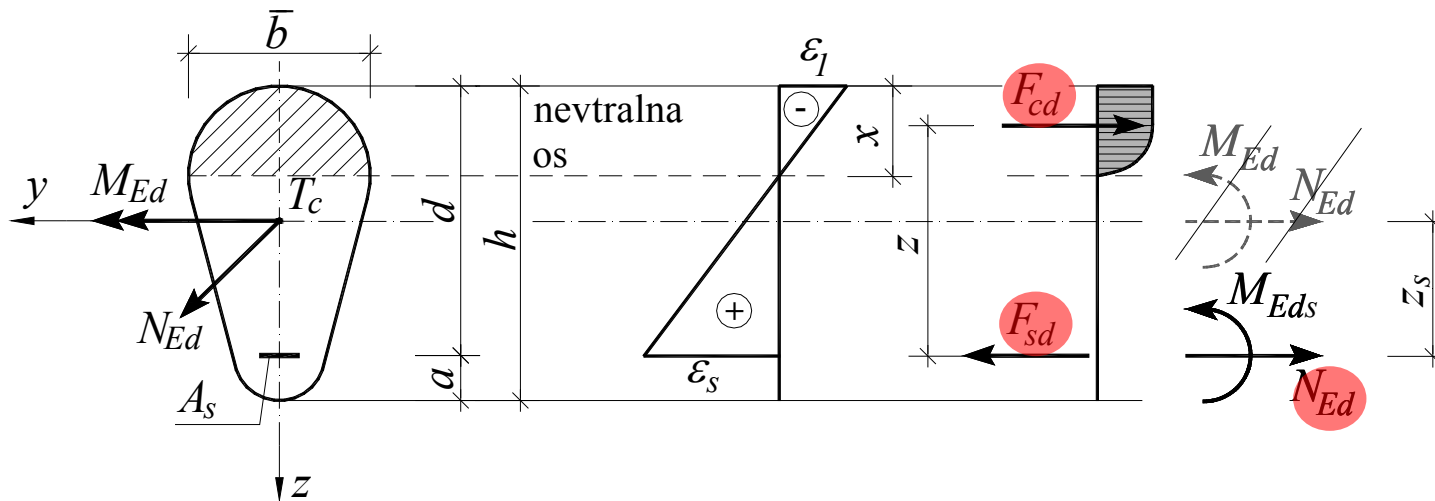
Ravnotežje momentov glede na težišče natezne armature:

$$F_{cd} \cdot z - M_{Eds} = 0 \rightarrow F_{cd} \cdot z = M_{Eds}$$

$$F_{cd} \cdot z = M_{cd,s} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot k_d = M_{Eds} \rightarrow$$

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

Ravnotežje vseh sil v prerezu:



$$F_{sd} - F_{cd} - N_{Ed} = 0 \rightarrow F_{sd} = F_{cd} + N_{Ed}.$$

momentni ravnotežni pogoj $F_{cd} \cdot z = M_{Eds}$

oznaka $k_s = 1 / k_z$

→ potrebna sila v armaturi:

$$F_{sd} = F_{cd} + N_{Ed} = \frac{M_{Eds}}{z} + N_{Ed} = \frac{M_{Eds}}{k_z \cdot d} + N_{Ed} = k_s \frac{M_{Eds}}{d} + N_{Ed}.$$

Potrebni prerez natezne armature:

$$A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s(\varepsilon_s)} = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot \sigma_s(\varepsilon_s)} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s(\varepsilon_s)}.$$

Zagotavljanje vsaj osnovne duktilnosti prerezov: :

$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_s(\varepsilon_s) = f_{yd}$ (poenostavljeni delovni diagram armature brez utrditve)

→ **Potrebna natezna armatura enojno armiranega prereza.**

$$A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}} = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

pogoj: $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}$

Praktična uporaba preglednic s koeficienti za dimenzioniranje:

- Na podlagi izračunanega koeficienta $k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2}$ odčitamo:
 - ustrezne deformacije $\varepsilon_1 / \varepsilon_s$
 - ter pripadajoča koeficienta k_x in k_s .
- S poznanim koeficientom k_s določimo potrebno natezno armaturo A_s :

$$A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}} = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

- koeficient k_x uporabimo za preverjanje primernosti rešitve:

$$k_x \leq k_{x,\max}$$

$$k_x \leq k_{x,\max}$$

$k_{x,\max}$ - **zgornja sprejemljiva vrednost koeficienta višine tlačene** cone glede zagotavljanja duktilnosti prerezov (pri izkoriščenem betonu, to je pri $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$)

- **osnovna zahteva (plastifikacija armature)** pri betonih običajne trdnosti in S500:

$$k_{x,\max} = 0,62$$

- **priporočljivo upoštevati strožjo omejitev**, ki preprečuje močno armirane prereze: :

$$k_{x,\max} = 0,45 \text{ pri betonih normalne trdnosti in.}$$

$$k_{x,\max} = 0,35 \text{ pri betonih visoke trdnosti}$$

V primeru, ko pri polni izkoriščenosti betona, to je pri deformacijah $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$, koeficient globine tlačne cone k_x , ki pripada koeficientu $k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2}$, presega vrednost $k_{x,max}$:

$$k_x > k_{x,max}$$

prereza pri danih dimenzijah **ne moremo armirati le z natezno armaturo.**

Ukrepamo lahko na naslednji način:

- **povečamo dimenzije betonskega prereza** (pomembna predvsem tlačna cona), v tem primeru bo prerez morda lahko tudi enojno armiran ali
- tlačno cono betona razbremenimo z **namestitvijo tlačne armature** A_s' ,
- ali pa **kombiniramo oba predhodna ukrepa.**

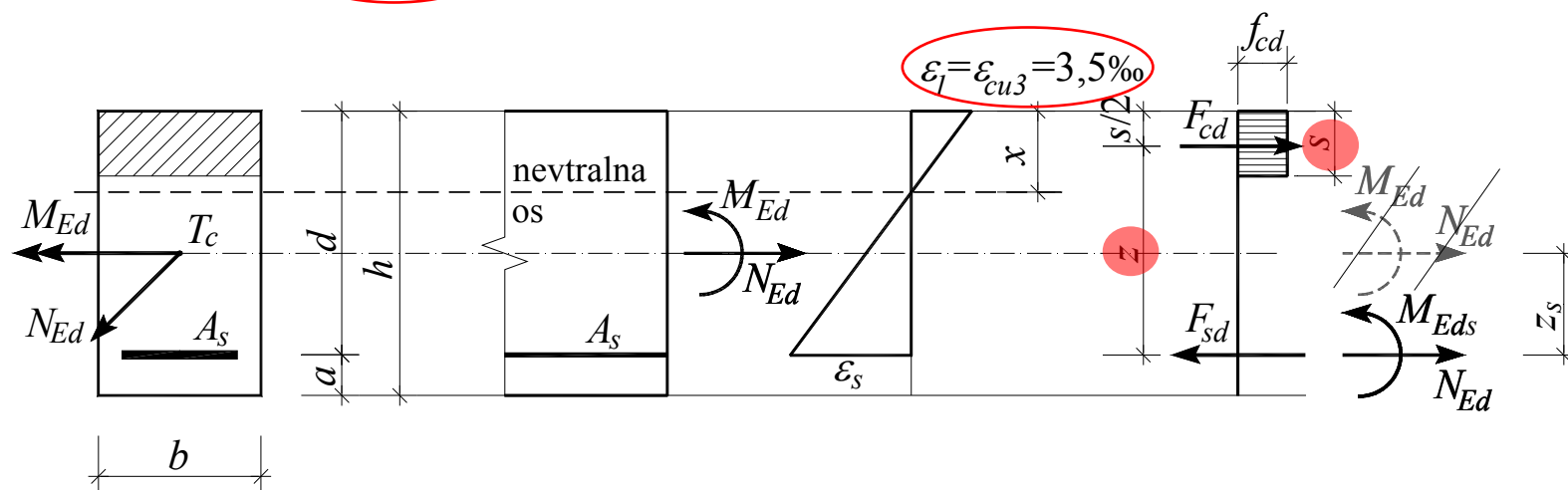
Zvezo med koeficientoma k_d in k_s :

$$k_z = \frac{1}{k_s} = \frac{k_d}{\int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta}$$

pri uporabi preglednic za dimenzioniranje prerezov **upoštevamo posredno** z uporabo koeficienta k_s , **ki ga odčitamo na podlagi izračunane vrednosti koeficienta odpornosti betona k_d .**

Neposredni izrazi za dimenzioniranje pravokotnih prerezov z upoštevanjem poenostavljenega delovnega diagrama betona s konstantno napetostjo po delu tlačne cone

Betoni običajne trdnosti ($\leq C50/60$): velja: $\lambda = 0,8$ in $\eta = 1,0$



Projektna obremenitev glede na težišče natezne armature:

$$N_{Eds} = N_{Ed}$$

$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

Rezultanta napetosti betona:

$$F_{cd} = s \cdot b \cdot f_{cd}$$

Višina betona s s konstantno napetostjo:

$$z = d - s / 2 \rightarrow s = 2 \cdot (d - z)$$

Po standardu SIST EN 1992-1-1 je pri računu mejne nosilnosti armiranobetonskih prerezov dovoljeno upoštevati tudi

- **bilinearni delovni diagram** betona

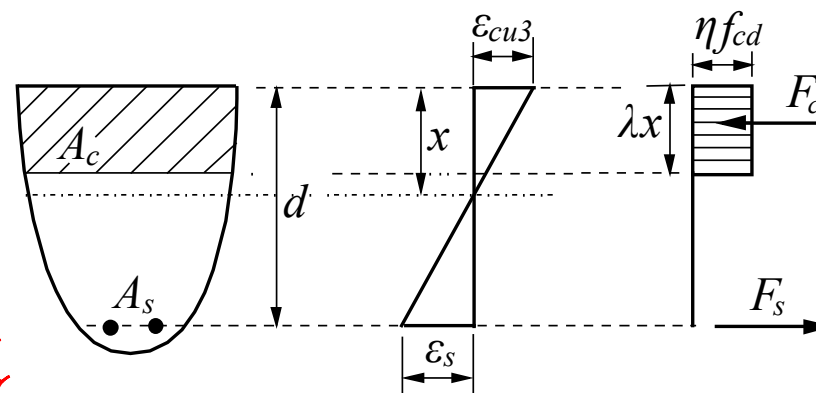
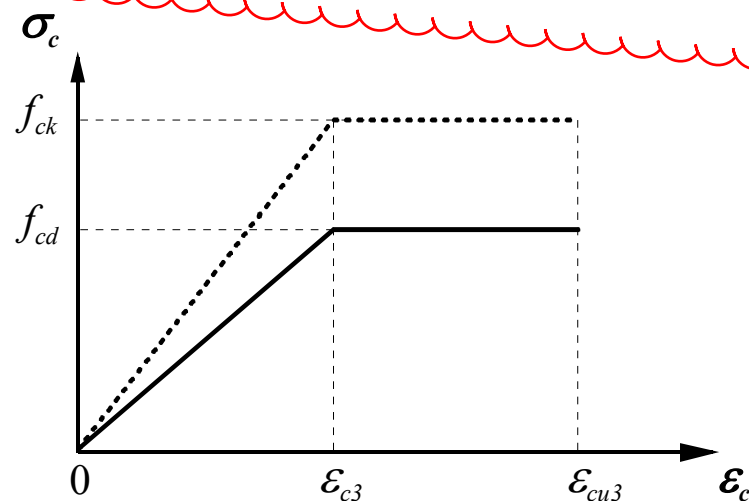
- za področje velike ekscentričnosti osne sile, ko je nevtralna os deformacij znotraj prereza ($x < d$), pa tudi **reducirano konstantno napetost** $\eta \cdot f_{cd}$ na reducirani višini tlačne cone $\lambda \cdot x$.

Pri tem so vrednosti parametrov naslednje:

$$\lambda = 0,8 \quad \text{in} \quad \eta = 1,0$$

$$\text{za } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa,}$$

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \quad \text{in} \quad \eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200 \quad \text{za } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$$

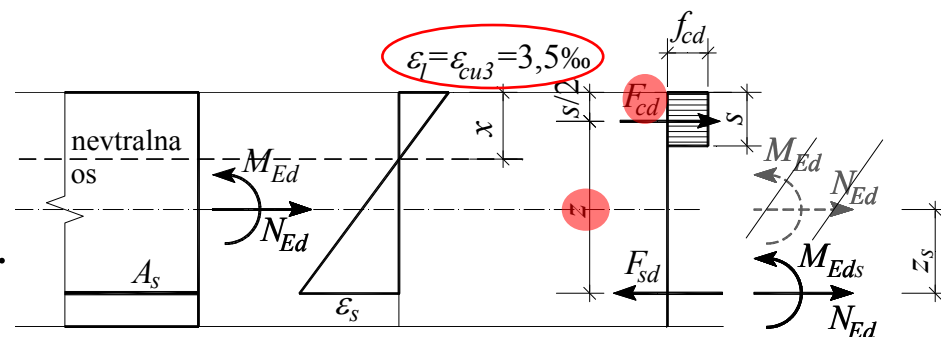


Ravnotežje momentov na težišče natezne armature:

$$F_{cd} \cdot z - M_{Eds} = 0 \rightarrow F_{cd} \cdot z = M_{Eds}.$$

$$F_{cd} = s \cdot b \cdot f_{cd}; \quad s = 2 \cdot (d - z):$$

$$F_{cd} \cdot z = s \cdot b \cdot f_{cd} \cdot z = 2 \cdot (d - z) \cdot b \cdot f_{cd} \cdot z = M_{Eds}.$$



Gornji izraz preuredimo in dobimo:

$$2 \cdot (z/d)^2 - 2 \cdot (z/d) + \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0$$

$$\frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = k_d \quad z/d = k_z$$

$$k_z^2 - k_z + k_d / 2 = 0.$$

Izmed dveh rešitev kvadratne enačbe je smiselna:

$$k_z = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,5k_d}.$$

Ročica sile v betonu z :

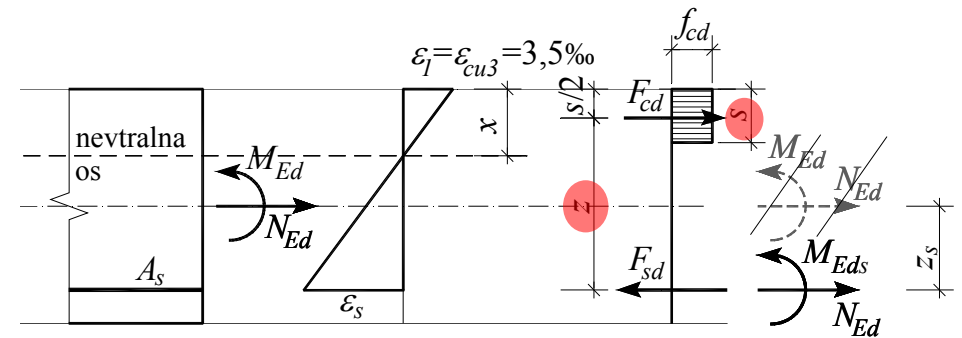
$$z = k_z \cdot d = \left(0,5 + \sqrt{0,25 - 0,5k_d}\right) \cdot d$$

Višina tlačne cone x :

Izhodišče: $s = 2 \cdot (d - z) = 0,8x$

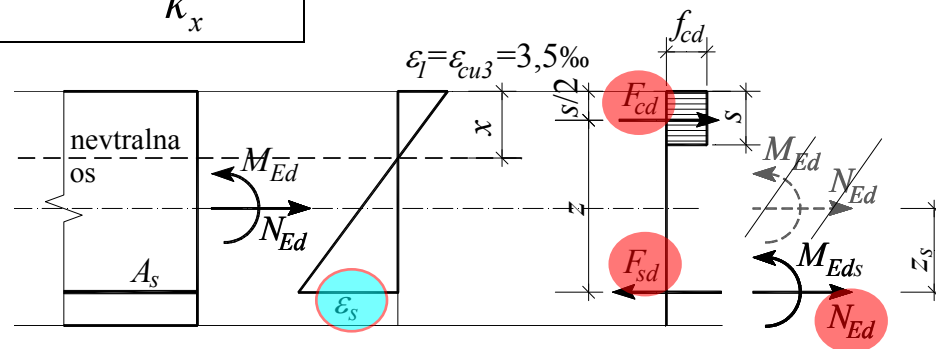
$$x = 2,5 \cdot \left(0,5 - \sqrt{0,25 - 0,5k_d}\right) \cdot d = k_x \cdot d \rightarrow$$

$$k_x = 2,5 \cdot \left(0,5 - \sqrt{0,25 - 0,5k_d}\right)$$



Pripadajočo **deformacijo natezne armature** določimo iz pogoja:

$$\frac{\varepsilon_{cu3}}{x} = \frac{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_s}{d} \rightarrow \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_s} = k_x \rightarrow \boxed{\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3}(1 - k_x)}{k_x}}$$



Potrebna sila v armaturi - pogoj ravnotežja vseh sil v prerezu:

$$F_{sd} - F_{cd} - N_{Ed} = 0 \rightarrow F_{sd} = F_{cd} + N_{Ed}$$

$$F_{cd} \cdot z = M_{Eds} \quad k_z = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,5k_d}$$

$$F_{sd} = F_{cd} + N_{Ed} = \frac{M_{Eds}}{z} + N_{Ed} = \frac{M_{Eds}}{(0,5 + \sqrt{0,25 - 0,5k_d}) \cdot d} + N_{Ed}$$

Potrební prerez natezne armature:

$$\boxed{A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s(\varepsilon_s)} = \frac{M_{Eds}}{(0,5 + \sqrt{0,25 - 0,5k_d}) \cdot d \cdot \sigma_s(\varepsilon_s)} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s(\varepsilon_s)}}$$

Izrazi za praktično dimenzioniranje:

Osnovna zahteva po duktilnosti- vsaj plastifikacija jekla:

$$S\ 500: \varepsilon_{cu3} = 3,5\text{‰} \quad \varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} = 2,17\text{‰} \rightarrow k_x \leq 0,62 \quad \text{oz. } k_d \leq k_d(k_s=0,62)=\mathbf{0,372}$$

$$\sigma_s(\varepsilon_s) = f_{yd}$$

Delovni diagram brez utrditve!

Za dimenzioniranje pravokotnih prereзов iz običajnih betonov **potrebujemo le dva izraza:**

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

Z omejitvijo (plastifikacija jekla):

$$k_d \leq 0,372$$

$$A_s = \frac{M_{Eds}}{\left(0,5 + \sqrt{0,25 - 0,5k_d}\right) \cdot d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

Bolj strogo **omejitve glede duktilnosti** zajamemo z bolj strogo omejitvijo za koeficient k_d :

$$\text{za } k_x \leq 0,45 \rightarrow k_d \leq 0,295$$

Osno-upogibna odpornost dvojno armiranih prerezov poljubne oblike

Ko pri **polni izkoriščenosti betona**: $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$, koeficient globine tlačne cone k_x (k_d)

$$k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2} \rightarrow k_x, \quad \text{presega vrednost } k_{x,max} : \quad k_x > k_{x,max}$$

prereza pri danih dimenzijah **ne moremo armirati le z natezno armaturo**.

Ena od možnosti je, da tlačno cono betona razbremenimo **z namestitvijo tlačne armature A_s'** .

$k_{x,max}$ - **zgornja sprejemljiva vrednost koeficienta višine tlačne cone** glede zagotavljanja duktilnosti prerezov (pri izkoriščenem betonu, to je pri $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$)

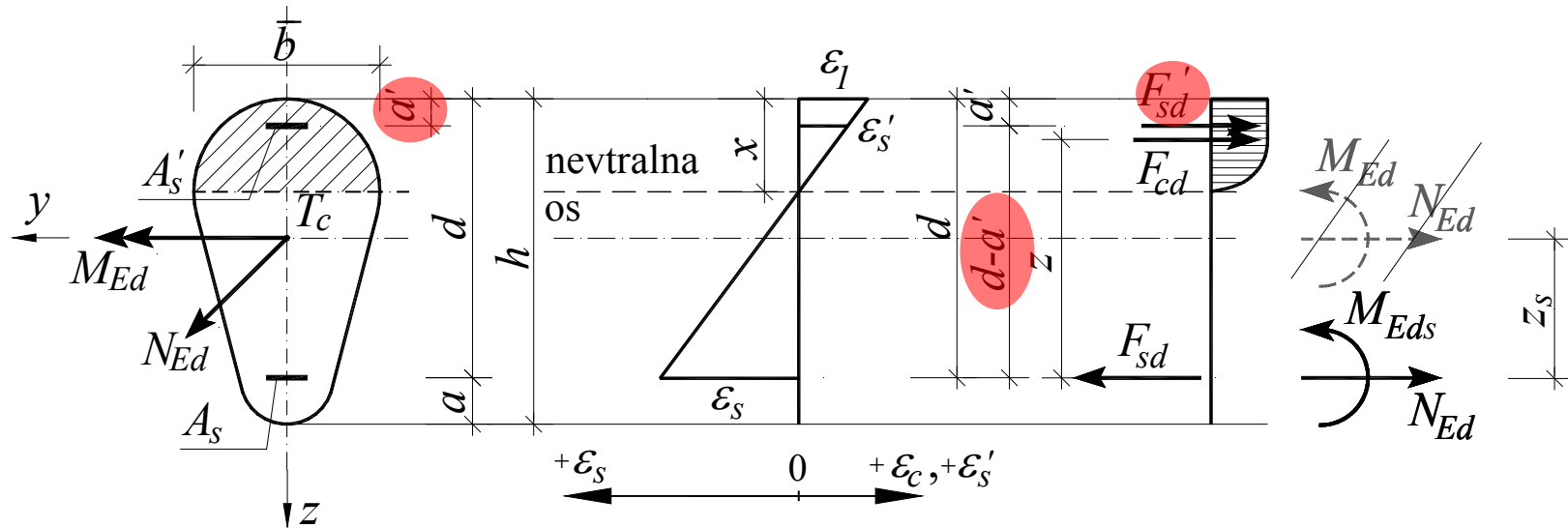
- **osnovna zahteva (plastifikacija armature)** pri betonih običajne trdnosti in S500:

$$k_{x,max} = 0,62$$

- **priporočljivo upoštevati strožjo omejitev**, ki preprečuje močno armirane prereze: :

$$k_{x,max} = 0,45 \quad \text{pri betonih normalne trdnosti in.}$$

$$k_{x,max} = 0,35 \quad \text{pri betonih visoke trdnosti}$$



Dvojno armirani prerez - velika ekscentričnost

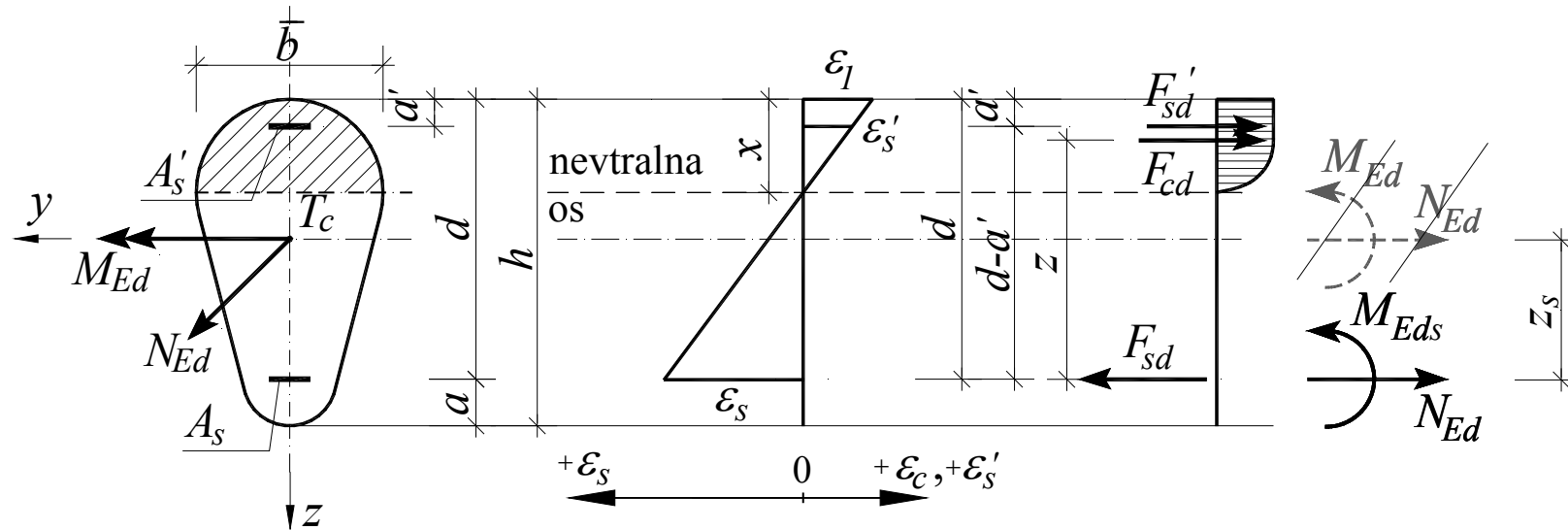
Obremenitev prereza zapišemo glede na težišče natezne armature:

$$N_{Eds} = N_{Ed} \quad \text{in} \quad M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

Tlačena cona:

- rezultanta napetosti v betonu F_{cd} in
- rezultanta **napetosti v tlačeni armaturi** F'_{sd} ;

$$\delta = a' / d$$



- Ravnotežje momentov glede na težišče natezne armature:**

$$F_{cd} \cdot z + F'_{sd} \cdot (d - a') - M_{Eds} = 0 \rightarrow F'_{sd} = \frac{M_{Eds} - F_{cd} \cdot z}{(d - a')}$$

$$F'_{sd} = \frac{M_{Eds} - F_{cd} \cdot z}{d \cdot (1 - \delta)}$$

- Ravnotežje vseh sil v prerezu:**

$$F_{cd} + N_{Ed} + F'_{sd} - F_{sd} = 0 \rightarrow$$

$$F_{sd} = F_{cd} + N_{Ed} + F'_{sd}$$

Predpostavimo, da so **deformacije prereza poznane** in **določene z deformacijo betona ε_l in deformacijo natezne armature ε_s** .

Količine, ki se nanašajo na **enojno armirani prerez pri teh deformacijah zapišemo kot:**

Koeficient izkoriščenosti tlačne cone: $\varepsilon_l / \varepsilon_s \rightarrow [k_d] = k_d (\varepsilon_l / \varepsilon_s)$ za enojno armaturo

$$F_{cd} \cdot z = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d] = [M_{Eds}] \rightarrow [M_{Eds}] = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d]$$

$$\rightarrow F_{cd} \cdot z = [M_{Eds}] \text{ oziroma } F_{cd} = \frac{[M_{Eds}]}{z}.$$

$[M_{Eds}]$ - del upogibnega momenta k težišču natezne armature, ki ga lahko prerez prevzame (pri znanih deformacijah ε_l in ε_s) **glede na nosilnost tlačne cone betona**.

Pri F_{cd} , z in x smo oklepaja opustili - oznake v vsakem primeru povezane le s tlačnim betonom:

$$F_{cd} = [F_{cd}] \text{ ter}$$

$$z = [z] = [k_z] \cdot d = \frac{1}{[k_s]} d.$$

$$x = [x] = [k_x] \cdot d.$$

Potrebna sila v tlačeni armaturi:

$$F'_{sd} = \frac{M_{Eds} - F_{cd} \cdot z}{d \cdot (1 - \delta)} \quad \text{in} \quad F_{cd} \cdot z = [M_{Eds}]$$

$$F'_{sd} = \frac{M_{Eds} - [M_{Eds}]}{d \cdot (1 - \delta)} = \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta)}$$

ΔM_{Eds} - **neuravnoteženi del upogibnega momenta** k natezni armaturi, ki ga **moramo prevzeti s tlačno armaturo**:

$$\Delta M_{Eds} = M_{Eds} - [M_{Eds}] = M_{Eds} - f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d]$$

Potrebna sila v natezni armaturi:

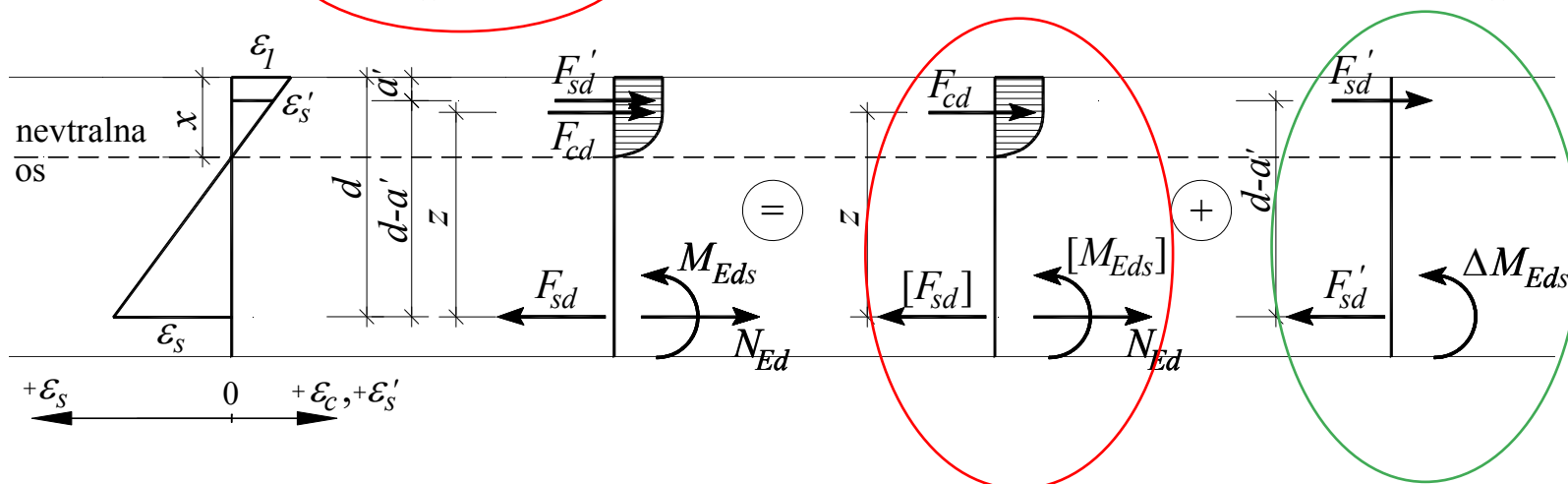
$$F_{sd} = F_{cd} + N_{Ed} + F'_{sd}; \quad F_{cd} = \frac{[M_{Eds}]}{z}; \quad z = \frac{d}{[k_s]}$$

$$\rightarrow F_{sd} = [k_s] \frac{[M_{Eds}]}{d} + N_{Ed} + F'_{sd}$$

Uporabimo oznako za silo v armaturi $[F_{sd}]$ zaradi:

- osne sile (N_{Ed}) in
 - dela upogibnega momenta $[M_{Eds}]$, ki ga prevzamemo s pomočjo tlačnega betona
- $$[F_{sd}] = [F_{cd}] + N_{Ed} = F_{cd} + N_{Ed}.$$

Zapišemo lahko: $F_{sd} = [k_s] \frac{[M_{Eds}]}{d} + N_{Ed} + F'_{sd} = [F_{sd}] + F'_{sd} \rightarrow [F_{sd}] = [k_s] \frac{[M_{Eds}]}{d} + N_{Ed}.$



Potrebna prereza tlačene oziroma natezne armature:

σ'_s oziroma σ_s napetost v tlačeni oziroma natezni armaturi

- **Prerez tlačene armature:**

$$A'_s = \frac{F'_{sd}}{\sigma'_s} = \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s}$$

- **Prerez natezne armature:**

$$A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s} = \left[k_s \right] \frac{M_{Eds}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s} + \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma_s}$$

Druga oblika zapisa za prerez natezne armature:

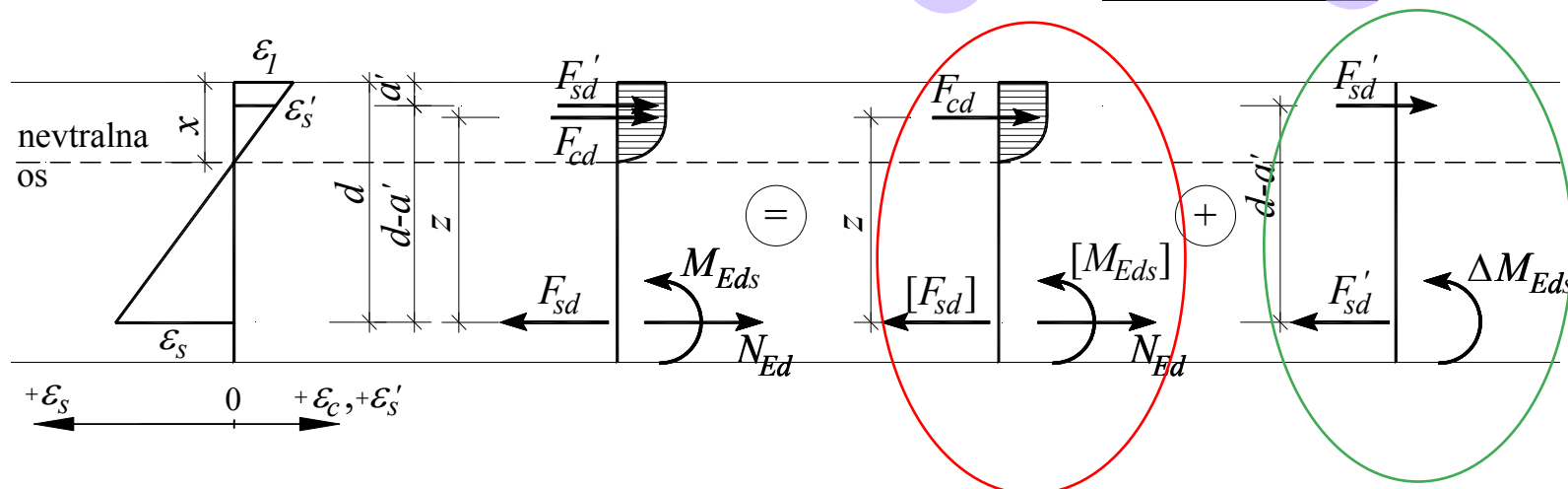
$$A_s = [A_s] + \Delta A_s$$

$[A_s]$ - prerez natezne armature ki **uravnoteži obremenitev, ki jo lahko prevzame enojno armirani betonski prerez pri danih deformacijah:**

$$[A_s] = [k_s] \frac{[M_{Eds}]}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s},$$

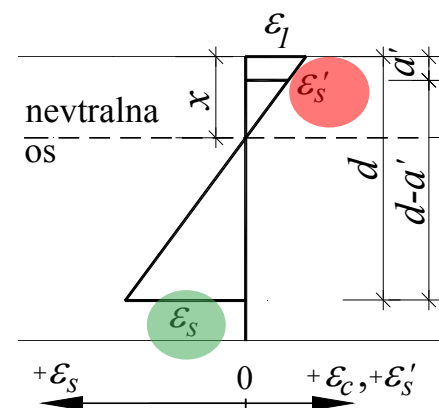
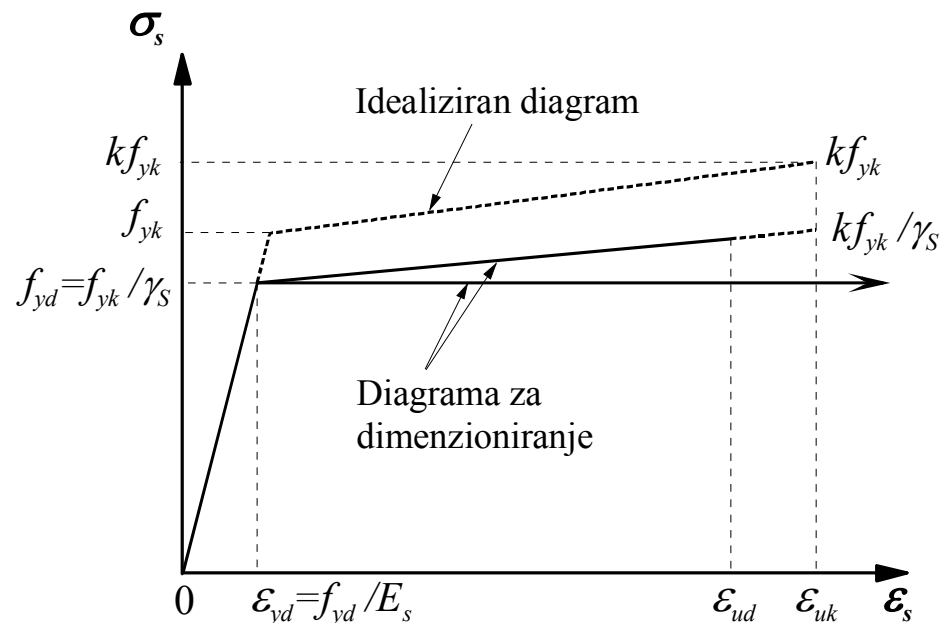
ΔA_s - **potrebni prerez dodatne natezne armature, ki izvira iz dvojice sil ($\pm F'_{sd}$) s katerima uravnotežimo preostanek upogibnega momenta ΔM_{Eds} :**

$$\Delta A_s = \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma_s} = \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s} \frac{\sigma'_s}{\sigma_s} \rightarrow \Delta A_s = A'_s \frac{\sigma'_s}{\sigma_s}.$$



Napetost v tlačeni oziroma natezni armaturi

Konstitutivni zakon armature



Deformacija tlačene armature ϵ'_s :

$$\frac{\epsilon'_s}{x - a'} = \frac{\epsilon_l}{x} \rightarrow \epsilon'_s = \epsilon_l \frac{x - a'}{x} = \epsilon_l \left(1 - \frac{a'}{x} \right) = \epsilon_l \left(1 - \frac{\delta \cdot d}{[k_x] \cdot d} \right) = \epsilon_l \left(1 - \frac{\delta}{[k_x]} \right)$$

Deformacija natezne armature ϵ_s je izbrana vnaprej in s tem poznana.

Ustrezen **izbor deformacije natezne armature** ob izkoriščenem betonu ($\varepsilon_l = \varepsilon_{cu2}$)
 → **bistven vpliv na duktilnost prereza.**

Plastifikacija natezne armature (zagotovljena vsaj osnovna duktilnosti prerezov):

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_s(\varepsilon_s) = f_{yd}$$

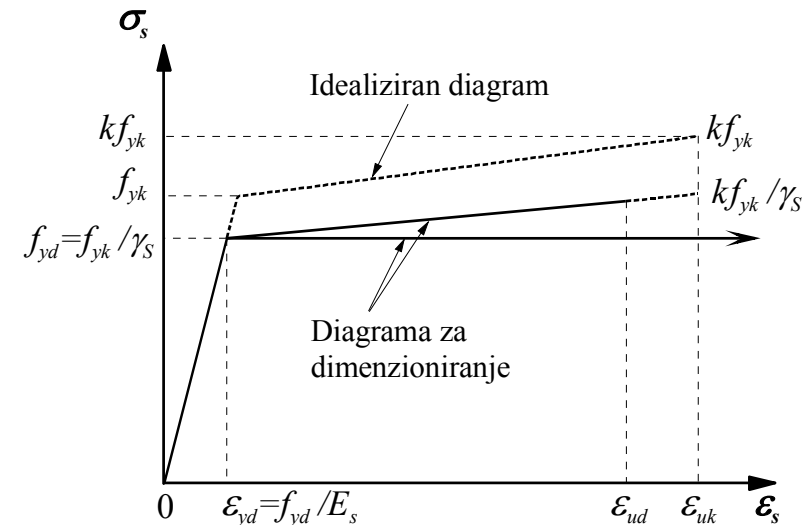
Napetost tlačene armature σ'_s :

Pri upoštevanju poenostavljenega delovnega diagrama armature brez utrditve velja:

$$\text{za } \varepsilon'_s \geq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma'_s(\varepsilon'_s) = f_{yd}$$

$$\text{za } \varepsilon'_s < \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma'_s(\varepsilon'_s) = E_s \cdot \varepsilon'_s ;$$

$$E_s = 20.000 \text{ kN/cm}^2$$



Korekcija napetosti v tlačeni armaturi:

Pri računu **dela upogibnega momenta** $[M_{Eds}]$, ki ga lahko prevzame enojno armirani prerez z armaturo $[A_s]$ in posledično delu tudi **dela momenta** ΔM_{Eds} , ki ga prevzamemo s tlačno armaturo A'_s in dodatno natezno armaturo ΔA_s

$$\Delta M_{Eds} = M_{Eds} - [M_{Eds}] = M_{Eds} - f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d]$$

smo upoštevali napetosti betona tudi na delu prereza, kjer se **dejansko nahaja tlačena armatura**.

Ustrezna korekcija:

namesto napetosti σ'_s uporabimo korigirano napetost $\sigma'_{s,c}(\varepsilon'_s) = \sigma'_s(\varepsilon'_s) - \sigma_c(\varepsilon'_s)$.

Ocena napake, če pri pravokotnem prerezu **ne upoštevamo korigiranih napetosti** $\sigma'_{s,c}(\varepsilon'_s)$:

$$\beta = A'_s(\sigma'_{s,c}) / A'_s(\sigma'_s)$$

ε'_s	β								
	Beton								
	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$\geq 2,17$	1,019	1,025	1,032	1,040	1,048	1,057	1,065	1,074	1,083
2,1	1,019	1,026	1,033	1,041	1,050	1,059	1,068	1,077	1,086
1,9	1,021	1,028	1,035	1,045	1,054	1,064	1,074	1,083	1,094
1,8	1,022	1,030	1,038	1,048	1,058	1,069	1,079	1,090	1,101
1,4	1,027	1,036	1,045	1,057	1,070	1,082	1,095	1,108	1,121
0,7	1,034	1,046	1,058	1,074	1,090	1,106	1,123	1,141	1,159

Opazimo lahko, da se po pričakovanju napaka **povečuje z večanjem projektne tlačne trdnosti betona** in **z manjšanjem deformacije tlačene armature** ε'_s .

Betoni normalne trdnosti in armaturi iz jekla S500

Če sta **obe armaturi plastificirani**:

$$\varepsilon'_s \geq \varepsilon_{yd} = 2,17\text{‰} \rightarrow \varepsilon'_s \geq \varepsilon_{c2} = 2\text{‰} \rightarrow \sigma_c(\varepsilon'_s) = f_{cd} \rightarrow \sigma'_{s,c} = f_{yd} - f_{cd} \text{ in}$$

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} = 2,17\text{‰} \rightarrow \sigma_s = f_{yd}$$

se izrazi za določitev potrebnega prereza armature poenostavijo:

$$A'_s = \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot (f_{yd} - f_{cd})}$$

$$A_s = [A_s] + \Delta A_s ;$$

$$[A_s] = [k_s] \frac{[M_{Eds}]}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} ;$$

$$\Delta A_s = A'_s \frac{f_{yd} - f_{cd}}{f_{yd}}$$

Pri tem pa velja:

$$[M_{Eds}] = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d]$$

$$\Delta M_{Eds} = M_{Eds} - [M_{Eds}] = M_{Eds} - f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d]$$

Izrazi izpeljani na podlagi ravnotežnih pogojev

- So podlaga osnovnega **analitičnega postopka dimenzioniranja** povsem splošnih dvojno armiranih prerezov poljubne oblike, kadar **razpolagamo s pripomočki za dimenzioniranje** ustreznih enojno armiranih prerezov.
- Glede na **izbrane deformacije** $\varepsilon_1/\varepsilon_s$ (ki morajo ustrezati pogoju $k_x \leq k_{x,max}$) iz običajnih preglednic za enojno armirane prereze **odčitamo koeficienta** $[k_d]$ in $[k_s]$ in določimo pripadajoč prereza armature A_s in A'_s po predhodno podanih izrazih.

$k_{x,max}$ - **zgornja sprejemljiva vrednost koeficienta višine tlačene** cone glede zagotavljanja duktilnosti prerezov (pri izkoriščenem betonu, to je pri $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$)

- **osnovna zahteva (plastifikacija armature)** pri betonih običajne trdnosti in S500:

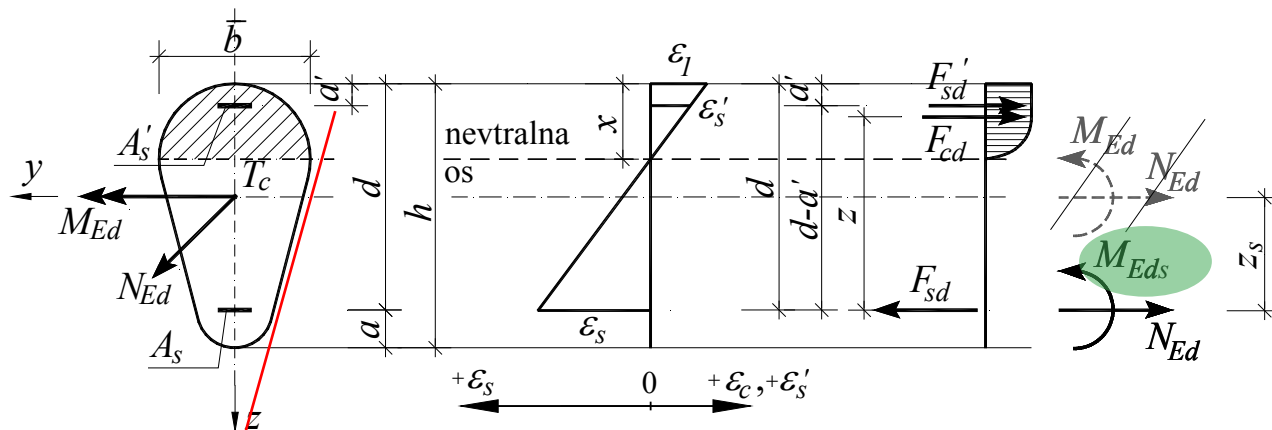
$$k_{x,max} = 0,62$$

- **priporočljivo upoštevati strožje omejitve**, ki preprečuje močno armirane prereze:

$$k_{x,max} = 0,45 \text{ pri betonih normalne trdnosti in.}$$

$$k_{x,max} = 0,35 \text{ pri betonih visoke trdnosti}$$

Izrazi za neposredno dimensioniranje dvojno armiranih prerezov poljubne oblike - izdelava pomožnih preglednic za dimensioniranje in njihova uporaba



Obremenitev glede na težišče natezne armature: $N_{Eds} = N_{Ed}$ in $M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$

Uporabimo oznako: $\delta = a' / d$

Upogibni moment k težišču natezne armature M_{Eds} zapišemo s pomočjo koeficienta k_d :

$$M_{Eds} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot k_d \rightarrow k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2}$$

Predpostavimo:

- da poznamo deformacije prereza $\varepsilon_1/\varepsilon_s$ in
- da veljajo oznake, ki se nanašajo na pripadajoči enojno armirani prerez pri teh deformacijah:

$$[M_{Eds}] = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d]; \quad z = [z] = [k_z] \cdot d = \frac{1}{[k_s]} d$$

V izrazu $A'_s = \frac{F'_{sd}}{\sigma'_s} = \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s}$

upoštevamo

$$[M_{Eds}] = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d] \text{ in}$$

$$M_{Eds} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot k_d$$

dobimo **izraz za tlačeno armaturo**:

$$\begin{aligned} A'_s &= \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s} = \frac{M_{Eds} - [M_{Eds}]}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s} = \frac{(k_d - [k_d]) \cdot \bar{b} \cdot d^2}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s} = \frac{(k_d - [k_d]) \cdot \bar{b} \cdot d^2}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s} \frac{k_d}{k_d} = \\ &= \frac{(k_d - [k_d]) \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot k_d}{k_d \cdot d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma'_s} = \frac{(k_d - [k_d]) \cdot M_{Eds}}{k_d \cdot (1 - \delta) \cdot d \cdot \sigma'_s} = \frac{(k_d - [k_d]) \cdot M_{Eds}}{k_d \cdot (1 - \delta) \cdot d \cdot \sigma'_s} \frac{f_{yd}}{f_{yd}} \end{aligned}$$

kar lahko zapišemo na naslednji način

$$A'_s = k'_s \cdot \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} \rightarrow k'_s = \frac{k_d - [k_d]}{k_d \cdot (1 - \delta)} \cdot \frac{f_{yd}}{\sigma'_s}$$

Če v izrazu $A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s} = [k_s] \frac{[M_{Eds}]}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s} + \frac{\Delta M_{Eds}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma_s}$ upoštevamo

$$[M_{Eds}] = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot [k_d] \text{ in } M_{Eds} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot d^2 \cdot k_d :$$

dobimo izraz za **potrebni prerez natezne armature**:

$$\begin{aligned} A_s &= [k_s] \frac{[k_d] \cdot \bar{b} \cdot d^2 f_{cd}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{(k_d - [k_d]) \cdot \bar{b} \cdot d^2 f_{cd}}{d \cdot (1 - \delta) \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s} = \left([k_s][k_d] + \frac{(k_d - [k_d])}{(1 - \delta)} \right) \frac{\bar{b} \cdot d^2 f_{cd}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s} = \\ &= \left([k_s][k_d] + \frac{(k_d - [k_d])}{(1 - \delta)} \right) \frac{\bar{b} \cdot d^2 f_{cd}}{d \cdot \sigma_s} \cdot \frac{k_d}{k_d} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s} = \left(\frac{[k_s][k_d]}{k_d} + \frac{(k_d - [k_d])}{k_d \cdot (1 - \delta)} \right) \frac{M_{Eds}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s} \end{aligned}$$

ga lahko **zapišemo s pomočjo koeficienta k_s** :

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s} ;$$

$$k_s = \frac{[k_s][k_d]}{k_d} + \frac{k_d - [k_d]}{k_d \cdot (1 - \delta)} .$$

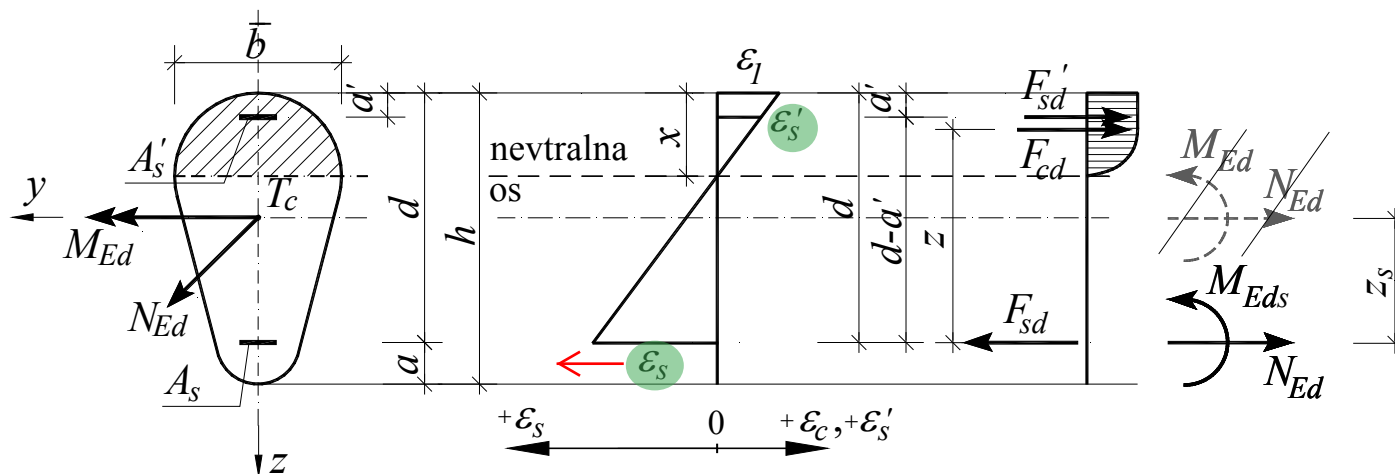
Če privzamemo: $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} = 2,17\text{‰} \rightarrow \sigma_s = f_{yd}$:

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} ; \quad k_s = \frac{[k_s][k_d]}{k_d} + \frac{(k_d - [k_d])}{k_d \cdot (1 - \delta)} .$$

Pri **izdelavi preglednic** za praktično dimenzioniranje se pri vsaki obliki prereza lahko omejimo le na **nekaj izbranih potekov deformacij** po prerezu (kombinacije $\varepsilon_l/\varepsilon_s$).

Dvojna armatura **je namreč smiselna le za primere:**

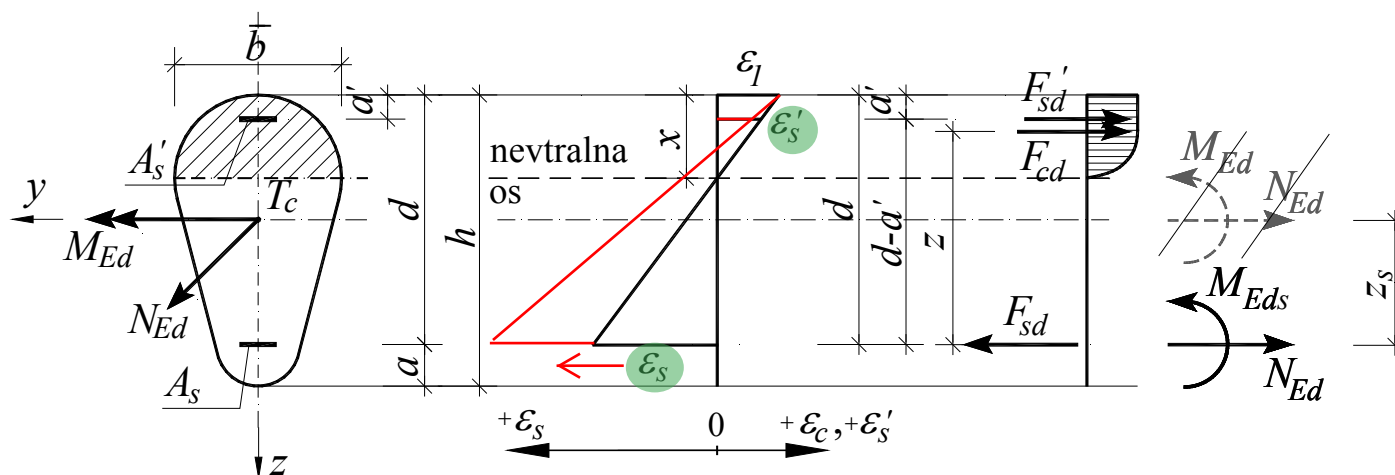
- ko je **beton izkoriščen** ($\varepsilon_l = \varepsilon_{cu2}$),
- za **deformacijo natezne armature** ε_s pa so smiselne tiste vrednosti, ki jih **narekuje zahteva** $k_x < k_{x,max}$ ali le malo večje, saj z **naraščanjem deformacije v natezni armaturi** ε_s lahko **pade deformacija tlačene armature** ε'_s pod mejo elastičnosti in **s tem ta armatura ni polno izkoriščena**.



Pri **izdelavi preglednic** za praktično dimenzioniranje se pri vsaki obliki prereza lahko omejimo le na **nekaj izbranih potekov deformacij** po prerezu (kombinacije $\varepsilon_1/\varepsilon_s$).

Dvojna armatura **je namreč smiselna le za primere:**

- ko je **beton izkoriščen** ($\varepsilon_l = \varepsilon_{cu2}$),
- za **deformacijo natezne armature** ε_s pa so smiselne tiste vrednosti, ki jih **narekuje zahteva** $k_x < k_{x,max}$ ali le malo večje, saj z **naraščanjem deformacije v natezni armaturi** ε_s lahko **pade deformacija tlačene armature** ε'_s pod mejo elastičnosti in **s tem ta armatura ni polno izkoriščena**.



Preglednice za dimenzioniranje dvojno armiranih pravokotnih prereзов v priročniku IZS:

$\leq C50/60$	$\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2} = -3,5 \text{ ‰}$ in $\varepsilon_s = 5 \text{ ‰}$.
$\leq C50/60$	$k_x = 0,25$, kar je mejna vrednost koeficienta višine tlačne cone k_x pri plastični analizi brez posebenga dokazovanja rotacijske sposobnosti za običajne trdnosti.
$\leq C50/60$	$k_x = 0,45$, kar je vrednost koeficienta višine tlačne cone k_x , ki zagotavlja vsaj osnovno duktilnost prereзов iz betonov običajne trdnosti.
$\leq C50/60$	Podani so korekcijski koeficienti β za upoštevanje neto betonskega prereза pri določitvi tlačne armature dvojno armiranih prereзов iz betonov običajne trdnosti.
C55/67	$\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$ in $\varepsilon_s = 5 \text{ ‰}$. Upoštevan neto prereз betona.
C60/75	
C70/85	
C80/95	
C90/105	
C55/67, C60/75	$k_x = 0,15$, kar je mejna vrednost koeficienta višine tlačne cone k_x pri plastični analizi brez posebenga dokazovanja rotacijske sposobnosti za visokotrdne betone. Upoštevan neto prereз betona.
C70/85, C80/95	
C90/105	

Izdelava preglednic za neposredno dimenzioniranje

Pri poznanih:

- kvaliteti jekla,
- deformacijah $\varepsilon_l/\varepsilon_s$ (in s tem znanima koeficientoma $[k_d]$ in $[k_s]$),
- parametrih oblike in
- izbranih razmerjih $\delta = a' / d$,

določimo deformacijo tlačene armature ε'_s in pripadajočo napetost σ'_s nato pa za **izbrane vrednosti koeficientov** $k_d > [k_d(\varepsilon_l/\varepsilon_s)]$,

izračunamo koeficienta $k'_s = \frac{k_d - [k_d]}{k_d \cdot (1 - \delta)} \cdot \frac{f_{yd}}{\sigma'_s}$ in $k_s = \frac{[k_s][k_d]}{k_d} + \frac{k_d - [k_d]}{k_d \cdot (1 - \delta)}$

ter ju zapišemo v preglednico.

Velika ekscentričnost – dvojna armatura**Beton $\leq C50/60$**

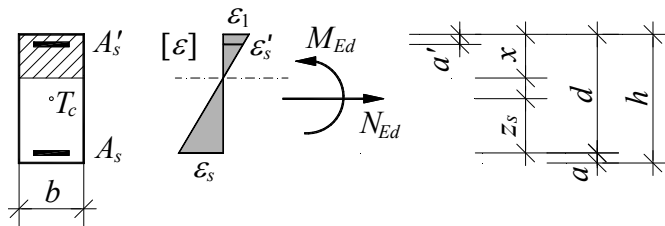
$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

Armatura S500 (brez utrditve): $f_{yd} = 43,5 \text{ kN/cm}^2$

$$k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \rightarrow k_s \text{ in } k'_s$$

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$A'_s = k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}}$$



$$\delta = a'/d \quad k_x = x/d$$

$$\epsilon_1 = -3,5 \text{ ‰ in } \epsilon_s = 5 \text{ ‰} \rightarrow k_x = 0,411$$

$\delta = a'/d$	$\delta = 0,05$		$\delta = 0,10$		$\delta = 0,15$		$\delta = 0,20$	
ϵ_s / ϵ'_s	5 ‰ / -3,08 ‰		5 ‰ / -2,65 ‰		5 ‰ / -2,23 ‰		5 ‰ / -1,80 ‰	
$k_d \rightarrow k_s$	k_s	k'_s	k_s	k'_s	k_s	k'_s	k_s	k'_s
0,28	1,205	0,014	1,205	0,015	1,206	0,016	1,207	0,020
0,29	1,199	0,050	1,202	0,053	1,205	0,056	1,209	0,072
0,30	1,194	0,083	1,199	0,088	1,204	0,093	1,210	0,120
0,31	1,190	0,115	1,196	0,121	1,203	0,128	1,211	0,164
0,32	1,186	0,144	1,194	0,152	1,203	0,161	1,213	0,206
0,33	1,182	0,171	1,191	0,181	1,202	0,192	1,214	0,246
0,34	1,178	0,197	1,189	0,208	1,201	0,221	1,215	0,283
0,35	1,174	0,222	1,187	0,234	1,200	0,248	1,216	0,318
0,36	1,171	0,245	1,184	0,259	1,200	0,274	1,217	0,351
0,37	1,168	0,267	1,182	0,282	1,199	0,298	1,218	0,383
0,38	1,165	0,287	1,181	0,303	1,198	0,321	1,219	0,412
0,39	1,162	0,307	1,179	0,324	1,198	0,343	1,219	0,440
0,40	1,159	0,326	1,177	0,344	1,197	0,364	1,220	0,467
0,41	1,156	0,343	1,176	0,363	1,197	0,384	1,221	0,493
0,42	1,154	0,360	1,174	0,380	1,196	0,403	1,222	0,517
0,43	1,152	0,376	1,173	0,397	1,196	0,421	1,222	0,540
0,44	1,149	0,392	1,171	0,414	1,195	0,438	1,223	0,562
0,45	1,147	0,406	1,170	0,429	1,195	0,454	1,223	0,583
0,46	1,145	0,421	1,169	0,444	1,195	0,470	1,224	0,603
0,47	1,143	0,434	1,167	0,458	1,194	0,485	1,225	0,622
0,48	1,141	0,447	1,166	0,472	1,194	0,499	1,225	0,641
0,49	1,139	0,459	1,165	0,485	1,194	0,513	1,226	0,659
0,50	1,138	0,471	1,164	0,497	1,193	0,527	1,226	0,676
0,51	1,136	0,482	1,163	0,509	1,193	0,539	1,227	0,692
0,52	1,134	0,493	1,162	0,521	1,193	0,552	1,227	0,708
0,53	1,133	0,504	1,161	0,532	1,192	0,563	1,227	0,723
0,54	1,131	0,514	1,160	0,543	1,192	0,575	1,228	0,737
0,55	1,130	0,524	1,159	0,553	1,192	0,586	1,228	0,751
0,56	1,129	0,533	1,158	0,563	1,191	0,596	1,229	0,765
0,57	1,127	0,542	1,157	0,573	1,191	0,606	1,229	0,778
0,58	1,126	0,551	1,157	0,582	1,191	0,616	1,229	0,791
0,59	1,125	0,560	1,156	0,591	1,191	0,626	1,230	0,803
0,60	1,124	0,568	1,155	0,600	1,190	0,635	1,230	0,815
0,61	1,122	0,576	1,154	0,608	1,190	0,644	1,230	0,826
0,62	1,121	0,584	1,154	0,616	1,190	0,652	1,231	0,837
0,63	1,120	0,591	1,153	0,624	1,190	0,661	1,231	0,848
0,64	1,119	0,598	1,152	0,632	1,190	0,669	1,231	0,858
0,65	1,118	0,605	1,152	0,639	1,189	0,676	1,232	0,868
0,66	1,117	0,612	1,151	0,646	1,189	0,684	1,232	0,878

Opomba: Koeficienti so izračunani za bruto betonski prerez! Za določitev tlačne armature z upoštevanjem neto betonskega prereza je potrebno namesto koeficienta k'_s uporabiti korigirano vrednost $\beta \cdot k'_s$:

$$A'_s = \beta \cdot k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} \quad \text{Koeficienti } \beta \text{ so podani v preglednici Pr. 9.}$$

Pr. 10: Primer preglednice za direktno dimenzioniranje dvojno armiranih pravokotnih prečnih prerezov.

Preglednice v priročniku IZS na straneh 2-108 do 2-119:

Betoni visokih trdnosti ($\geq C55/67$):

specifični parametri delovnega diagrama betona $\rightarrow$ za vsak trdnostni razred betona imamo ločeno preglednico, v koeficientu k'_s pa je upoštevana že **korigirana napetost** tlačene armature

$$k'_s = \frac{k_d - [k_d]}{k_d \cdot (1 - \delta)} \cdot \frac{f_{yd}}{\sigma'_{s,c}} = \frac{k_d - [k_d]}{k_d \cdot (1 - \delta)} \cdot \frac{f_{yd}}{\sigma'_s - \sigma_c(\varepsilon'_s)} \rightarrow A'_s = k'_s \cdot \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} \text{ je pravilno določen!}$$

Betoni normalne trdnosti:

isti parametri delovnega diagrama $\rightarrow$ zajeti so s skupno preglednico, tabelirani koeficienti k'_s so

določeni po izrazu

$$k'_s = \frac{k_d - [k_d]}{k_d \cdot (1 - \delta)} \cdot \frac{f_{yd}}{\sigma'_s}$$

zato je potrebno pri računu potrebnega prereza tlačene armature **korigirano napetost** $\sigma'_{s,c}$ **dodatno upoštevati**. Le to storimo s **korekcijskim koeficientom** β :

$$A'_s = \beta \cdot k'_s \cdot \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}};$$

$$\beta = \frac{\sigma'_s(\varepsilon'_s)}{\sigma'_s(\varepsilon'_s) - \sigma_c(\varepsilon'_s)}$$

Koeficienti β za tiste vrednosti deformacij tlačene armature, ki se pojavljajo v preglednicah za betone običajne trdnosti na straneh 2-108 do 2-110 priročnika IZS:

ε'_s	β								
	Beton								
	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$\geq 2,17$	1,019	1,025	1,032	1,040	1,048	1,057	1,065	1,074	1,083
2,1	1,019	1,026	1,033	1,041	1,050	1,059	1,068	1,077	1,086
1,9	1,021	1,028	1,035	1,045	1,054	1,064	1,074	1,083	1,094
1,8	1,022	1,030	1,038	1,048	1,058	1,069	1,079	1,090	1,101
1,4	1,027	1,036	1,045	1,057	1,070	1,082	1,095	1,108	1,121
0,7	1,034	1,046	1,058	1,074	1,090	1,106	1,123	1,141	1,159
$A'_s = \beta \cdot k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}}$ → Tlačna armatura je določena brez upoštevanja prispevka betona na njenem estu – na betonskem neto prerezu!									

Praktični postopek dimenzioniranja dvojno armiranih pravokotnih prerezov z uporabo preglednic iz priročnika IZS:

Določimo obremenitev za težišče natezne armature: $N_{Eds} = N_{Ed}$ in $M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$

Izberemo ustrezno preglednico glede na deformacije $\varepsilon_1 / \varepsilon_s$

in pri pravem razmerju $\delta = a' / d$ v odvisnosti od izračunanega koeficienta $k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}$ odčitamo pripadajoči vrednosti k_s in k'_s :

S tema koeficientoma **lahko izračunamo potrebna prereza armature:**

- **natezna armatura:**

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

- **tlačna armatura:**

betoni običajne trdnosti

$$A_s = \beta \cdot k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}}; \quad \beta \text{ glej v Pregl.}$$

betoni visoke trdnosti

$$A_s = k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}}$$

Velika ekscentričnost – dvojna armatura**Beton ≤C50/60**

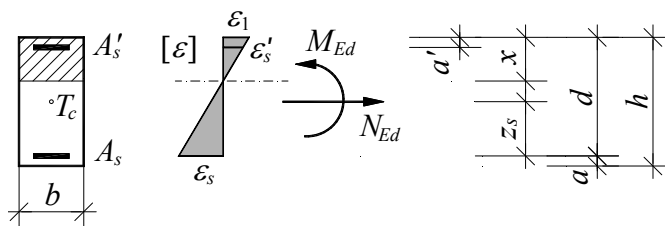
$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

Armatura S500 (brez utrditve): $f_{yd} = 43,5 \text{ kN/cm}^2$

$$k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \rightarrow k_s \text{ in } k'_s$$

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$A'_s = k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}}$$



$$\delta = a'/d \quad k_x = x/d$$

$$\varepsilon_l = -3,5 \text{ ‰ in } \varepsilon_s = 5 \text{ ‰} \rightarrow k_x = 0,411$$

$\delta = a'/d$	$\delta = 0,05$		$\delta = 0,10$		$\delta = 0,15$		$\delta = 0,20$	
$\varepsilon_s / \varepsilon'_s$	5 ‰ / -3,08 ‰		5 ‰ / -2,65 ‰		5 ‰ / -2,23 ‰		5 ‰ / -1,80 ‰	
k_d	k_s	k'_s	k_s	k'_s	k_s	k'_s	k_s	k'_s
0,28	1,205	0,014	1,205	0,015	1,206	0,016	1,207	0,020
0,29	1,199	0,050	1,202	0,053	1,205	0,056	1,209	0,072
0,30	1,194	0,083	1,199	0,088	1,204	0,093	1,210	0,120
0,31	1,190	0,115	1,196	0,121	1,203	0,128	1,211	0,164
0,32	1,186	0,144	1,194	0,152	1,203	0,161	1,213	0,206
0,33	1,182	0,171	1,191	0,181	1,202	0,192	1,214	0,246
0,34	1,178	0,197	1,189	0,208	1,201	0,221	1,215	0,283
0,35	1,174	0,222	1,187	0,234	1,200	0,248	1,216	0,318
0,36	1,171	0,245	1,184	0,259	1,200	0,274	1,217	0,351
0,37	1,168	0,267	1,182	0,282	1,199	0,298	1,218	0,383
0,38	1,165	0,287	1,181	0,303	1,198	0,321	1,219	0,412
0,39	1,162	0,307	1,179	0,324	1,198	0,343	1,219	0,440
0,40	1,159	0,326	1,177	0,344	1,197	0,364	1,220	0,467
0,41	1,156	0,343	1,176	0,363	1,197	0,384	1,221	0,493
0,42	1,154	0,360	1,174	0,380	1,196	0,403	1,222	0,517
0,43	1,152	0,376	1,173	0,397	1,196	0,421	1,222	0,540
0,44	1,149	0,392	1,171	0,414	1,195	0,438	1,223	0,562
0,45	1,147	0,406	1,170	0,429	1,195	0,454	1,223	0,583
0,46	1,145	0,421	1,169	0,444	1,195	0,470	1,224	0,603
0,47	1,143	0,434	1,167	0,458	1,194	0,485	1,225	0,622
0,48	1,141	0,447	1,166	0,472	1,194	0,499	1,225	0,641
0,49	1,139	0,459	1,165	0,485	1,194	0,513	1,226	0,659
0,50	1,138	0,471	1,164	0,497	1,193	0,527	1,226	0,676
0,51	1,136	0,482	1,163	0,509	1,193	0,539	1,227	0,692
0,52	1,134	0,493	1,162	0,521	1,193	0,552	1,227	0,708
0,53	1,133	0,504	1,161	0,532	1,192	0,563	1,227	0,723
0,54	1,131	0,514	1,160	0,543	1,192	0,575	1,228	0,737
0,55	1,130	0,524	1,159	0,553	1,192	0,586	1,228	0,751
0,56	1,129	0,533	1,158	0,563	1,191	0,596	1,229	0,765
0,57	1,127	0,542	1,157	0,573	1,191	0,606	1,229	0,778
0,58	1,126	0,551	1,157	0,582	1,191	0,616	1,229	0,791
0,59	1,125	0,560	1,156	0,591	1,191	0,626	1,230	0,803
0,60	1,124	0,568	1,155	0,600	1,190	0,635	1,230	0,815
0,61	1,122	0,576	1,154	0,608	1,190	0,644	1,230	0,826
0,62	1,121	0,584	1,154	0,616	1,190	0,652	1,231	0,837
0,63	1,120	0,591	1,153	0,624	1,190	0,661	1,231	0,848
0,64	1,119	0,598	1,152	0,632	1,190	0,669	1,231	0,858
0,65	1,118	0,605	1,152	0,639	1,189	0,676	1,232	0,868
0,66	1,117	0,612	1,151	0,646	1,189	0,684	1,232	0,878

Opomba: Koeficienti so izračunani za bruto betonski prerez! Za določitev tlačne armature z upoštevanjem neto betonskega prereza je potrebno namesto koeficienta k'_s uporabiti korigirano vrednost $\beta \cdot k'_s$:

$$A'_s = \beta \cdot k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} \quad \text{Koeficienti } \beta \text{ so podani v preglednici Pr. 9.}$$

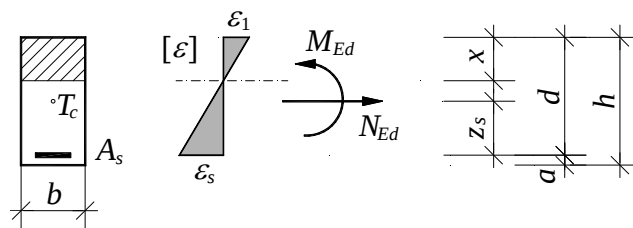
Pr. 10: Primer preglednice za direktno dimenzioniranje dvojno armiranih pravokotnih prečnih prerezov.

Pr. P1-1. Velika ekscentričnost – enojna armatura: vsi trdnostni razredi betona (pri $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$)

$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

$$k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \rightarrow k_s \text{ in } k_x$$

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot \sigma_s} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_s}; \quad x = k_x \cdot d$$



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

Velika ekscentričnost – dvojna armatura**Beton ≤C50/60**

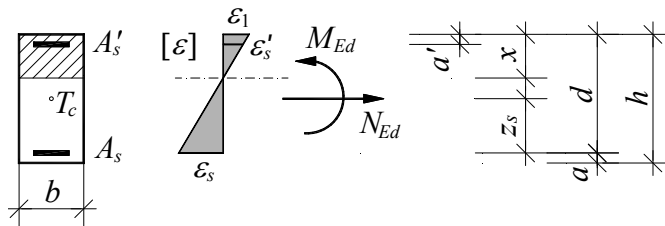
$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_s$$

Armatura S500 (brez utrditve): $f_{yd} = 43,5 \text{ kN/cm}^2$

$$k_d = \frac{M_{Eds}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \rightarrow k_s \text{ in } k'_s$$

$$A_s = k_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$A'_s = k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}}$$



$$\delta = a'/d \quad k_x = x/d$$

$$\varepsilon_l = -3,5 \text{ ‰ in } \varepsilon_s = 5 \text{ ‰} \rightarrow k_x = 0,411$$

$\delta = a'/d$	$\delta = 0,05$		$\delta = 0,10$		$\delta = 0,15$		$\delta = 0,20$	
$\varepsilon_s / \varepsilon'_s$	5 ‰ / -3,08 ‰		5 ‰ / -2,65 ‰		5 ‰ / -2,23 ‰		5 ‰ / -1,80 ‰	
k_d	k_s	k'_s	k_s	k'_s	k_s	k'_s	k_s	k'_s
0,28	1,205	0,014	1,205	0,015	1,206	0,016	1,207	0,020
0,29	1,199	0,050	1,202	0,053	1,205	0,056	1,209	0,072
0,30	1,194	0,083	1,199	0,088	1,204	0,093	1,210	0,120
0,31	1,190	0,115	1,196	0,121	1,203	0,128	1,211	0,164
0,32	1,186	0,144	1,194	0,152	1,203	0,161	1,213	0,206
0,33	1,182	0,171	1,191	0,181	1,202	0,192	1,214	0,246
0,34	1,178	0,197	1,189	0,208	1,201	0,221	1,215	0,283
0,35	1,174	0,222	1,187	0,234	1,200	0,248	1,216	0,318
0,36	1,171	0,245	1,184	0,259	1,200	0,274	1,217	0,351
0,37	1,168	0,267	1,182	0,282	1,199	0,298	1,218	0,383
0,38	1,165	0,287	1,181	0,303	1,198	0,321	1,219	0,412
0,39	1,162	0,307	1,179	0,324	1,198	0,343	1,219	0,440
0,40	1,159	0,326	1,177	0,344	1,197	0,364	1,220	0,467
0,41	1,156	0,343	1,176	0,363	1,197	0,384	1,221	0,493
0,42	1,154	0,360	1,174	0,380	1,196	0,403	1,222	0,517
0,43	1,152	0,376	1,173	0,397	1,196	0,421	1,222	0,540
0,44	1,149	0,392	1,171	0,414	1,195	0,438	1,223	0,562
0,45	1,147	0,406	1,170	0,429	1,195	0,454	1,223	0,583
0,46	1,145	0,421	1,169	0,444	1,195	0,470	1,224	0,603
0,47	1,143	0,434	1,167	0,458	1,194	0,485	1,225	0,622
0,48	1,141	0,447	1,166	0,472	1,194	0,499	1,225	0,641
0,49	1,139	0,459	1,165	0,485	1,194	0,513	1,226	0,659
0,50	1,138	0,471	1,164	0,497	1,193	0,527	1,226	0,676
0,51	1,136	0,482	1,163	0,509	1,193	0,539	1,227	0,692
0,52	1,134	0,493	1,162	0,521	1,193	0,552	1,227	0,708
0,53	1,133	0,504	1,161	0,532	1,192	0,563	1,227	0,723
0,54	1,131	0,514	1,160	0,543	1,192	0,575	1,228	0,737
0,55	1,130	0,524	1,159	0,553	1,192	0,586	1,228	0,751
0,56	1,129	0,533	1,158	0,563	1,191	0,596	1,229	0,765
0,57	1,127	0,542	1,157	0,573	1,191	0,606	1,229	0,778
0,58	1,126	0,551	1,157	0,582	1,191	0,616	1,229	0,791
0,59	1,125	0,560	1,156	0,591	1,191	0,626	1,230	0,803
0,60	1,124	0,568	1,155	0,600	1,190	0,635	1,230	0,815
0,61	1,122	0,576	1,154	0,608	1,190	0,644	1,230	0,826
0,62	1,121	0,584	1,154	0,616	1,190	0,652	1,231	0,837
0,63	1,120	0,591	1,153	0,624	1,190	0,661	1,231	0,848
0,64	1,119	0,598	1,152	0,632	1,190	0,669	1,231	0,858
0,65	1,118	0,605	1,152	0,639	1,189	0,676	1,232	0,868
0,66	1,117	0,612	1,151	0,646	1,189	0,684	1,232	0,878

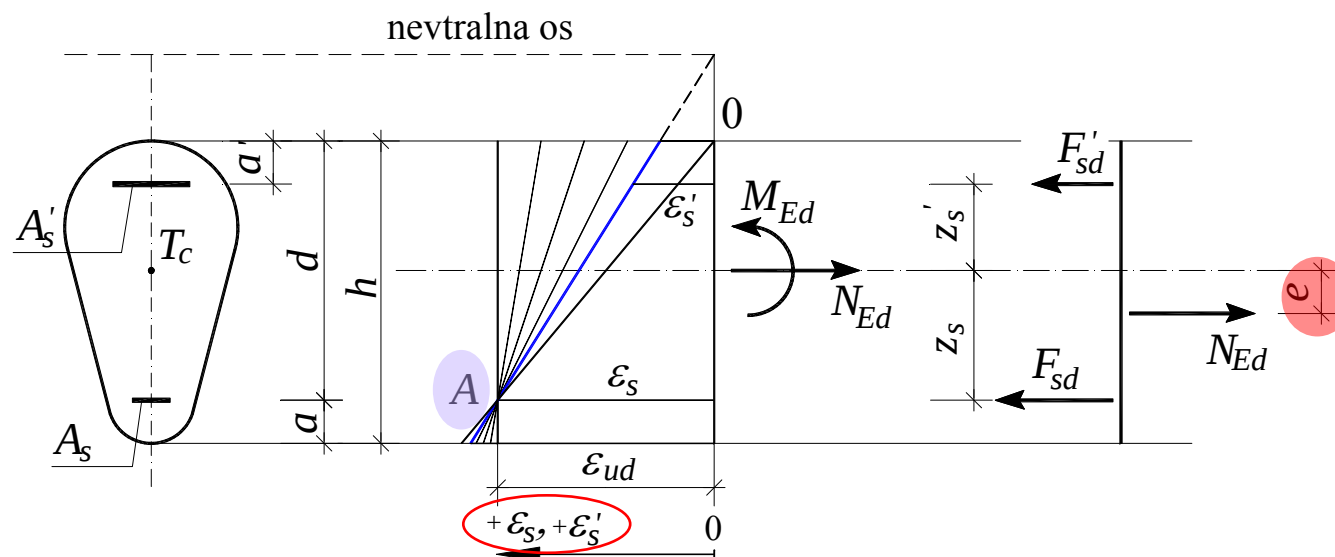
Opomba: Koeficienti so izračunani za bruto betonski prerez! Za določitev tlačne armature z upoštevanjem neto betonskega prereza je potrebno namesto koeficienta k'_s uporabiti korigirano vrednost $\beta \cdot k'_s$:

$$A'_s = \beta \cdot k'_s \frac{M_{Eds}}{d \cdot f_{yd}} \quad \text{Koeficienti } \beta \text{ so podani v preglednici Pr. 9.}$$

Pr. 10: Primer preglednice za direktno dimenzioniranje dvojno armiranih pravokotnih prečnih prerezov.

Enojni upogib z natezno osno silo - mala ekscentričnost

Enojno simetričen prerez obremenjen z enoosno ekscentrično natezno osno silo



$N_{Ed} > 0$ (natezna osna sila)

$$e = M_{Ed} / N_{Ed} ; \quad -z'_s \leq e \leq z_s$$

- Prijemališče osne sile N_{Ed} je **med obema armaturama**.
- **Armaturi** A_s in A_s' sta predpostavljeni **kot natezni armaturi**, tudi ε_s in ε_s' sta pozitivni.
- **Vrtišče deformacijskih ravnin** v točki **A**!

Po celem prerezu **natezne deformacije** → **betona** pri odpornosti v MSN **ne upoštevamo**

Odpornost prereza zagotavljamo **s silama v nateznih armaturah** F_{sd} in F'_{sd} :

- **Ravnotežje momentov** na težišče armature A_s :

$$F'_{sd} \cdot (z_s + z'_s) - N_{Ed} \cdot (z_s - e) = 0 \rightarrow F'_{sd} = \frac{N_{Ed} \cdot (z_s - e)}{(z_s + z'_s)} .$$

- **Ravnotežje momentov** na težišče armature A'_s :

$$F_{sd} \cdot (z_s + z'_s) - N_{Ed} \cdot (z'_s + e) = 0 \rightarrow F_{sd} = \frac{N_{Ed} \cdot (z'_s + e)}{(z_s + z'_s)} .$$

Praktično dimenzioniranje: edino smiselna predpostavka - A_s in A'_s plastificirani:

$$\varepsilon'_s \geq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma'_s = f_{yd}$$

in

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_s = f_{yd} .$$

Potrebna prereza armatur:

$$A'_s = \frac{F'_{sd}}{\sigma'_s} = \frac{F'_{sd}}{f_{yd}} = \frac{N_{Ed} \cdot (z_s - e)}{(z_s + z'_s) \cdot f_{yd}},$$

$$A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s} = \frac{F_{sd}}{f_{yd}} = \frac{N_{Ed} \cdot (z'_s + e)}{(z_s + z'_s) \cdot f_{yd}}.$$

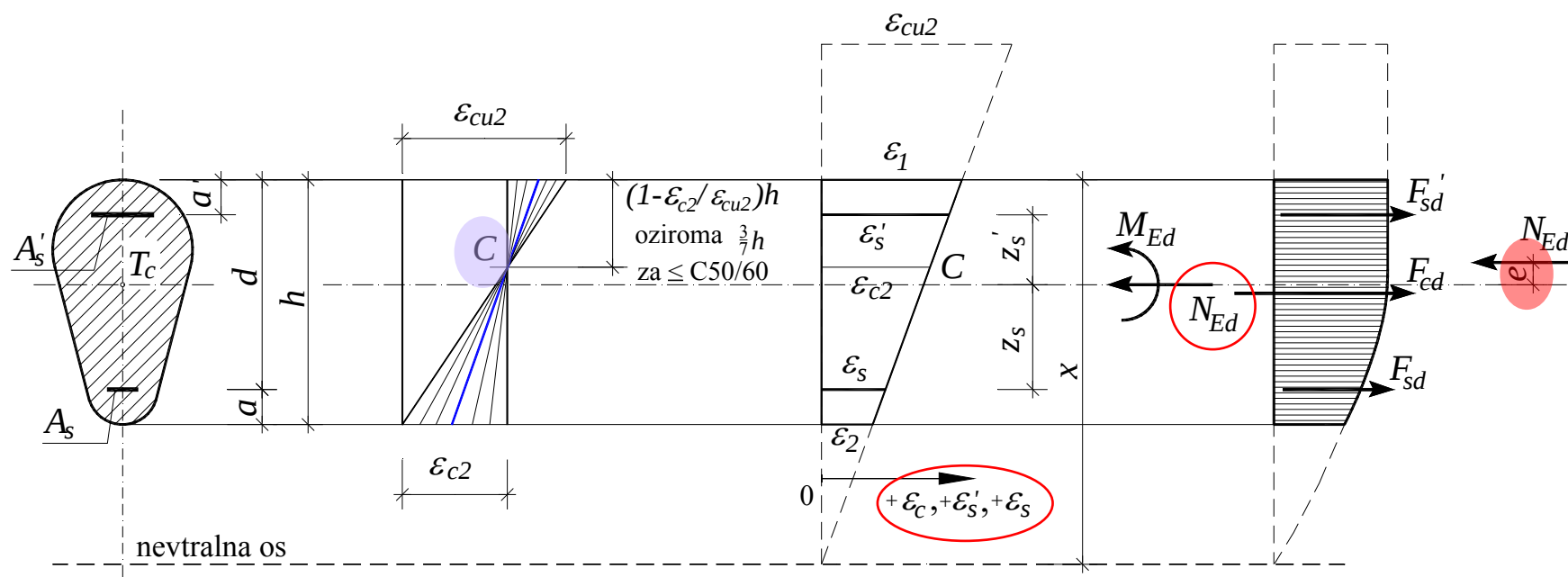
Poseben primer:

Centrični nateg ($e = 0$) in **simetrično razporejena armatura** ($z'_s = z_s$):

$$A_s = A'_s = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot f_{yd}}.$$

Enojni upogib s tlačno osno silo - mala ekscentričnost

- **Tlačna osna** sila izjemoma upoštevana **kot pozitivna**.
- Točka C predstavlja **vrtišče mejnih deformacijskih ravnin**.



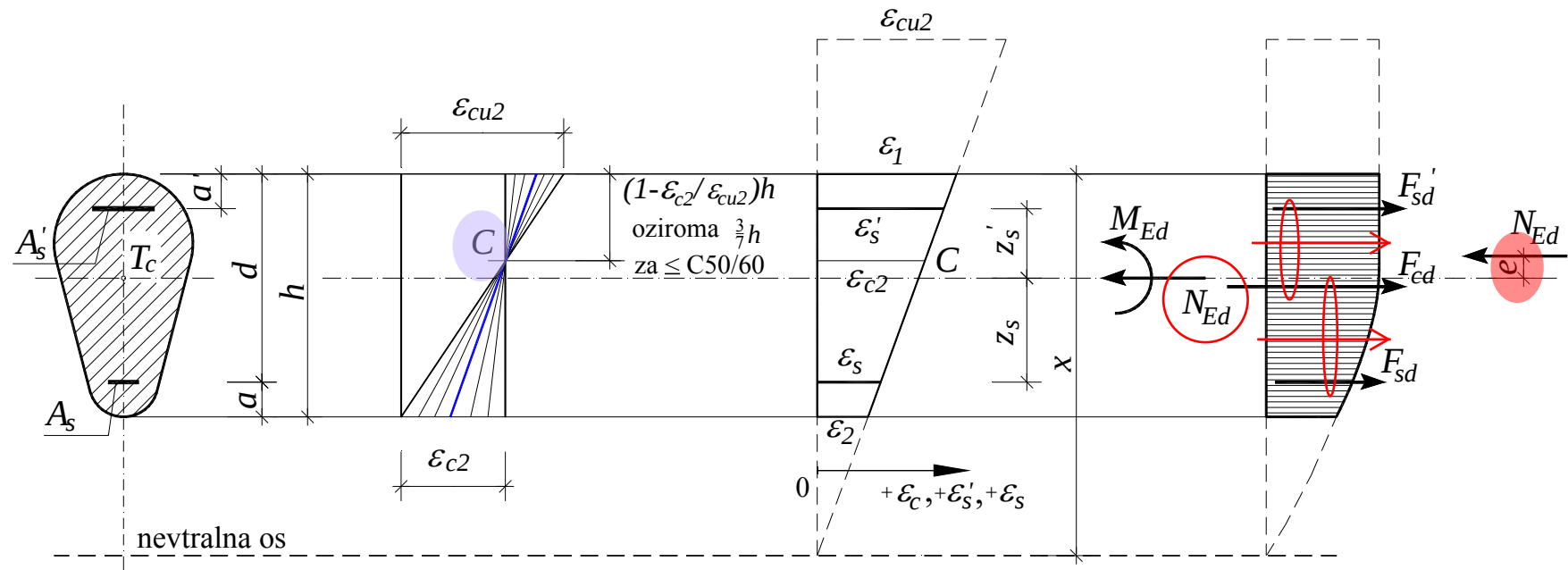
$N_{Ed} > 0$ - tlačna osna sila

$$e = M_{Ed} / N_{Ed}$$

Omejitve za e !

Enojni upogib s tlačno osno silo - mala ekscentričnost

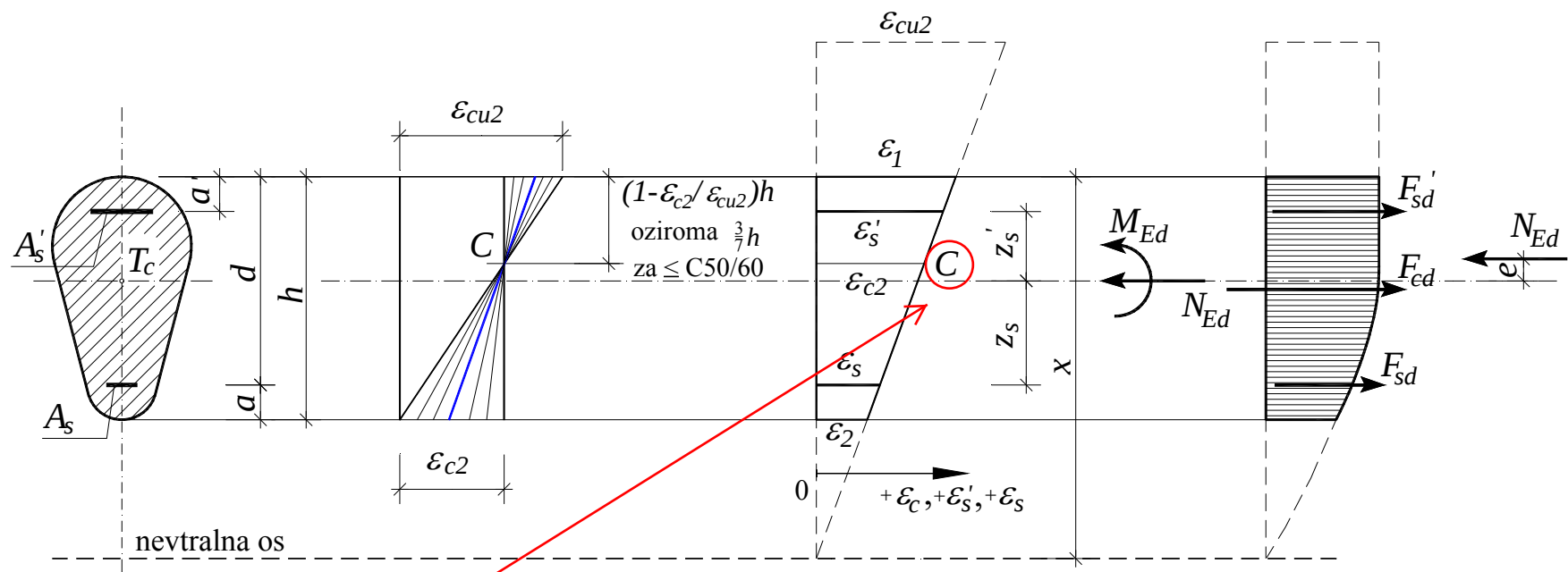
- **Tlačna osna** sila izjemoma upoštevana **kot pozitivna**.
- Točka C predstavlja **vrtišče mejnih deformacijskih ravnin**.



$N_{Ed} > 0$ - tlačna osna sila

$$e = M_{Ed} / N_{Ed}$$

Omejitve za e !



Mejno stanje deformacijske ravnine →

projektna obremenitev ravno enaka projektni odpornosti.

Vrtišče deformacijske ravnine C **določa deformacije ε_1 in ε_2 .**

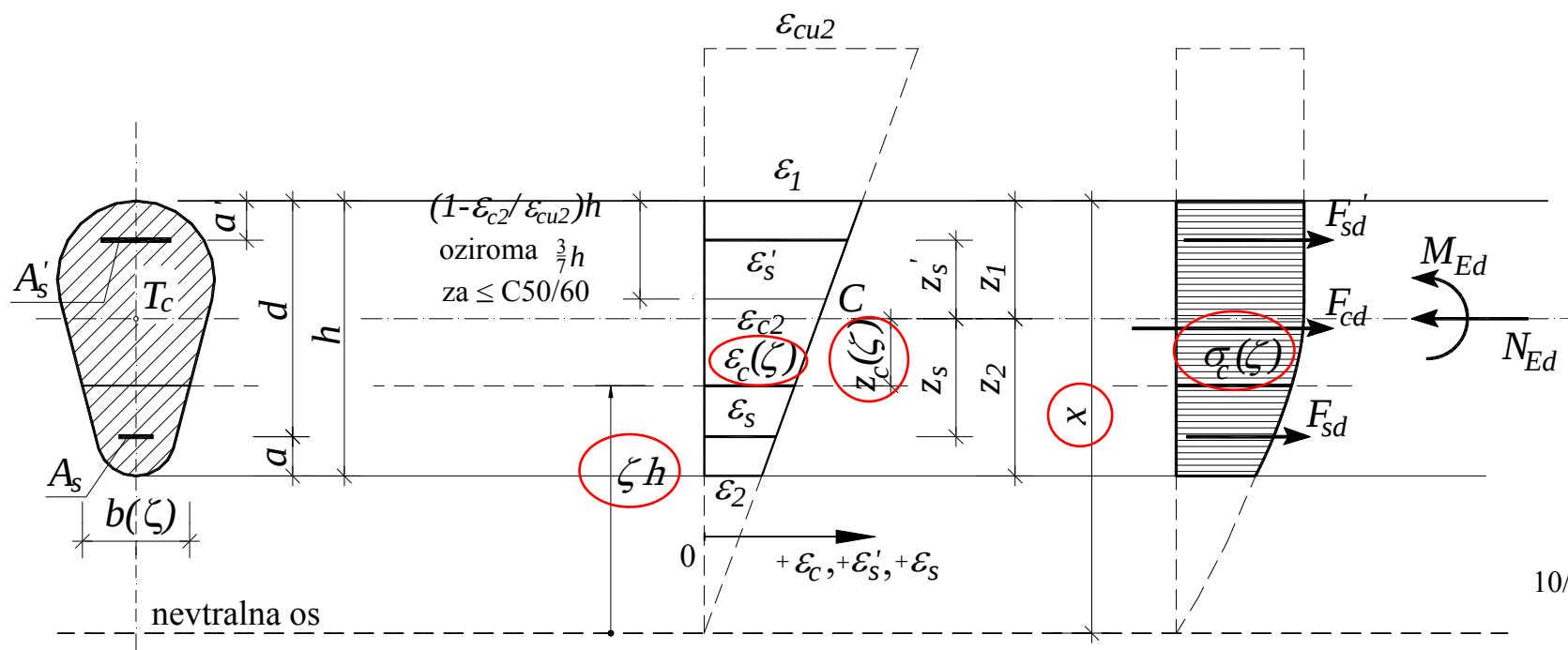
Oddaljenost **nevtralne osi od zgornjega roba betona x :**

$$\frac{\varepsilon_1}{x} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{h} \rightarrow x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} h = k_x \cdot h; \quad \boxed{k_x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}}$$

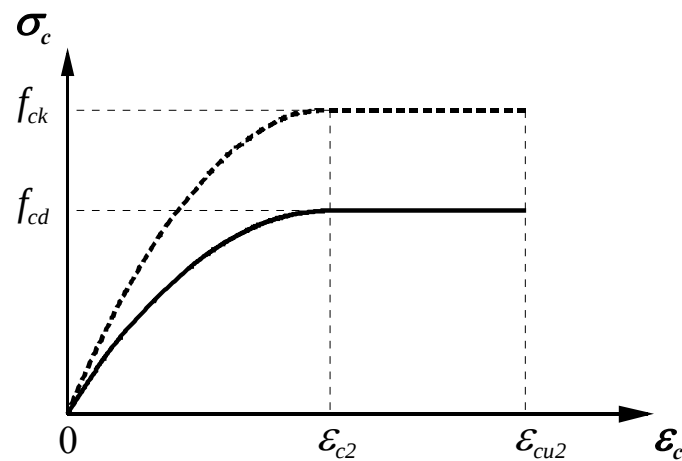
Vpeljemo **brezdimenzionalno koordinato ζ** z izhodiščem v višini nevtralne osi.

Deformacija betona na poljubnem mestu $\varepsilon_c(\zeta)$:

$$\frac{\varepsilon_1}{x} = \frac{\varepsilon_c(\zeta)}{\zeta \cdot h} \rightarrow \varepsilon_c(\zeta) = \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta \cdot h}{x} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{k_x}$$



Napetosti betona:



$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} : \quad \sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

$$\varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} : \quad \sigma_c = f_{cd}$$

Mejna deformacija $\varepsilon_c = \varepsilon_{c2}$ **v vrtišču deformacijskih ravnin C:**

Oddaljenost $(1 - \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2}) \cdot h$ od zgornjega roba prereza $\rightarrow \varepsilon_c = \varepsilon_{c2}$:

$$\zeta \cdot h = k_x \cdot h - (1 - \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2}) \cdot h = (k_x - 1 + \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2}) \cdot h \rightarrow \zeta = (k_x - 1 + \varepsilon_{c2}/\varepsilon_{cu2})$$

Konstitutivni zakon betona v odvisnosti od koordinate ζ :

$$k_x - 1 \leq \zeta \leq k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} : \quad \sigma_c(\zeta) = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right]$$

$$k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} < \zeta \leq k_x : \quad \sigma_c(\zeta) = f_{cd} \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = 1$$

$$\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c \cdot f_{cd}$$

$$k_x - 1 \leq \zeta \leq k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} : \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right]$$

$$k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} < \zeta \leq k_x : \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = 1$$

Potek širine betonskega prereza:

$$\beta(\zeta) = \frac{b(\zeta)}{\bar{b}} \rightarrow b(\zeta) = \beta(\zeta) \cdot \bar{b}$$

$\bar{b}$ - poljubna smiselno izbrana **primerjalna** širina -običajno največja širina prereza

Rezultanta napetosti v betonu F_{cd} :

$$F_{cd} = \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) \cdot dA$$

$$\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c \cdot f_{cd}$$

$$dA = b(\zeta) \cdot h \cdot d\zeta = \bar{b} \cdot \beta(\zeta) \cdot h \cdot d\zeta$$

$$F_{cd} = \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) \cdot dA = \int_{k_x-1}^{k_x} f_{cd} \cdot \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \bar{b} \cdot \beta(\zeta) \cdot h \cdot d\zeta = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot h \cdot \int_{k_x-1}^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta$$

Vpeljemo oznako $n_{c,Rd}$ - brezdimenzionalni koeficient osne nosilnosti betonskega dela prereza:

$$F_{cd} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot h \cdot n_{c,Rd}$$

$$n_{c,Rd} = \int_{k_x-1}^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta$$

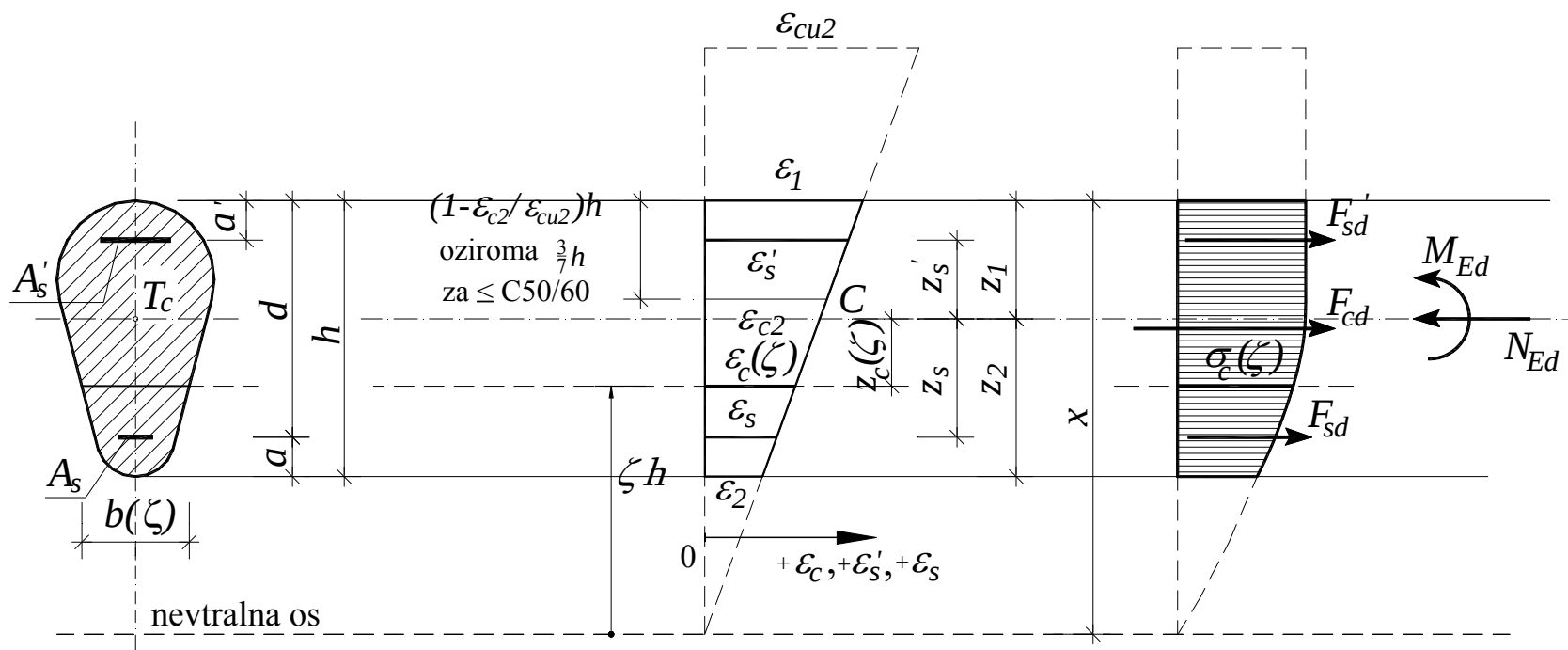
Integracijsko območje razdelimo:

$$k_x - 1 \leq \zeta \leq k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} : \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right]$$

$$k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} < \zeta \leq k_x : \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = 1$$

$$\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c \cdot f_{cd}$$

$$\rightarrow n_{c,Rd} = \int_{k_x-1}^{k_x-1+\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta + \int_{k_x-1+\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}}}^{k_x} \beta(\zeta) \cdot d\zeta$$



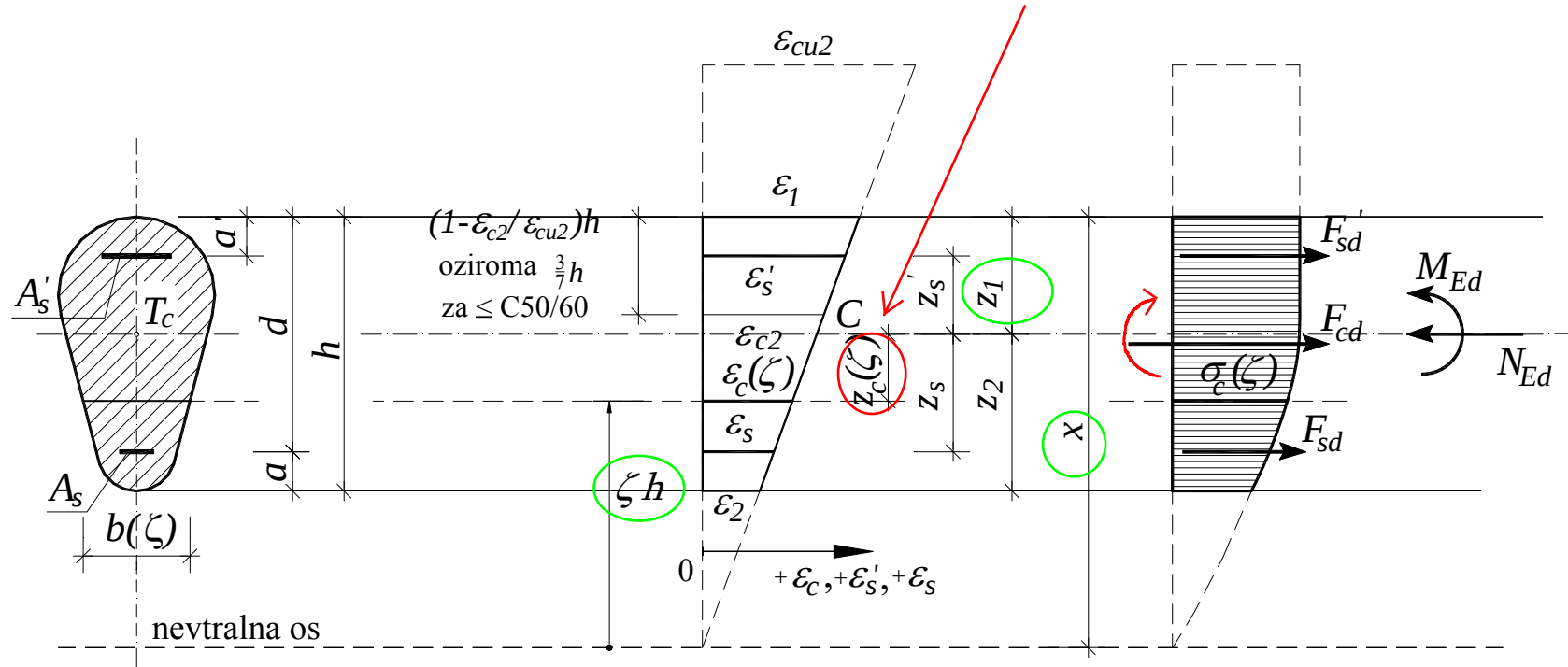
Statični moment napetosti betona σ_c k težišču betonskega prereza:

$$M_{cd} = - \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) \cdot z_c(\zeta) \cdot dA$$

$$z_c = x - \zeta \cdot h - z_1 = (k_x - \zeta - z_1/h) \cdot h$$

$$\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c \cdot f_{cd}$$

$$\begin{aligned} M_{cd} &= - \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) \cdot z_c(\zeta) \cdot dA = \\ &= - \int_{k_x-1}^{k_x} f_{cd} \cdot \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot (k_x - \zeta - \frac{z_1}{h}) \cdot h \cdot \bar{b} \cdot \beta(\zeta) \cdot h \cdot d\zeta = \\ &= f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot h^2 \cdot \int_{k_x-1}^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot (-k_x + \zeta + \frac{z_1}{h}) \cdot d\zeta \end{aligned}$$



Vpeljemo oznako $m_{c,Rd}$ - brezdimenzionalni koeficient upogibne nosilnosti betonskega dela prereza glede na težišče betonskega prereza:

$$M_{cd} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot h^2 \cdot m_{c,Rd}$$

$$m_{c,Rd} = \int_{k_x-1}^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot \left(-k_x + \zeta + \frac{z_1}{h}\right) \cdot d\zeta$$

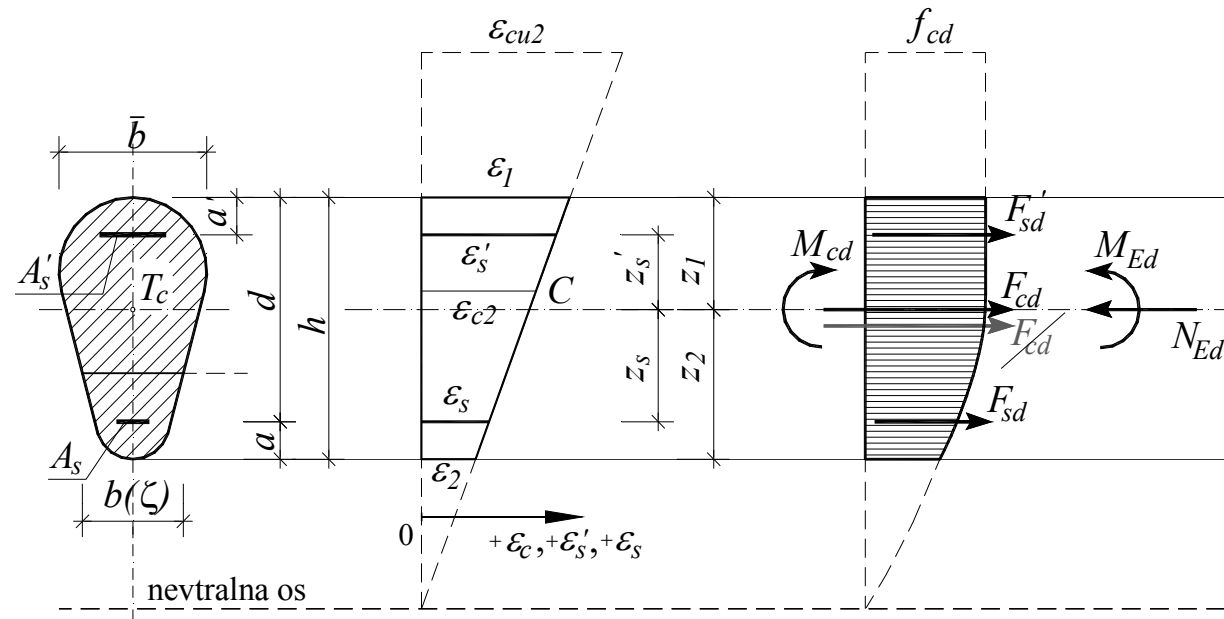
Integracijsko območje razdelimo:

$$k_x - 1 \leq \zeta \leq k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} : \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right]$$

$$k_x - 1 + \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}} < \zeta \leq k_x : \quad \bar{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = 1$$

$$\sigma_c(\zeta) = \bar{\sigma}_c \cdot f_{cd}$$

$$m_{c,Rd} = \int_{k_x-1}^{k_x-1+\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \cdot \zeta}{\varepsilon_{c2} \cdot k_x} \right)^n \right] \cdot \left(-k_x + \zeta + \frac{z_1}{h}\right) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta + \int_{k_x-1+\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}}}^{k_x} \left(-k_x + \zeta + \frac{z_1}{h}\right) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta$$



- Ravnotežje vseh sil v prerezu:

$$F_{sd} + F'_{sd} + F_{cd} - N_{Ed} = 0$$

- ravnotežje momentov glede na težišče betonskega prereza:

$$-F_{sd} \cdot z_s + F'_{sd} \cdot z'_s + M_{cd} - M_{Ed} = 0$$

→ **sistem dveh linearnih enačb z dvema neznankama** - silama v armaturah F_{sd} in F'_{sd} :

$$\begin{cases} F_{sd} + F'_{sd} = N_{Ed} - F_{cd} \\ F_{sd} \cdot z_s - F'_{sd} \cdot z'_s = -(M_{Ed} - M_{cd}) \end{cases}$$

Gledamo kot splošen linearen sistem, ki je enolično rešljiv $\rightarrow$ determinanta matrike koeficientov mora biti neničelna.

Rešitvi sistema: **zaključena izraza za določitev potrebnih sil v armaturah F_{sd} in F'_{sd}**

$$F'_{sd} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z_s + (M_{Ed} - M_{cd})}{z_s + z'_s}$$

$$F_{sd} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z'_s - (M_{Ed} - M_{cd})}{z_s + z'_s} \cdot$$

Napetosti v armaturah σ_s in σ'_s , na podlagi poznanih deformacij ε_s in ε'_s , določimo s pomočjo delovnega diagrama jekla in dobimo **končna izraza za potrebna prereza armatur**:

$$A'_s = \frac{F'_{sd}}{\sigma'_s} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z_s + (M_{Ed} - M_{cd})}{(z_s + z'_s) \cdot \sigma'_s}$$

$$A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z'_s - (M_{Ed} - M_{cd})}{(z_s + z'_s) \cdot \sigma_s} .$$

Ker smo v računu F_{cd} in M_{cd} **upoštevali beton na mestu obeh tlačnih armatur** bi za **povsem natančen račun** morali namesto dejanskih napetosti v armaturah σ_s in σ'_s upoštevati korigirani napetosti $\sigma_{s,c}$ in $\sigma'_{s,c}$:

$$\sigma'_{s,c}(\varepsilon'_s) = \sigma'_s(\varepsilon'_s) - \sigma_c(\varepsilon'_s) \quad \text{in} \quad \sigma_{s,c}(\varepsilon_s) = \sigma_s(\varepsilon_s) - \sigma_c(\varepsilon_s) .$$

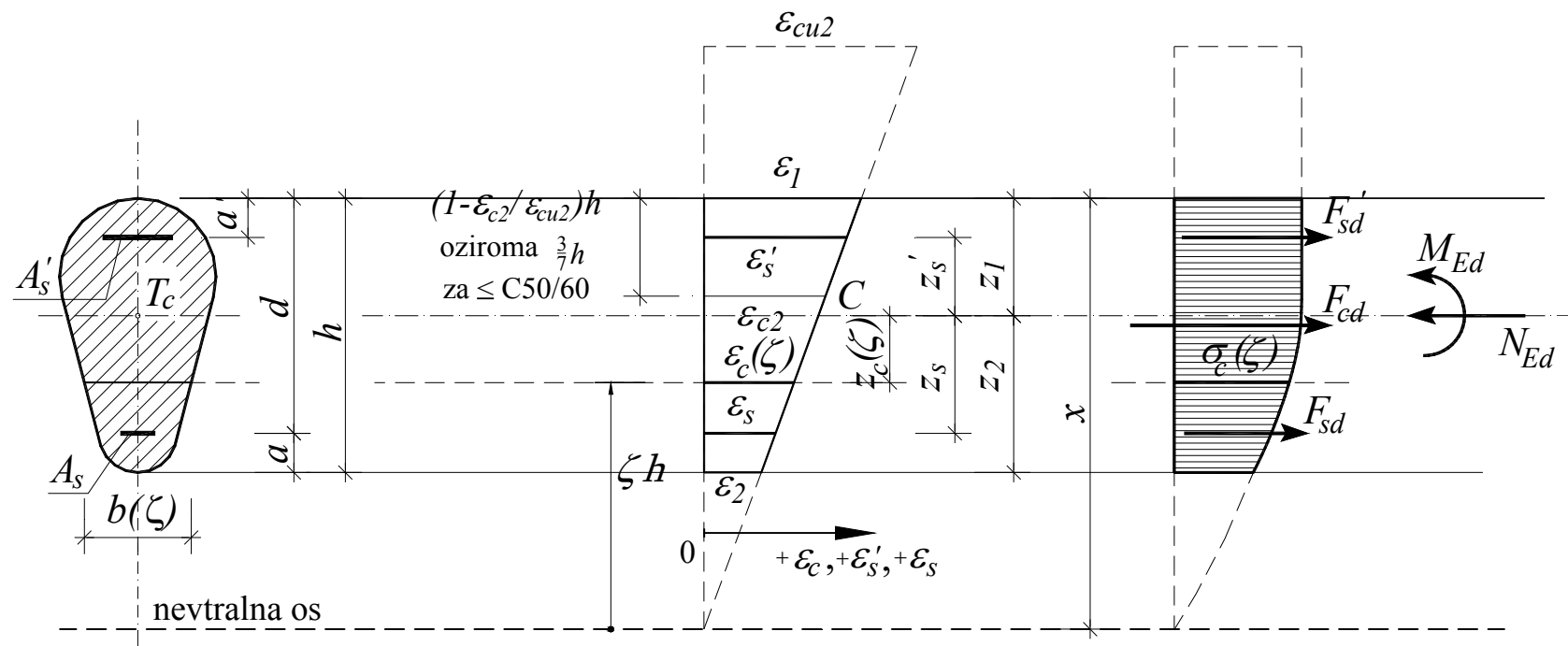
Komentar k možnim rešitvam:

$$F'_{sd} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z_s + (M_{Ed} - M_{cd})}{z_s + z'_s}$$

$$F_{sd} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z'_s - (M_{Ed} - M_{cd})}{z_s + z'_s} \quad .$$

- Predpostavili smo, da je sistem enačb enolično rešljiv!
- Lahko se zgodi, da je sicer matematično korektna rešitev sistema, **fizikalno nesprejemljiva**:
če dobimo vsaj **za eno silo (F_{sd} in F'_{sd}) negativno vrednost**,
kar pomeni, da je **ne moremo doseči s tlačno armaturo**.

To je glede na dejstvo, da obravnavamo le **mejne deformacijske ravnine** (vrtilišče C) in imamo podane povsem splošne vrednosti obremenitev (N_{Ed} in M_{Ed}) **pogosta situacija**, tako, da so **izpeljani izrazi za praktično dimenzioniranje le drugotnega pomena**.



Pri dimenzioniranju za področje male ekscentričnosti tlačne osne sile **so uporabni predvsem pripomočki v obliki interakcijskih diagramov**.

Praktičen postopek določanja potrebnega prereza armature

- Betoni običajne trdnosti ($\leq C50/60$) → vrtilišče deformacijskih ravnin C na 3/7 višine prereza
- Jeklo S500 brez utrditve.

Pri poznani:

- geometriji betonskega prereza in
- izbrani mejni legi deformacijske ravnine

določimo $F_{cd} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot h \cdot n_{c,Rd}$ in $M_{cd} = f_{cd} \cdot \bar{b} \cdot h^2 \cdot m_{c,Rd}$

Brezdimenzionalna koeficienta osne nosilnosti oziroma upogibne nosilnosti betonskega dela prereza $n_{c,Rd}$ in $m_{c,Rd}$ lahko za različne oblike prečnih prerezov podamo (in kasneje odčitamo) v ustreznih preglednicah.

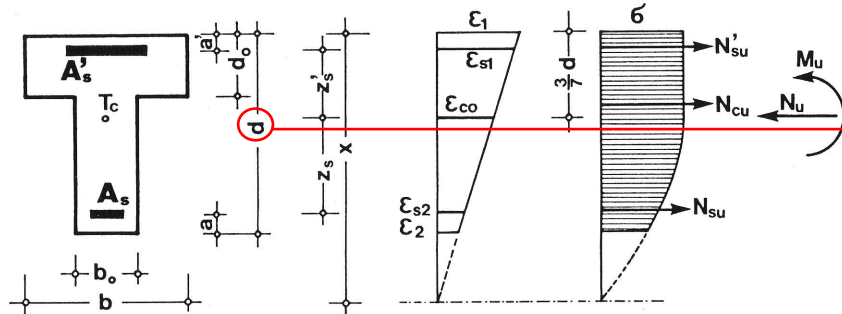
$$n_{c,Rd} = \int_{k_x-1}^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot d\zeta \quad m_{c,Rd} = \int_{k_x-1}^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) \cdot \beta(\zeta) \cdot \left(-k_x + \zeta + \frac{z_1}{h}\right) \cdot d\zeta$$

Pravokotna oblika prečnega prereza:

Pravokotni prerez: $F_{cd} = f_{cd} \cdot b \cdot h \cdot n_{c,Rd}$; $M_{cd} = f_{cd} \cdot b \cdot h^2 \cdot m_{c,Rd}$											
ε_l [‰]	3,50	3,35	3,20	3,05	2,90	2,75	2,60	2,45	2,30	2,15	2,00
ε_2 [‰]	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
$n_{c,Rd}$	,8095	,8457	,8781	,9067	,9314	,9524	,9695	,9829	,9924	,9981	1,000
$m_{c,Rd}$	,0680	,0551	,0435	,0333	,0245	,0170	,0109	,0061	,0027	,0007	0,000

Brezdimenzionalni koeficient osne nosilnosti betonskega dela prereza $n_{c,Rd}$ in brezdimenzionalni koeficient upogibne nosilnosti betonskega dela prereza $m_{c,Rd}$

V »**Priročniku za dimensioniranje armiranobetonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj**« avtorjev R. Rogač, F. Saje in M. Lozej, so na straneh 212 -219 koeficienti $n_{c,Rd} = n_{cu}$ in $m_{c,Rd} = m_{cu}$ podani za **nekaterne oblike »T« in »I« prerezov iz betonov običajne trdnosti.**



$$k = \frac{\mu'}{\mu}$$

$$\delta = \frac{a}{d} = \frac{a'}{d}$$

Simetričen prerez:

$$m_{su} = \mu' \cdot (0.5 - \delta) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s}{f_y} \cdot \frac{1}{k} \right)$$

Nesimetričen prerez:

$$m_{su} = \mu' \cdot \left[\left(\frac{z_1}{d} - \delta \right) - \left(\frac{z_2}{d} - \delta \right) \cdot \frac{\sigma_s}{f_y} \cdot \frac{1}{k} \right]$$

$$\bar{b}_o = \frac{b_o}{b}, \quad \bar{d}_o = \frac{d_o}{d}$$

$$N_u = \sum N_i \cdot \gamma_{ui}$$

$$M_u = \sum M_i \cdot \gamma_{ui}$$

$$N_u = A_c \cdot f_{cd} \cdot n_u$$

$$M_u = A_c \cdot d \cdot f_{cd} \cdot m_u$$

$$n_u = n_{cu} + \frac{f_y}{f_{cd}} \cdot m_{su}$$

$$m_u = m_{cu} + \frac{f_y}{f_{cd}} \cdot m_{su}$$

$$n_{su} = \mu' \cdot \left(1 + \frac{\sigma_s}{f_y} \cdot \frac{1}{k} \right)$$

Prerez T oblike - nosilnost betona

Tabela 8

$-\varepsilon_1$ [%]	3.50	3.20	2.90	2.60	2.30
$-\varepsilon_2$ [%]	0.00	0.40	0.80	1.20	1.60

$\bar{b}_o$	$\bar{d}_o$	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}
10	.10	.8997	.0572	.9358	.0366	.9639	.0206	.9840	.0091	.9960	.0023
	.15	.9189	.0487	.9481	.0312	.9708	.0175	.9870	.0078	.9968	.0019
	.20	.9320	.0418	.9565	.0267	.9755	.0150	.9891	.0067	.9973	.0017
	.25	.9414	.0361	.9625	.0231	.9789	.0130	.9906	.0058	.9977	.0014
	.30	.9485	.0315	.9671	.0202	.9815	.0114	.9918	.0050	.9979	.0013
	.35	.9541	.0277	.9706	.0177	.9835	.0100	.9927	.0044	.9982	.0011
15	.40	.9586	.0245	.9735	.0157	.9851	.0088	.9934	.0039	.9983	.0010
	.50	.9648	.0196	.9774	.0125	.9873	.0070	.9944	.0031	.9986	.0008
	.10	.8784	.0632	.9222	.0405	.9562	.0228	.9805	.0101	.9951	.0025
	.15	.8970	.0569	.9341	.0364	.9629	.0205	.9835	.0091	.9959	.0023
	.20	.9107	.0509	.9429	.0326	.9679	.0183	.9857	.0081	.9964	.0020
	.25	.9212	.0455	.9496	.0291	.9716	.0164	.9874	.0073	.9968	.0018
20	.30	.9295	.0407	.9549	.0261	.9746	.0147	.9887	.0065	.9972	.0016
	.35	.9362	.0366	.9591	.0234	.9770	.0132	.9898	.0059	.9974	.0015
	.40	.9417	.0330	.9627	.0211	.9790	.0119	.9907	.0053	.9977	.0013
	.50	.9498	.0270	.9678	.0173	.9819	.0097	.9920	.0043	.9980	.0011
	.10	.8639	.0661	.9129	.0423	.9510	.0238	.9782	.0106	.9946	.0026
	.15	.8810	.0615	.9238	.0394	.9571	.0221	.9810	.0098	.9952	.0025
25	.20	.8942	.0566	.9323	.0362	.9619	.0204	.9831	.0091	.9958	.0023
	.25	.9048	.0519	.9390	.0332	.9657	.0187	.9848	.0083	.9962	.0021
	.30	.9134	.0475	.9446	.0304	.9688	.0171	.9861	.0076	.9965	.0019
	.35	.9206	.0434	.9492	.0278	.9714	.0156	.9873	.0069	.9968	.0017
	.40	.9267	.0397	.9531	.0254	.9736	.0143	.9883	.0064	.9971	.0016
	.50	.9360	.0333	.9590	.0213	.9770	.0120	.9898	.0053	.9974	.0013
30	.10	.8535	.0675	.9062	.0432	.9473	.0243	.9766	.0108	.9941	.0027
	.15	.8686	.0642	.9159	.0411	.9527	.0231	.9790	.0103	.9947	.0026
	.20	.8810	.0604	.9238	.0386	.9571	.0217	.9810	.0097	.9952	.0024
	.25	.8912	.0564	.9303	.0361	.9608	.0203	.9826	.0090	.9956	.0023
	.30	.8997	.0524	.9358	.0336	.9639	.0189	.9840	.0084	.9960	.0021
	.35	.9071	.0487	.9405	.0311	.9666	.0175	.9851	.0078	.9963	.0019
35	.40	.9134	.0451	.9446	.0289	.9688	.0162	.9861	.0072	.9965	.0018
	.50	.9234	.0387	.9510	.0248	.9724	.0139	.9877	.0062	.9969	.0015

Prerez T oblike - nosilnost betona

Tabela 8

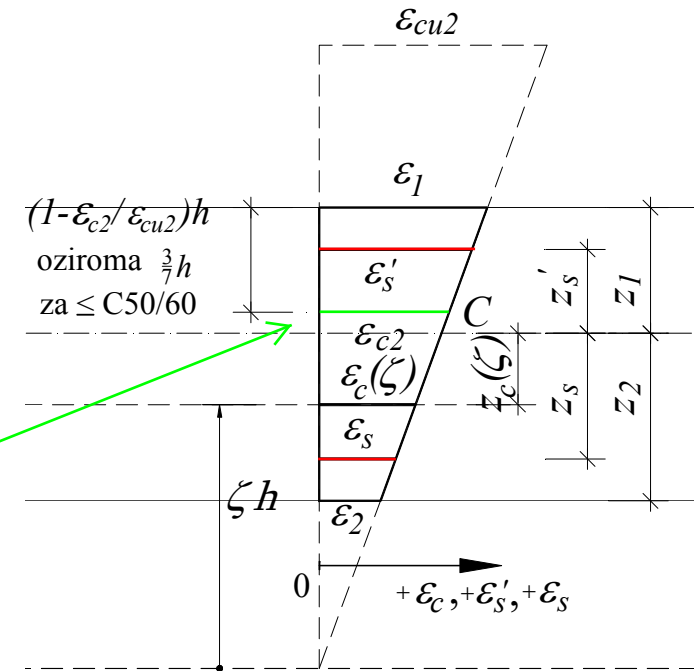
$-\varepsilon_1$ [%]	3.50	3.20	2.90	2.60	2.30
$-\varepsilon_2$ [%]	0.00	0.40	0.80	1.20	1.60

$\bar{b}_o$	$\bar{d}_o$	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}	n_{cu}	m_{cu}
30	.10	.8456	.0683	.9012	.0437	.9444	.0246	.9753	.0109	.9938	.0027
	.15	.8589	.0659	.9097	.0422	.9492	.0237	.9774	.0105	.9944	.0026
	.20	.8701	.0629	.9169	.0403	.9532	.0226	.9792	.0101	.9948	.0025
	.25	.8797	.0596	.9230	.0381	.9567	.0215	.9808	.0095	.9952	.0024
	.30	.8880	.0562	.9283	.0359	.9597	.0202	.9821	.0090	.9955	.0022
	.35	.8952	.0528	.9329	.0338	.9623	.0190	.9832	.0084	.9958	.0021
35	.40	.9015	.0495	.9369	.0317	.9645	.0178	.9842	.0079	.9961	.0020
	.50	.9117	.0433	.9435	.0277	.9682	.0156	.9859	.0069	.9965	.0017
	.10	.8394	.0687	.8972	.0440	.9422	.0247	.9743	.0110	.9936	.0027
	.15	.8510	.0670	.9047	.0429	.9464	.0241	.9762	.0107	.9940	.0027
	.20	.8611	.0646	.9111	.0414	.9500	.0233	.9778	.0103	.9944	.0026
	.25	.8699	.0619	.9167	.0396	.9532	.0223	.9792	.0099	.9948	.0025
40	.30	.8777	.0590	.9217	.0378	.9560	.0212	.9804	.0094	.9951	.0024
	.35	.8846	.0560	.9261	.0358	.9584	.0202	.9815	.0090	.9954	.0022
	.40	.8907	.0530	.9301	.0339	.9607	.0191	.9825	.0085	.9956	.0021
	.50	.9009	.0472	.9366	.0302	.9643	.0170	.9841	.0076	.9960	.0019
	.10	.8344	.0689	.8940	.0441	.9404	.0248	.9735	.0110	.9934	.0028
	.15	.8445	.0677	.9005	.0433	.9440	.0244	.9751	.0108	.9938	.0027
45	.20	.8535	.0659	.9062	.0421	.9473	.0237	.9766	.0105	.9941	.0026
	.25	.8615	.0636	.9113	.0407	.9501	.0229	.9778	.0102	.9945	.0025
	.30	.8686	.0612	.9159	.0392	.9527	.0220	.9790	.0098	.9947	.0024
	.35	.8751	.0586	.9201	.0375	.9550	.0211	.9800	.0094	.9950	.0023
	.40	.8810	.0559	.9238	.0358	.9571	.0201	.9810	.0089	.9952	.0022
	.50	.8908	.0506	.9301	.0324	.9607	.0182	.9825	.0081	.9956	.0020
50	.10	.8303	.0689	.8914	.0441	.9389	.0248	.9728	.0110	.9932	.0028
	.15	.8390	.0681	.8970	.0436	.9421	.0245	.9742	.0109	.9936	.0027
	.20	.8469	.0667	.9020	.0427	.9449	.0240	.9755	.0107	.9939	.0027
	.25	.8541	.0649	.9066	.0415	.9475	.0234	.9767	.0104	.9942	.0026
	.30	.8606	.0629	.9108	.0402	.9498	.0226	.9777	.0101	.9944	.0025
	.35	.8666	.0606	.9146	.0388	.9520	.0218	.9787	.0097	.9947	.0024
55	.40	.8721	.0583	.9181	.0373	.9539	.0210	.9795	.0093	.9949	.0023
	.50	.8815	.0535	.9242	.0342	.9573	.0192	.9810	.0086	.9953	.0021

V odvisnosti od podane projektne obremenitve (N_{Ed} in M_{Ed}) in odpornosti betonskega dela prereza (F_{cd} in M_{cd}) določimo potrebna prereza armatur.

$$F'_{sd} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z_s + (M_{Ed} - M_{cd})}{z_s + z'_s}$$

$$F_{sd} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z'_s - (M_{Ed} - M_{cd})}{z_s + z'_s} \cdot$$



Betoni normalne trdnosti:

deformacija v vrtilišču C $\varepsilon_{c2} = 2\text{‰}$

→ deformacija jekla ε_s v vsakem primeru manjša od meje elastičnosti $\varepsilon_{yd} = 2,17\text{‰}$

→ lahko pa se zgodi, da tudi armatura A'_s ni plastificirana $\varepsilon'_s \leq \varepsilon_{yd}$.

→ v izrazih za določitev **armature upoštevamo zapisa:**

$$\sigma'_s = \left(\sigma'_s / f_{yd} \right) \cdot f_{yd} \quad \text{in} \quad \sigma_s = \left(\sigma_s / f_{yd} \right) \cdot f_{yd}$$

Izkoriščenosti armatur oz. razmerij σ'_s/f_{yd} in σ_s/f_{yd} za:

- izbrane lege deformacijskih ravnin (ε_1 in ε_{c2}) ter
- parametra $\delta = a/h$ in $\delta' = a'/h$ vnajprej tabeliramo:

$$\sigma'_s = \min[\varepsilon'_s \cdot E_s; f_{yd}] \rightarrow \sigma'_s/f_{yd} = \min\left[\left(\varepsilon_1 - \frac{7}{3}\delta'(\varepsilon_1 - \varepsilon_{c2})\right)\frac{1}{\varepsilon_{yd}}; 1\right]$$

$$\sigma_s = \min[\varepsilon_s \cdot E_s; f_{yd}] \rightarrow \sigma_s/f_{yd} = \min\left[\left(\varepsilon_1 - \frac{7}{3}(1-\delta)(\varepsilon_1 - \varepsilon_{c2})\right)\frac{1}{\varepsilon_{yd}}; 1\right]$$

Za izbrano **mejno lego deformacijske ravnine**, ki poteka skozi vrtilišče C lahko na podlagi podobnih trikotnikov dobimo zveze med deformacijami:

$$\varepsilon_2 = \frac{7 \cdot \varepsilon_{c2} - 4 \cdot \varepsilon_1}{3}; \quad \varepsilon'_s = \varepsilon_1 - \frac{7}{3}\delta'(\varepsilon_1 - \varepsilon_{c2}); \quad \varepsilon_s = \varepsilon_1 - \frac{7}{3}(1-\delta)(\varepsilon_1 - \varepsilon_{c2})$$

Pri tem velja: $\delta = a/h$ in $\delta' = a'/h$

Izkoriščenost zgornje armature A'_s : σ'_s / f_{yd}											
ε_1 [‰]	3,5	3,35	3,2	3,05	2,9	2,75	2,6	2,45	2,3	2,15	2
ε_2 [‰]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\delta' = 0,050$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9809	0,9200
$\delta' = 0,075$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9769	0,9200
$\delta' = 0,100$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9729	0,9200
$\delta' = 0,150$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9648	0,9200
$\delta' = 0,200$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9936	0,9568	0,9200
$\delta' = 0,250$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9775	0,9487	0,9200

Izkoriščenost zgornje armature A'_s : σ'_s / f_{yd} - za vse oblike betonskih prerezov in jeklo S500

Izkoriščenost spodnje armature A_s : σ_s / f_{yd}											
ε_1 [‰]	3,5	3,35	3,2	3,05	2,9	2,75	2,6	2,45	2,3	2,15	2
ε_2 [‰]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\delta = 0,050$	0,0805	0,1644	0,2484	0,3323	0,4163	0,5002	0,5842	0,6681	0,7521	0,8360	0,9200
$\delta = 0,075$	0,1207	0,2007	0,2806	0,3605	0,4404	0,5204	0,6003	0,6802	0,7601	0,8400	0,9200
$\delta = 0,100$	0,1610	0,2369	0,3128	0,3887	0,4646	0,5405	0,6164	0,6923	0,7682	0,8441	0,9200
$\delta = 0,150$	0,2415	0,3093	0,3772	0,4450	0,5129	0,5807	0,6486	0,7164	0,7843	0,8521	0,9200
$\delta = 0,200$	0,3220	0,3818	0,4416	0,5014	0,5612	0,6210	0,6808	0,7406	0,8004	0,8602	0,9200
$\delta = 0,250$	0,4025	0,4542	0,5060	0,5577	0,6095	0,6612	0,7130	0,7647	0,8165	0,8682	0,9200

Izkoriščenost spodnje armature A_s : σ_s / f_{yd} - za vse oblike betonskih prerezov in jeklo S500

Z upoštevanjem oznak:

$$\sigma'_s = \left(\sigma'_s / f_{yd} \right) \cdot f_{yd} \quad \text{in} \quad \sigma_s = \left(\sigma_s / f_{yd} \right) \cdot f_{yd}$$

dobimo končna izraza za račun potrebnih prerezov armatur:

$$A'_s = \frac{F'_{sd}}{\sigma'_s} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z_s + (M_{Ed} - M_{cd})}{(z_s + z'_s) \cdot \left(\sigma'_s / f_{yd} \right) \cdot f_{yd}}$$

$$A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s} = \frac{(N_{Ed} - F_{cd}) \cdot z'_s - (M_{Ed} - M_{cd})}{(z_s + z'_s) \cdot \left(\sigma_s / f_{yd} \right) \cdot f_{yd}} \cdot$$

Pri praktičnem dimenzioniranju razmerji σ'_s / f_{yd} in σ_s / f_{yd} odčitamo iz predhodno podanih preglednic.

Centrični tlak

Za ($e = 0$) in simetrično razporejene armature ($z'_s = z_s$ in $A'_s = A_s$):

Mejne deformacije $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_s = \varepsilon'_s = \varepsilon_{c2}$

Odpornost prereza:

$$N_{Rd} = A_c \cdot f_{cd} + (A_s + A'_s) \cdot f_{yd} \cdot \min\left(\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{yd}}; 1\right).$$

Pogoj ravnotežja prereza: $N_{Ed} = N_{Rd} \rightarrow$ potrebna prereza armature pri znani obremenitvi:

$$A_s = A'_s = \frac{N_{Ed} - A_c \cdot f_{cd}}{2 \cdot f_{yd} \cdot \min\left(\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{yd}}; 1\right)}.$$

V splošnem mora **biti težišče vse armature A_s v težišču betonskega prereza:**

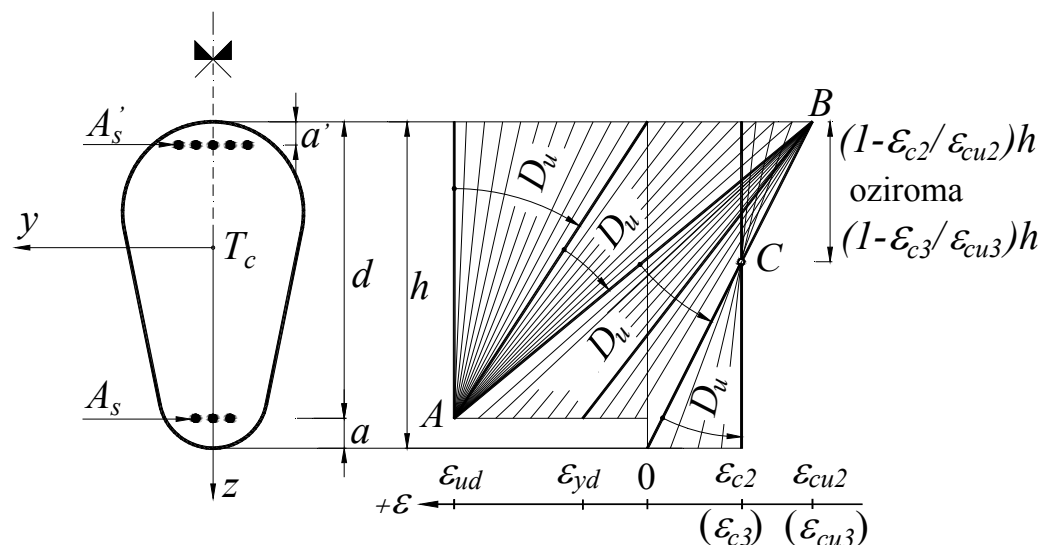
$$A_s = \frac{N_{Ed} - A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd} \cdot \min\left(\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{yd}}; 1\right)}.$$

Za jeklo S500 in $\leq C50/60$: $\min\left(\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{yd}}; 1\right) = 0,92$

Interakcijski diagrami mejne odpornosti AB prerezov pri enojnem upogibu z osno silo

Mejna osno-upogibna odpornost armiranega betonskega prereza je določena z **mejnimi deformacijskimi ravninami** (D_u).

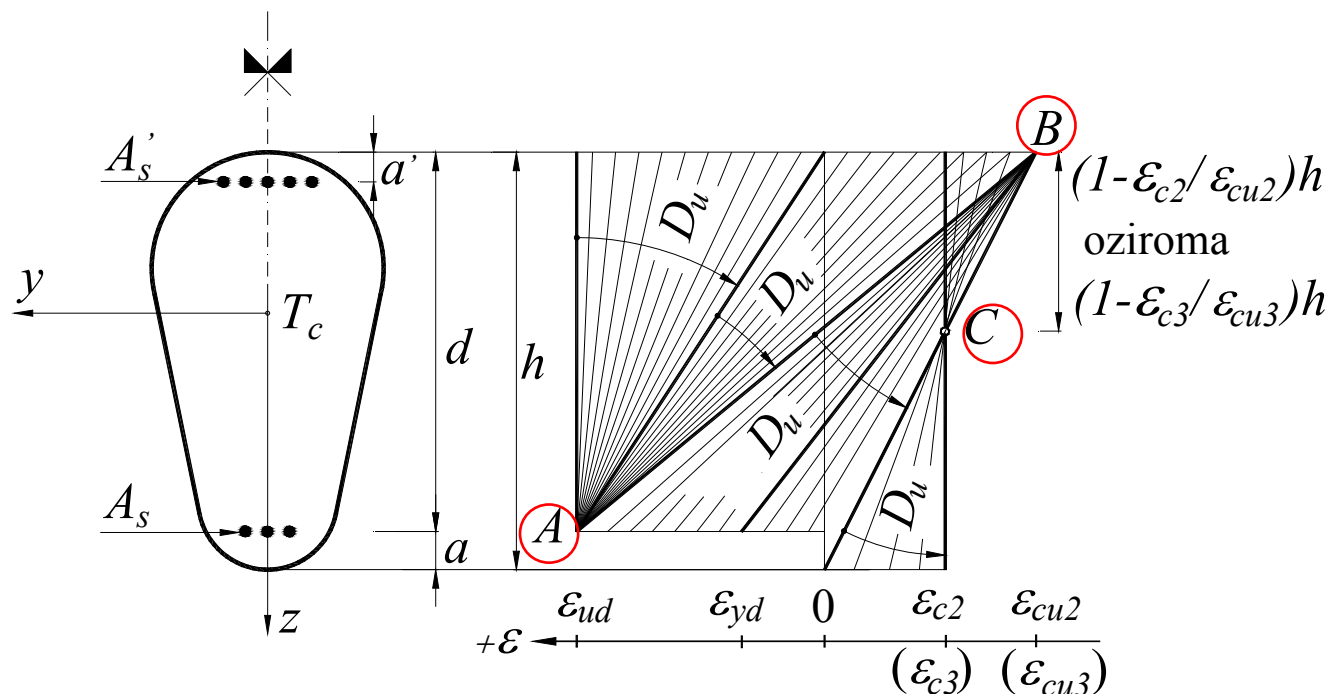
To so ravnine pri katerih je vsaj v eni ali več točkah betona oziroma armature dosežena konvencionalna mejna deformacija ε_{cu2} (ali ε_{cu3}) oziroma ε_{ud}



$\varepsilon_{c2}; \varepsilon_{c3}; \varepsilon_{cu2}; \varepsilon$ - značilne deformacije betona

$\varepsilon_{ud}; \varepsilon_{yd}$ - deformacija jekla na meji elastičnosti oziroma

$A; A'$ - prerez spodnje in zgornje armature



Pri tem so točke **A**, **B** in **C** t.i. **vrtišča deformacijskih ravnin**:

Točka A je določena z mejno deformacijo natezne armature ϵ_{ud} ,

točka B z mejno tlačno deformacijo betona pri upogibu ϵ_{cu2} (ali ϵ_{cu3}),

točka C pa z mejno tlačno deformacijo pri čistem tlaku ϵ_{c2} (ali ϵ_{c3}).

Vektor osno-upogibne mejne odpornosti poznane preceza $\{R_d\}$ dobimo z ustrezno integracijo napetosti betona in armature po prečnem prerezu:

$$\{R_d\} = \begin{Bmatrix} N_{Rd,x} \\ M_{Rd,y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_{Rd} \\ M_{Rd} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \iint_A \sigma_{xx} dA = \iint_{A_c} \sigma_c dA_c + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma_{si} \\ \iint_A z \sigma_{xx} dA = \iint_{A_c} z_c \sigma_c dA_c + \sum_{i=1}^n z_{si} A_{si} \sigma_{si} \end{Bmatrix}$$

($\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c)$, $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_s)$) - pri tem so za razliko od predhodnih razdelkov s posameznimi specifičnimi primeri obremenitve tu kot pozitivne označene natezne deformacije in natezne napetosti, z_c in z_{si} pa so koordinate točk betona oziroma armature z ustreznim predznakom)

Vektor osno-upogibne odpornosti prereza zapišemo z deformacijami in projektnima trdnostma obeh materialov f_{cd} in f_{yd} :

$$\{R_d\} = \begin{Bmatrix} N_{Rd}(D_u, f_{cd}, f_{yd}, geometrija) \\ M_{Rd}(D_u, f_{cd}, f_{yd}, geometrija) \end{Bmatrix}.$$

Vsaki mejni deformacijski ravnini D_u , enolično pripada **en sam vektor mejne nosilnosti** $\{R_d\}$ prereza definirane **geometrije**.

Geometrija:

- konkretna oblika betonskega prereza s poznanimi dimenzijami
- ter razporeditev in količina armature v posameznih točkah.

S spreminjanjem mejnih deformacijskih ravnin po korakih pokrijemo celotno deformacijsko območje mejnih deformacijskih ravnin in za vsako izbrano lego mejne deformacijske ravnine določimo pripadajoči vektor osno-upogibne mejne odpornosti prereza, dobimo **vse možne vektorje mejne odpornosti** znanega armiranobetonskega prereza.

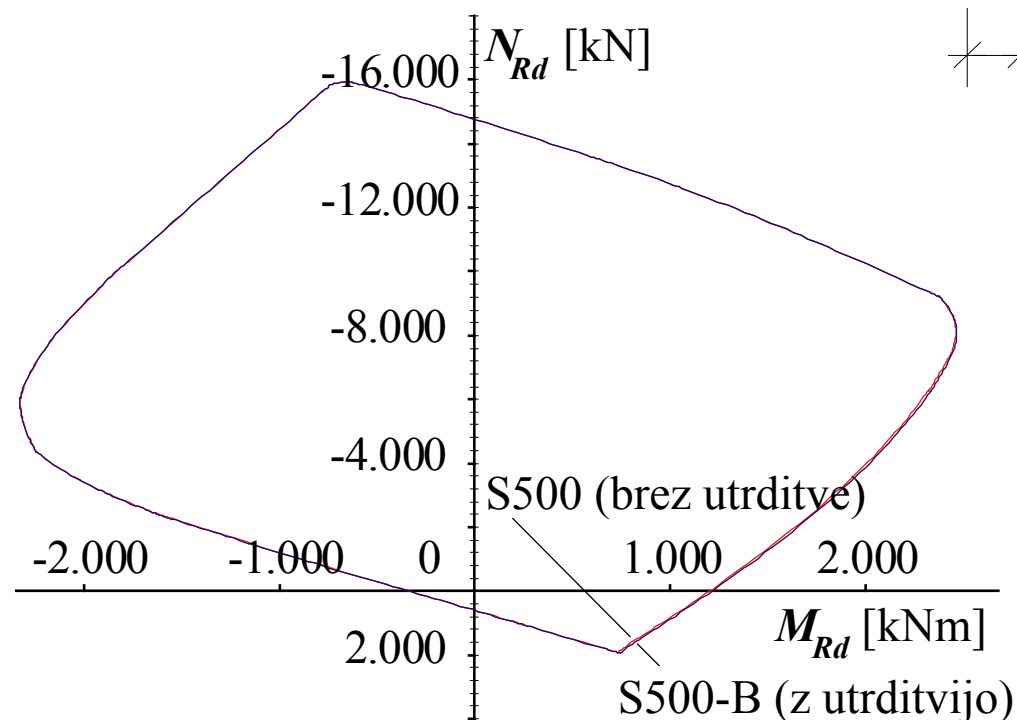
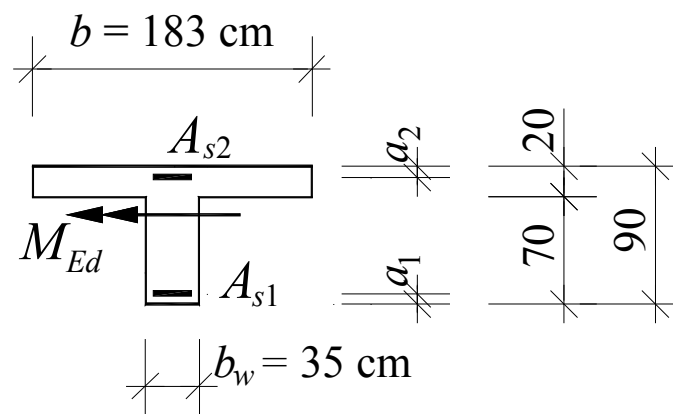
Primer interakcijskega diagrama pri katerem deformacije opišejo vse možne položaje (za pozitivne in negativne vrednosti upogibnega momenta)

Beton C35/45

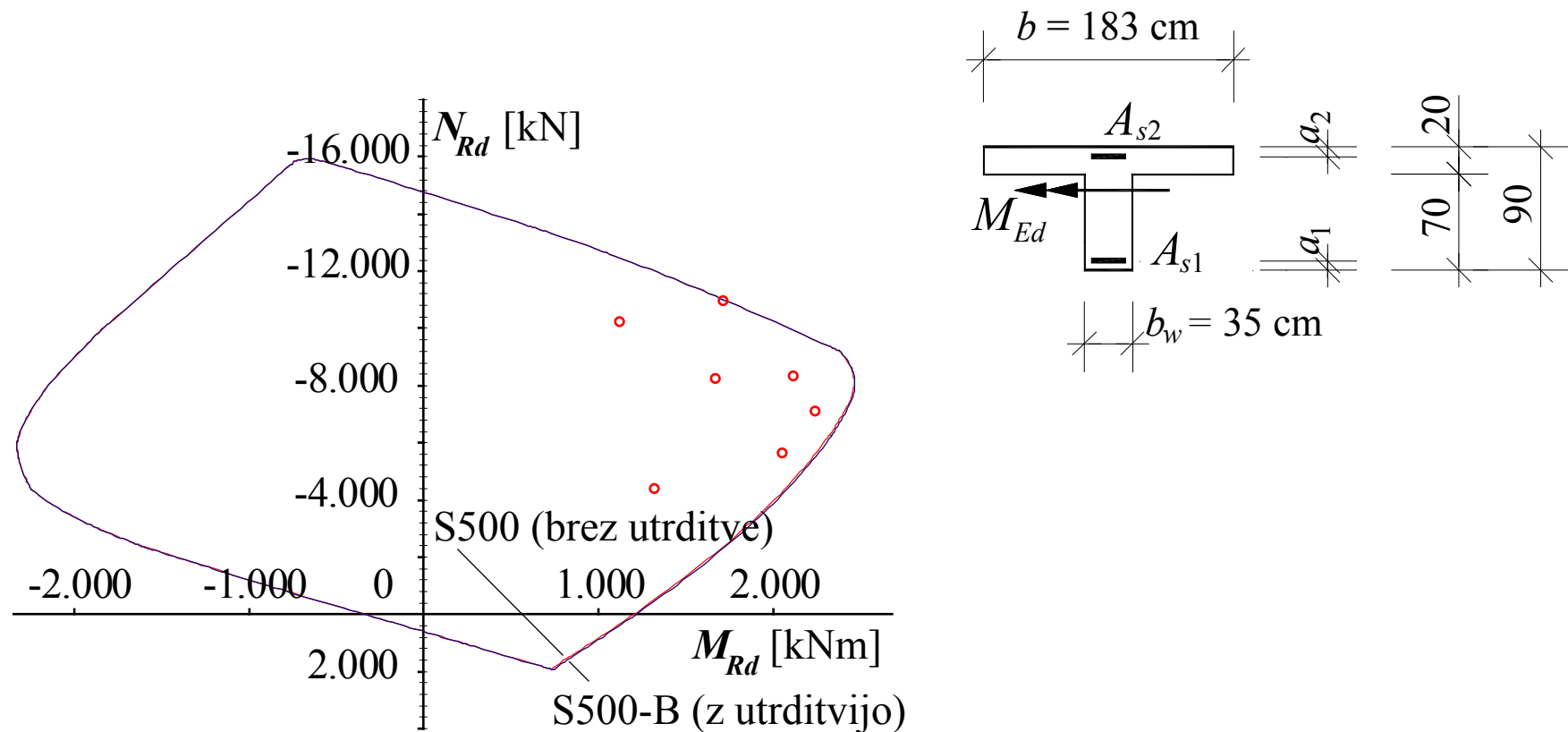
Armatura S500 (brez utrditve) oziroma
S 500-B (razred duktilnosti B)

$A_{s2} = 9,8 \text{ cm}^2$ ($2\phi 25 \text{ mm}$); $a_2 = 7 \text{ cm}$

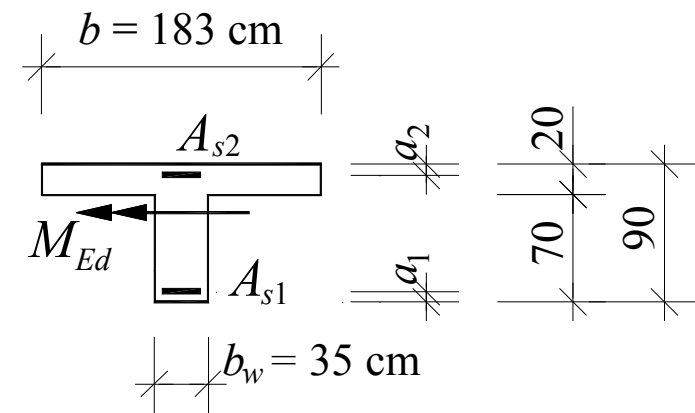
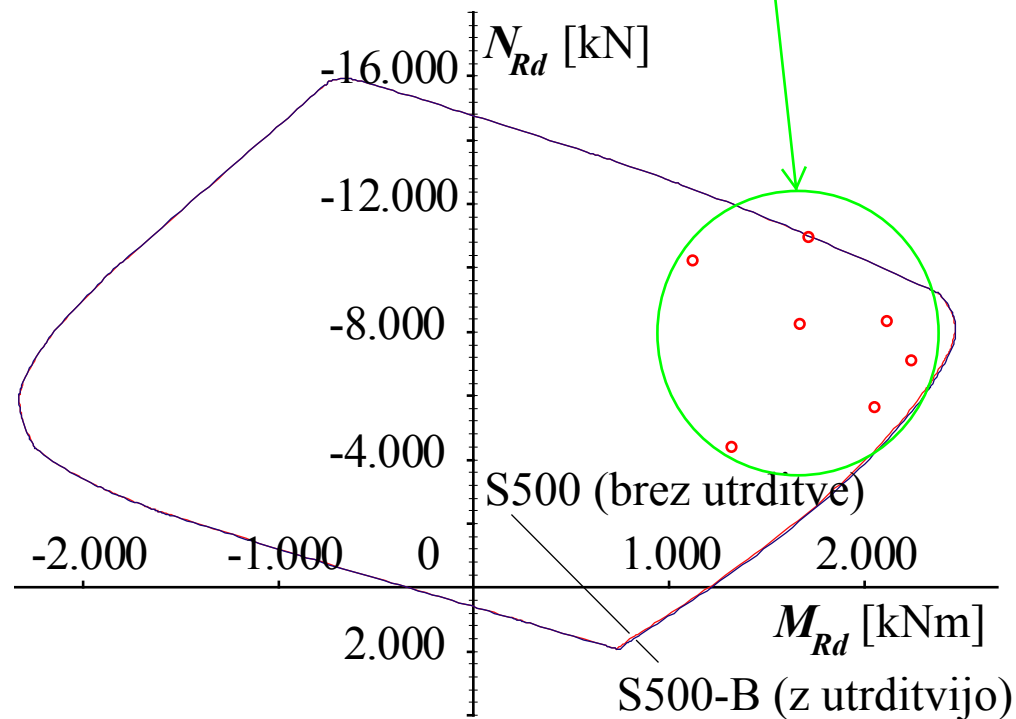
$A_{s1} = 34,4 \text{ cm}^2$ ($7\phi 25 \text{ mm}$); $a_1 = 7 \text{ cm}$



Če v tak diagram **vrišemo vse kombinacije pripadajočih vektorjev obremenitve prereza** (N_{Ed} , M_{Ed}) in se le-te nahajajo znotraj območja krivulje lahko, tak diagram uporabimo **kot dokaz zadostne varnosti prereza**



Če v tak diagram vrišemo vse kombinacije pripadajočih vektorjev obremenitve prereza (N_{Ed} , M_{Ed}) in se le-te nahajajo znotraj območja krivulje lahko, tak diagram uporabimo **kot dokaz zadostne varnosti prereza**



Interakcijski diagrami v normirani obliki

Za praktično dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov na osno-upogibno obremenitev so zelo primerni **interakcijski diagrami v normirani obliki**, ki jih najdemo v različni literaturi.

Projektno osno silo in projektni upogibni moment običajno **normiramo na naslednji način**:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}}$$

Ker pri dimenzioniranju izhajamo iz ravnotežja prereza velja tudi:

$$n_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{N_{Rd}}{A_c \cdot f_{cd}} = n_{Rd}$$

$$m_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Rd}}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = m_{Rd}$$

zato v nekaterih pripomočkih iz literature zasledimo diagrame **označene kot zveze** n_{Ed}/m_{Ed} **v drugih pa kot zveze** n_{Rd}/m_{Rd} .

Razporeditev armature:

$$k = \frac{A'_s}{A_s} \text{ in } \delta = \frac{a}{h},$$

Količina armature - mehanska stopnjo armiranja μ_0 :

$$\mu_0 = (1 + k) \cdot \mu \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{(A_s + A'_s) \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}.$$

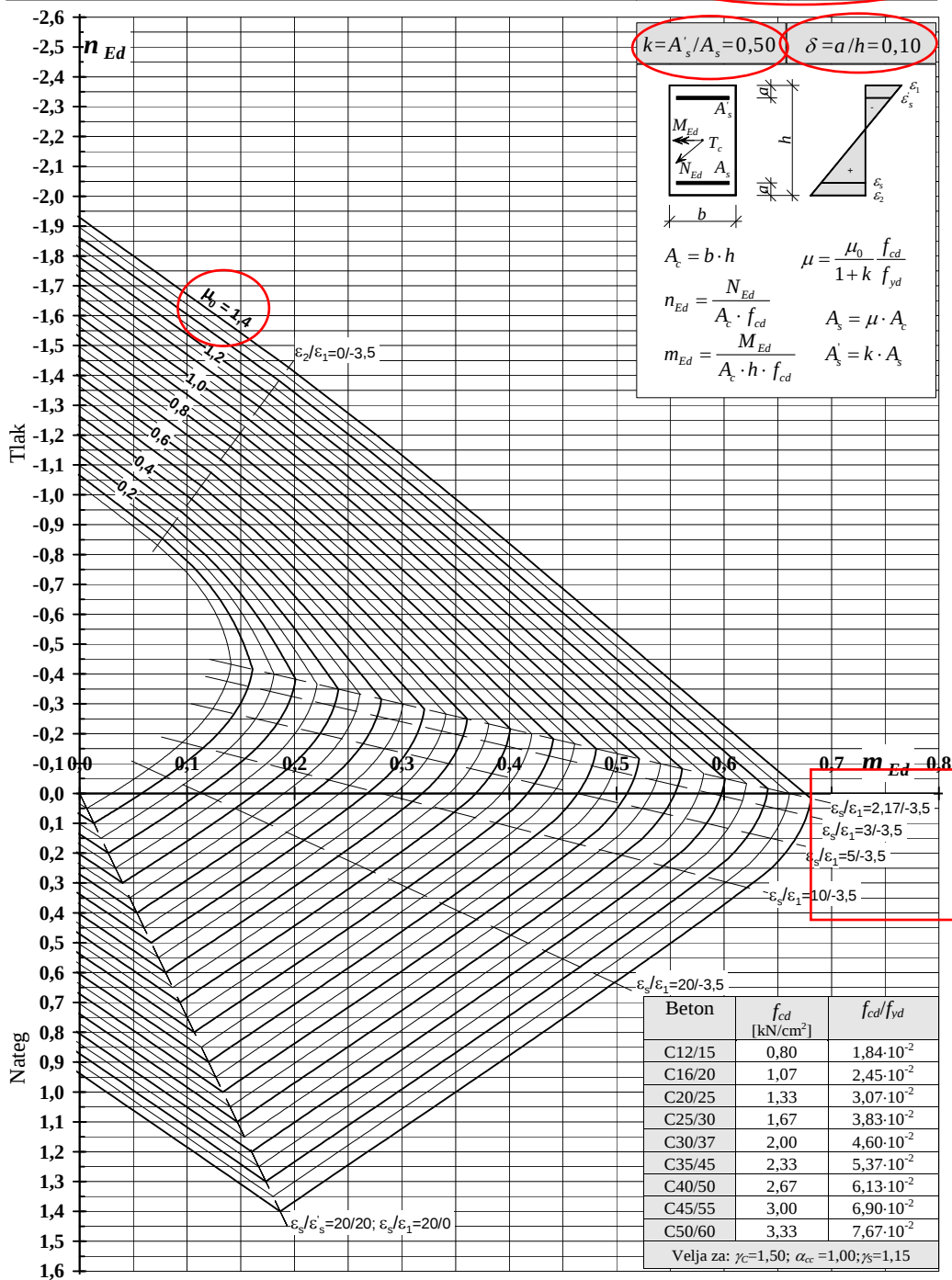
Literatura: praviloma **so skupaj zbrane krivulje**, ki pripadajo vnaprej izbranim vrednostim **mehanske stopnje armiranja μ_0** .

S podatki na diagramih lahko običajno tudi **ocenimo deformacije značilnih točk prereza**.

PRAVOKOTNI PREREZ

S 500

do C50/60



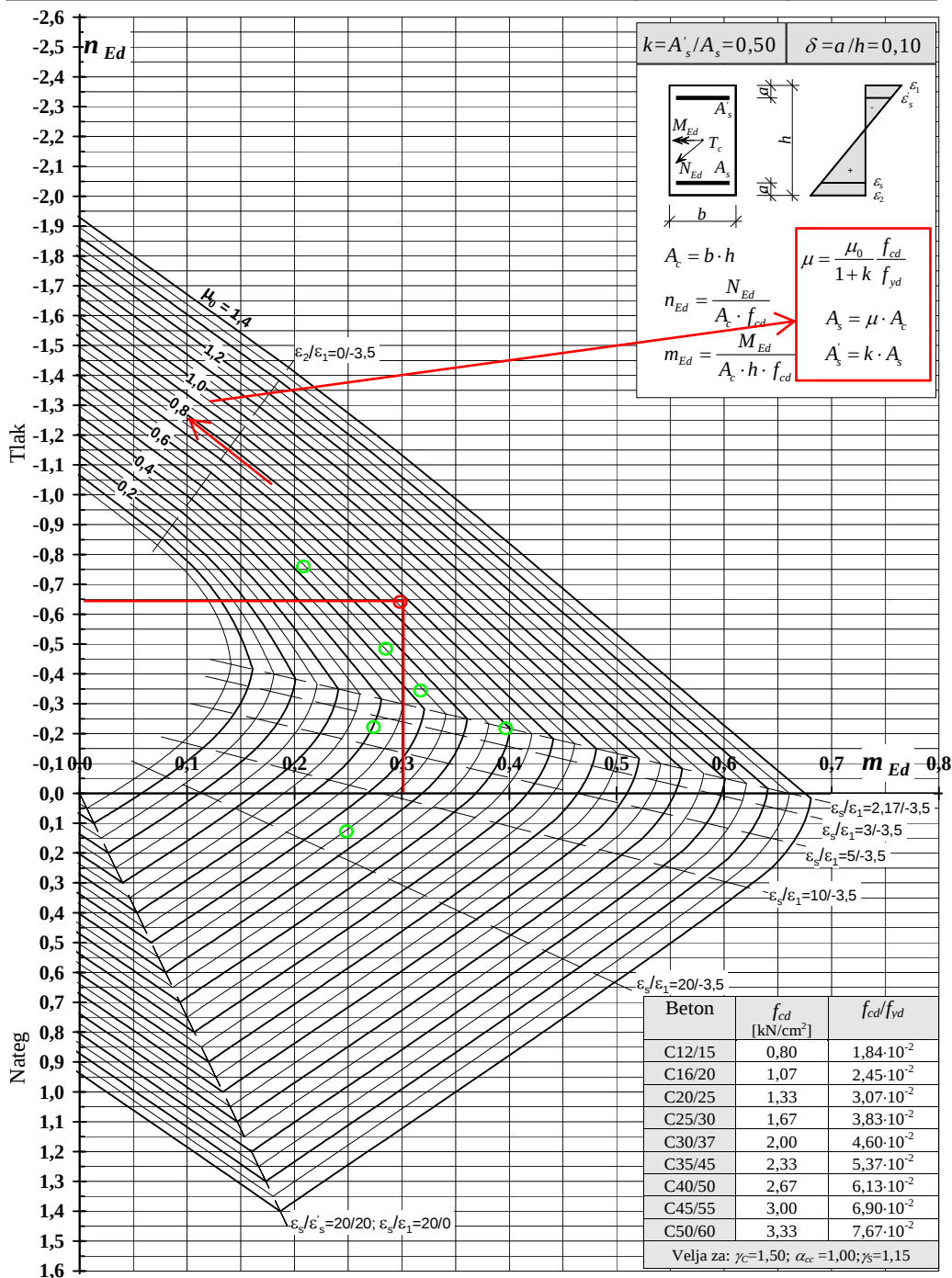
Najpogostejše glede na kombinacije obremenitev n_{Ed}/m_{Ed} določimo potrebno največjo vrednost mehanske stopnje armiranja μ_0 , nato pa še **potrebna prereza armature po izrazih**:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1+k} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \rightarrow \boxed{A_s = \mu \cdot A_c} ; \boxed{A'_s = k \cdot A_s}$$

PRAVOKOTNI PREREZ

S 500

do C50/60



S pomočjo interakcijskih diagramov v normirani obliki pa lahko **rešujemo tudi druge probleme**. Tako lahko npr. pri poznani razporeditvi in količini armature na podlagi ustrezno izbrane krivulje določimo ekstremne obremenitve:

- $\max M_{Ed}$ pri predpisani (poznani) vrednosti N_{Ed} ter
- $\max N_{Ed}$ in $\min N_{Ed}$ pri predpisani (poznani) vrednosti M_{Ed} .

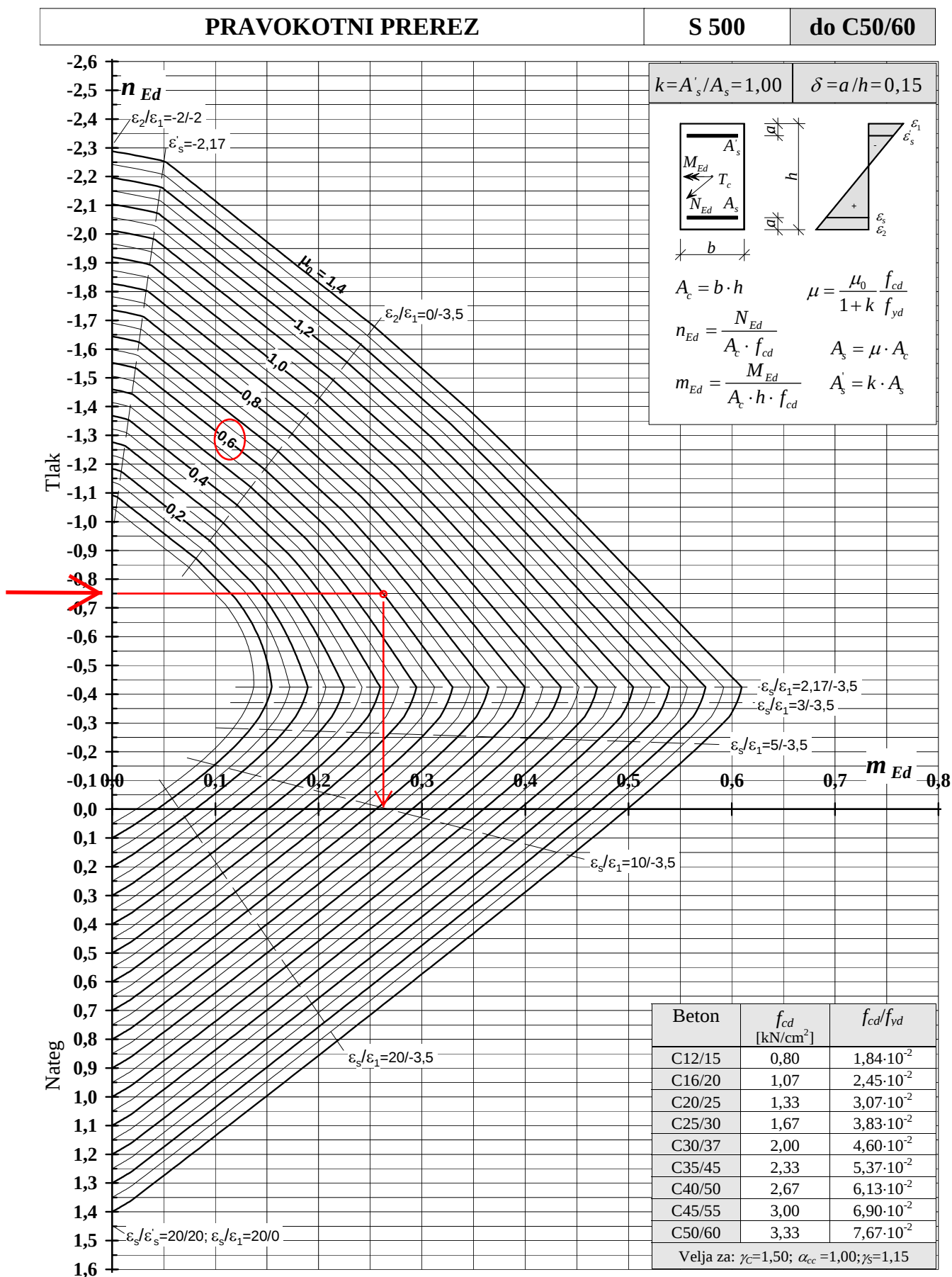


Diagram 3

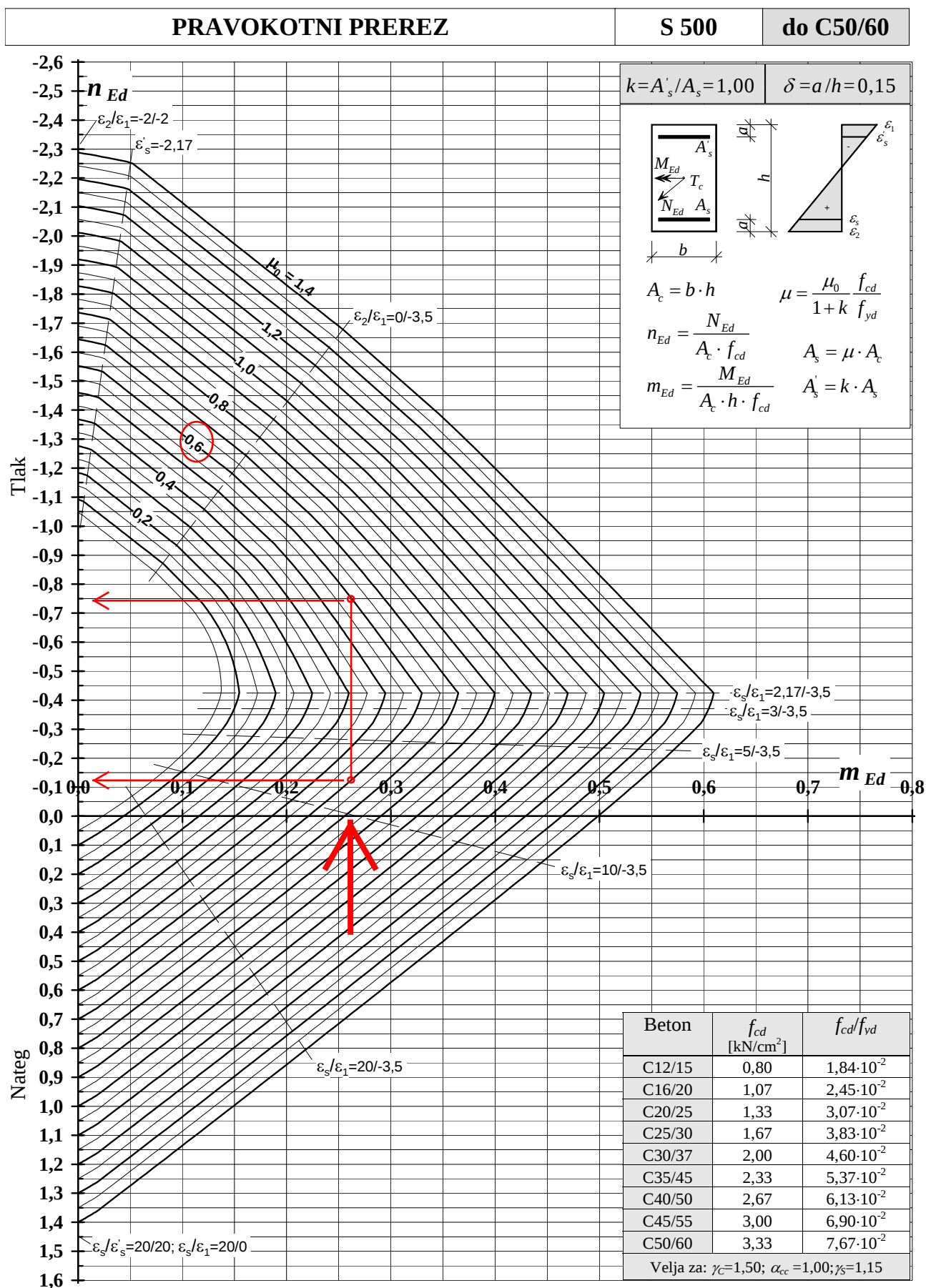
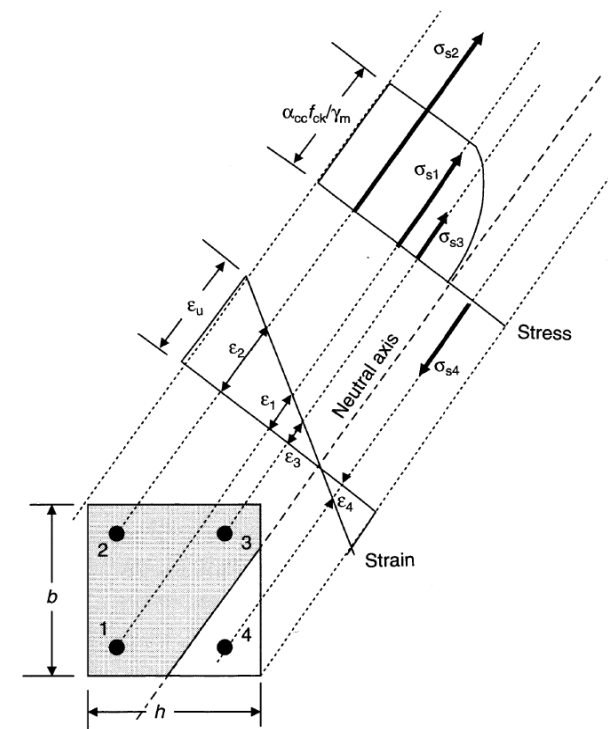
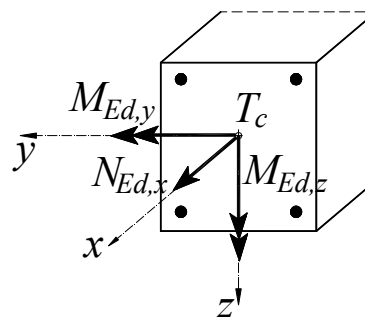


Diagram 3

DIMENZIONIRANJE PRAVOKOTNIH PREREZOV NA DVOJNO EKSCENTRIČNI TLAK

Vektor osno-upogibne mejne odpornosti **poznanega prereza** $\{R_d\}$ dobimo z ustrezno integracijo napetosti betona in armature po prečnem prerezu:

$$\{R_d\} = \begin{Bmatrix} N_{Rd,x} \\ M_{Rd,y} \\ M_{Rd,z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \iint_A \sigma_{xx} dA = \iint_{A_c} \sigma_c dA_c + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma_{si} \\ \iint_A z \sigma_{xx} dA = \iint_{A_c} z \sigma_c dA_c + \sum_{i=1}^n z_{si} A_{si} \sigma_{si} \\ -\iint_A y \sigma_{xx} dA = -\iint_{A_c} y \sigma_c dA_c - \sum_{i=1}^n y_{si} A_{si} \sigma_{si} \end{Bmatrix}$$



Napetostno-deformacijsko stanje prereza v primeru dvoosnega upogiba

Če napetosti betona in armature s pomočjo delovnih diagramov obeh materialov izrazimo z deformacijami ($\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c)$, $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_s)$), lahko vektor osno-upogibne odpornosti prereza zapišemo z deformacijami in projektnima trdnostma obeh materialov f_{cd} in f_{yd} :

$$\{R_d\} = \left\{ \begin{array}{l} N_{Rd,x}(D_u, f_{cd}, f_{yd}, \text{geometrija}) \\ M_{Rd,y}(D_u, f_{cd}, f_{yd}, \text{geometrija}) \\ M_{Rd,z}(D_u, f_{cd}, f_{yd}, \text{geometrija}) \end{array} \right\}.$$

Vsaki mejni deformacijski ravnini D_u , enolično pripada **en sam vektor mejne nosilnosti** $\{R_d\}$ prereza definirane geometrije.

Spreminjanje mejnih deformacijskih ravnin → **vsi možni vektorji mejne odpornosti** znanega armiranobetonskega prereza

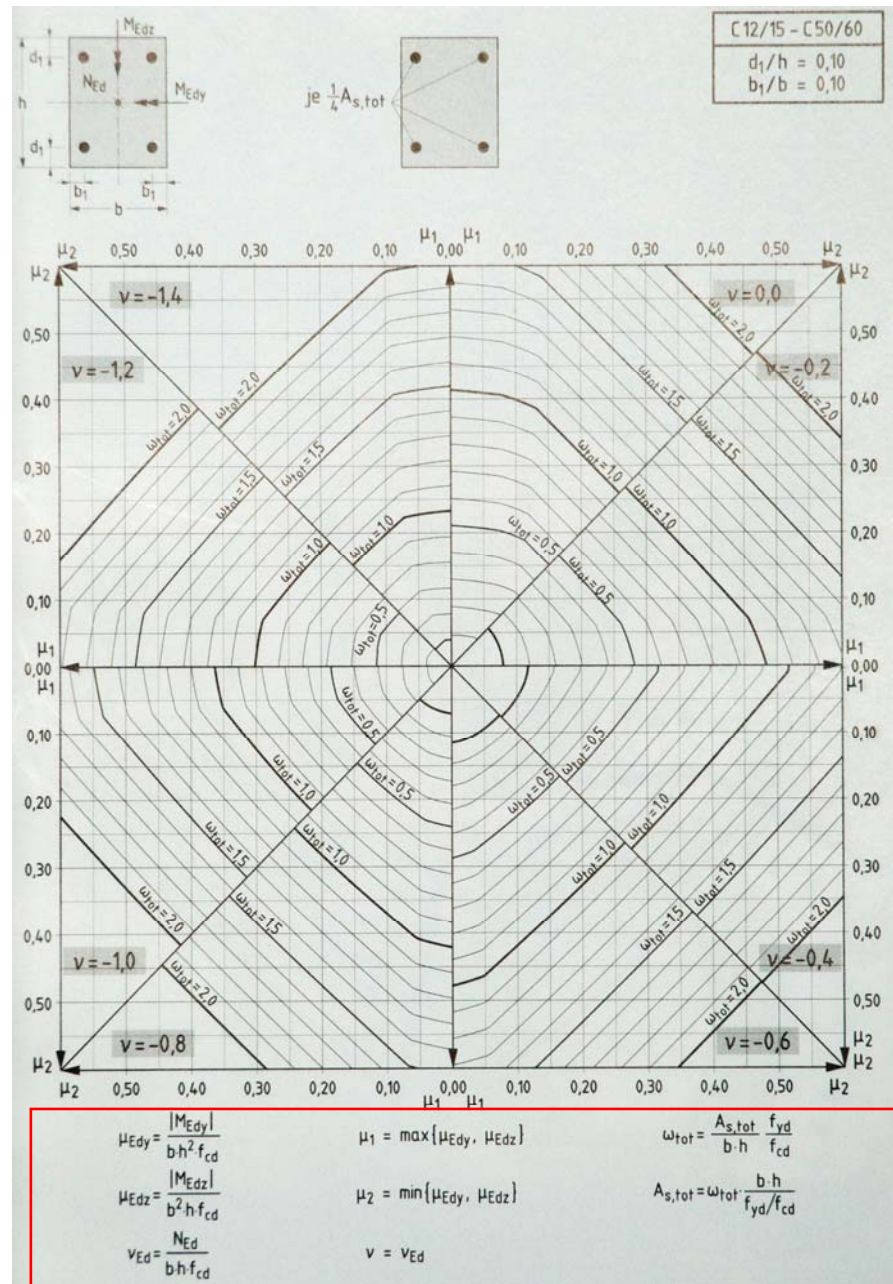
V primeru dvoosnega upogiba pri znanih par metrih → **ploskev v prostoru.**

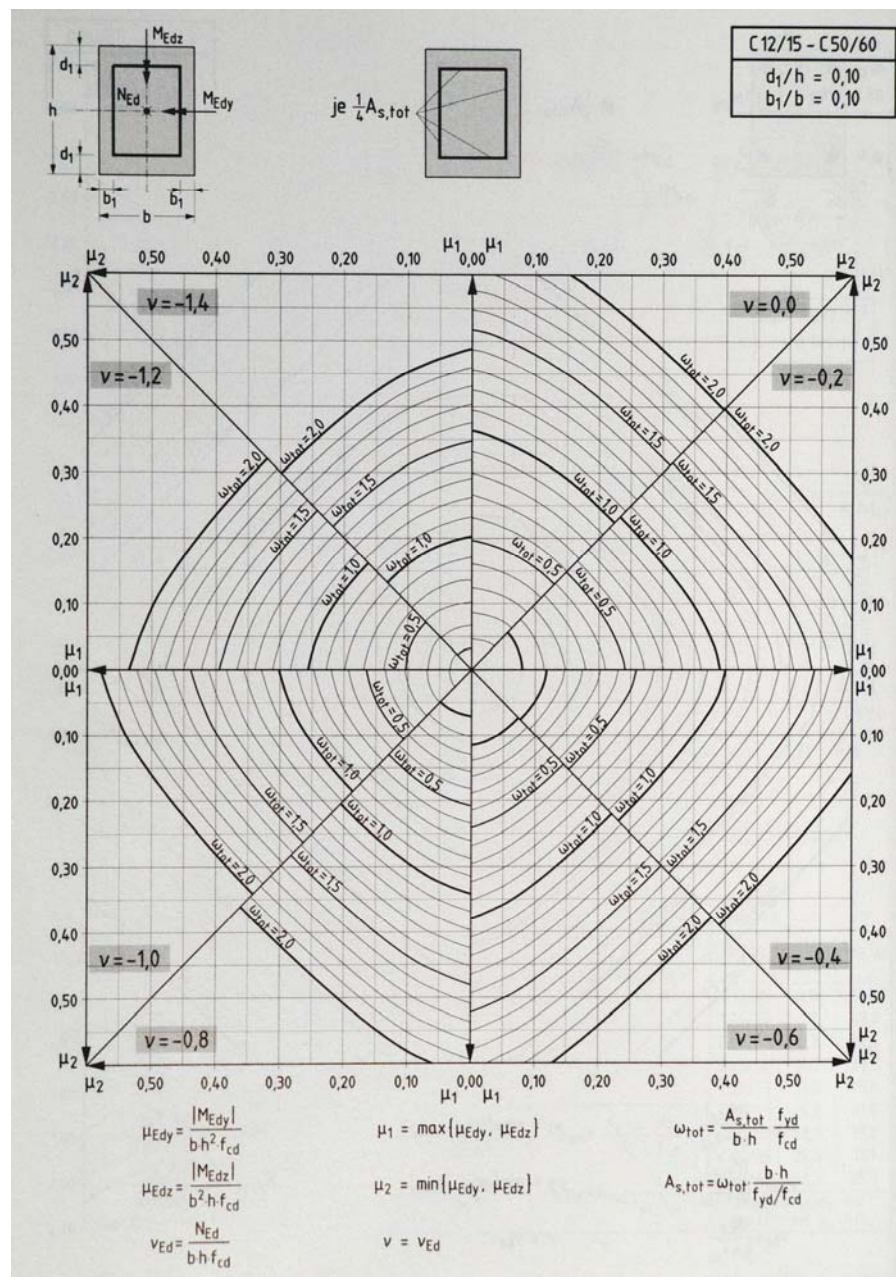
Standard SIST EN 1992-1-1 **ne podaja postopkov za dimenzioniranje prerezov v primeru doosnega upogiba**, razen splošnih skupnih načel za upogibno dimenzioniranje.

Za praktično dimenzioniranje v tem primeru so najbolj primerni:

- računalniški programi in
- pripomočki v obliki raznih **normiranih interakcijskih diagramov**,

Običajno podani v obliki interakcije m_{Rdy} / m_{Rdz} pri predpisanih nivojih osnih sil $n_{Rd} = n_{Ed}$

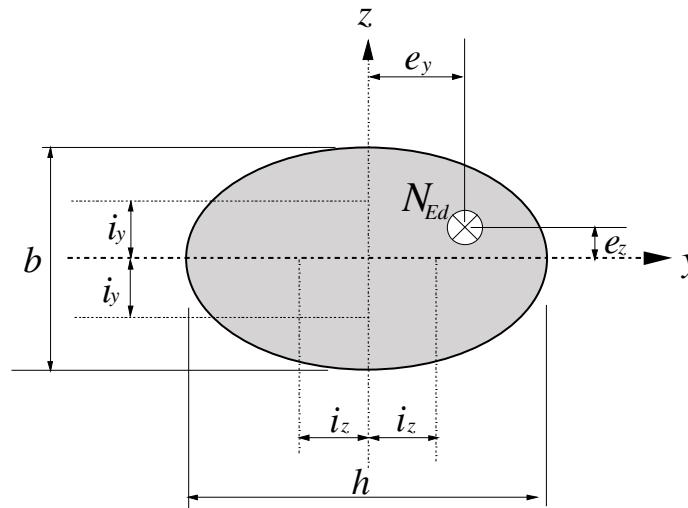




Poenostavljeni postopek dokaza odpornosti prereza pri dvoosnem upogibu v kombinaciji s tlačno osno silo

Kriterij za dokaz odpornosti prereza pri kombinirani obremenitvi, ki se lahko uporabi, če natančnejši postopek ni na voljo:

$$\left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}} \right)^a + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}} \right)^a \leq 1,0$$



- M_{Edy} oziroma M_{Edz} projektna upogibna momenta okrog osi y oziroma z ,
- M_{Rdy} oziroma M_{Rdz} sta enoosni upogibni odpornosti prereza okrog osi y oziroma z , ki sta obe določeni pri projektni osni sili N_{Ed} .

- a je eksponent, ki znaša:

za okrogli in elipsasti prerez $a = 2$,

za pravokotni prerez pa je v odvisnosti od razmerja N_{Ed}/N_{Rd} med projektno osno silo N_{Ed} in projektno osno odpornostjo prereza:

$$N_{Rd} = A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd},$$

N_{Ed}/N_{Rd}	0,1	0,7	1,0
a	1,0	1,5	2,0
Opomba: Pri vmesnih vrednostih N_{Ed}/N_{Rd} se a določi z linearno interpolacijo			

Poenostavljeni postopek, **ne omogoča direktnega določanja** potrebnega prereza armature!
 Osnovna odpornost N_{Rd} , ki je določena z izrazom lahko **izračunamo šele, ko poznamo armaturo**.

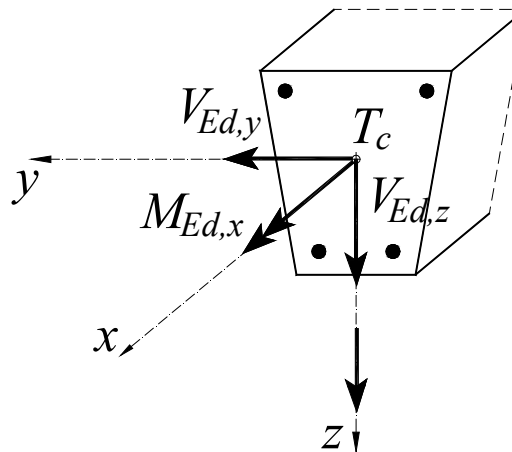
Postopek pa lahko iterativno ponavljamo, do želene natančnosti.

PROJEKTNA ODPORNOST IN DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENTOV NA STRIŽNO OBREMENITEV

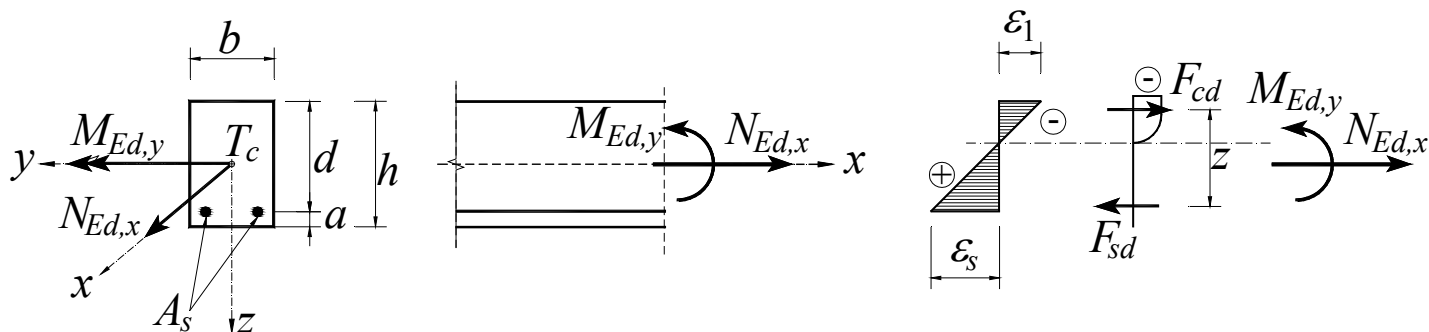
Kot strižno obremenitev prereza v splošnem razumemo poljubno kombinacijo tistih komponent vektorja obremenitve $\{E_d\}$, ki povzročajo v prerezu strižne napetosti τ . Te komponente so:

- prečni sili $V_{Ed,y}$ in $V_{Ed,z}$
- torzijski moment $M_{Ed,x}$ glede na težišče betonskega prereza T_c

$$\{E_{d,\tau}\} = \{V_{Ed,y}, V_{Ed,z}, M_{Ed,x}\}.$$

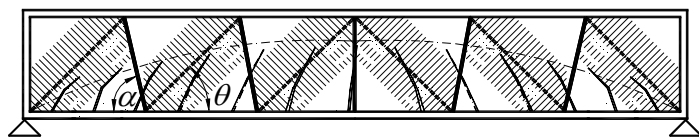


Upogibno-osna mejna odpornost - privzeti upogibni porušni mehanizem **na nivoju prerezov**

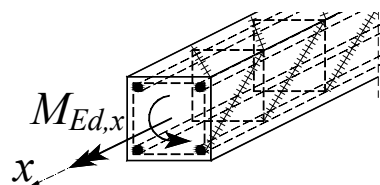


b) mehanizem za prevzem osno-upogibne obremenitve

Strižna odpornost razpokanega elementa konstrukcije- porušni mehanizem **na nivoju elementa**



c) mehanizem ravninskega paličja za prevzem prečne sile



d) mehanizem prostorskega paličja za prevzem torzije $M_{Ed,x}$

Račun mejne odpornosti armiranobetonskih elementov glede na prečno silo

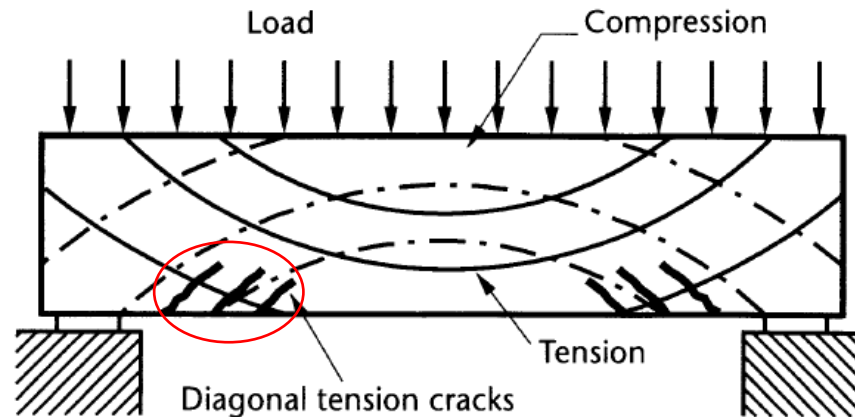
Pri praktično vseh **smiselno dimenzioniranih** nosilcih in ploščah:

- se pred upogibno porušitvijo pojavijo **upogibne razpoke**,
- pri večini pa se pri tem razvijejo tudi **strižne razpoke**.

Strižne razpoke:

- pri elementih **brez strižne armature** pogosto to že lahko **vzrok za porušitev**,
- pri elementih s strižno armaturo pa pojav strižnih **razpok predstavlja le prehod iz mehanizma homogenega nosilca v mehanizem paličja**.

V področjih **nosilcev kjer ni upogibnih razpok** osnovno odpornost glede prečne sile zagotavljajo **same napetosti v betonu**



$$\tau_d(z) = \frac{V_d \cdot S_y(z)}{I_y \cdot b(z)}$$

$$\sigma_d(z) = \frac{N_{Ed}}{A_c} + \frac{M_{Ed} \cdot z}{I_y}$$

Strižne **razpoke se pojavijo**, ko glavne natezne napetosti v betonu dosežejo natezno trdnost:

$$\sigma_{ld}(z) = \frac{\sigma_d(z)}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_d^2(z)}{4} + \tau_d^2(z)} = f_{ctd} \rightarrow \text{pojav strižnih razpok.}$$

Za običajne klasično armirane konstrukcijske elemente **strižna odpornost nerazpokanih elementov nima večjega praktičnega pomena.**

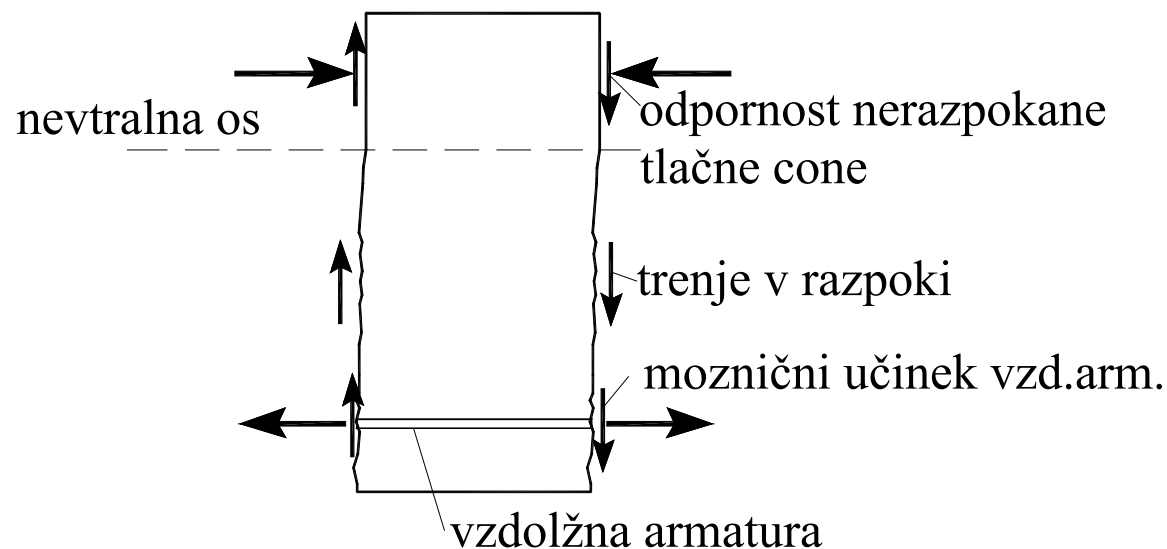
Pomembna pa je pri:

- prednapetih elementih
- in elementih z velikimi tlačnimi osnimi silami (npr. močno obremenjeni stebri).

Za običajne armiranobetonske konstrukcije je **pomembna strižna odpornost elementov, ki so upogibno razpokani.**

Mejno strižno **odpornost glede prečne sile pri elementu, ki je upogibno razpokan** in je le vzdolžno armiran zagotavljajo:

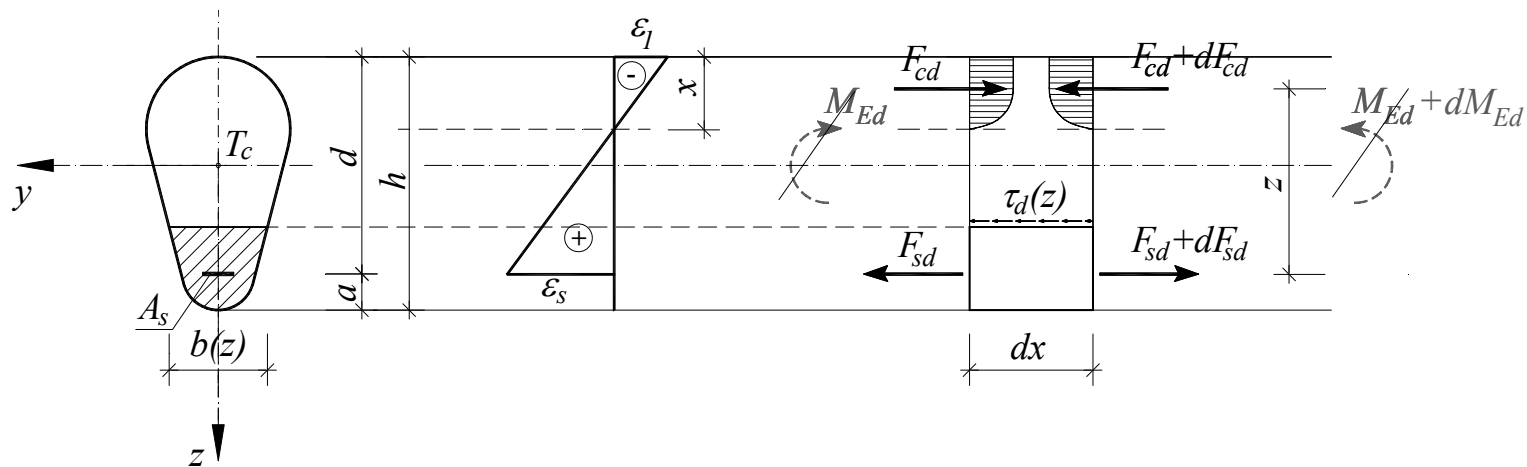
- nerazpokani del betonskega prereza s svojimi napetostmi $\sigma_{ld} \leq f_{ctd}$,
- trenje med zrnji agregata v razpokah,
- možnični učinek vzdolžne armature (ta je ob nastanku razpok strižno obremenjena) in
- ločni mehanizem elementa (tega tvorita zasidrana vzdolžna armatura in tlačna cona betona).



Predpostavka: zaradi upogibnih razpok se strižna togost lokalno ne zmanjša bistveno
Ravnotežje izrezanega dela elementa, ki vsebuje natezno armaturo A_s :

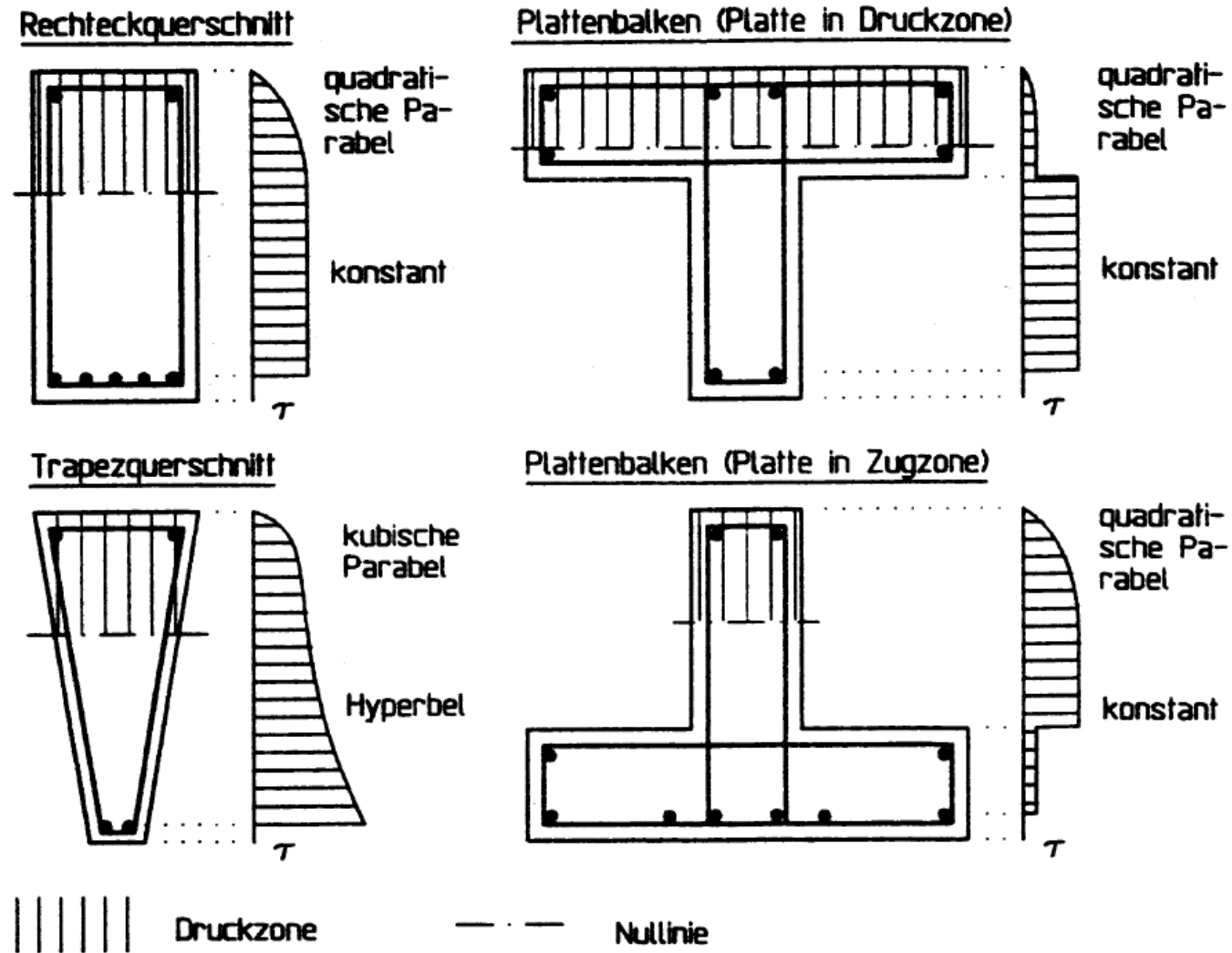
$$F_{sd} + dF_{sd} - F_{sd} - \tau_d(z) \cdot b(z) \cdot dx = 0 \quad \rightarrow \quad \tau_d(z) = \frac{dF_{sd}}{b(z) \cdot dx}.$$

$$dM_d = dF_{sd} \cdot z \quad \rightarrow \quad \tau_d(z) = \frac{dM_{Ed}}{b(z) \cdot z \cdot dx} = \frac{V_{Ed}}{b(z) \cdot z}.$$



Največja strižna napetost: na mestu **najmanjše širine nosilca med nevtralno osjo in natezno armaturo**, ki jo označimo z b_w .

Potek strižnih napetosti po upogibno razpokanih prerezih:



Ko se pri nosilcu, ki je armiran **le z vzdolžno armaturo** pojavijo še **strižne razpoke** je **možnost porušitve takega elementa odvisna predvsem od sposobnosti formiranja ločnega mehanizma:**

→ zahteve po vsaj minimalni strižni armaturi

→ izraz $\tau_d(z) = \frac{dM_{Ed}}{b(z) \cdot z \cdot dx} = \frac{V_{Ed}}{b(z) \cdot z}$ je podlaga za določitev mejne projektne prečne sile, ki ne zahteva računa strižne armature (damo le minimalno armaturo)

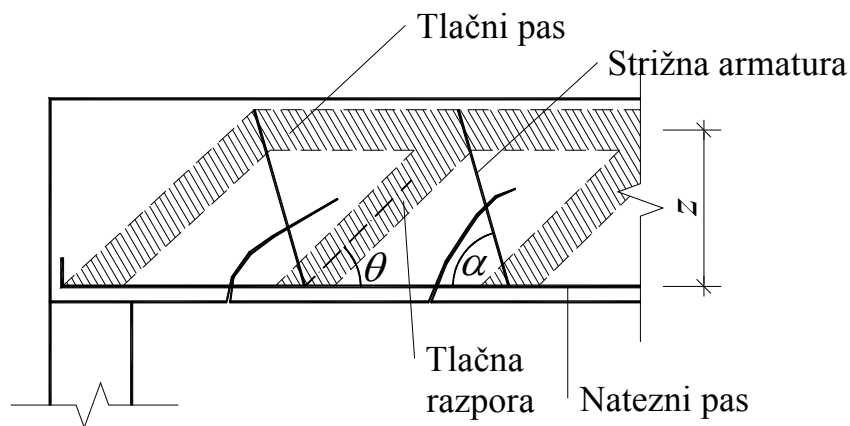
$$\tau_{d,\max} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} \rightarrow V_{Rd,c} = V_{Ed} (\tau_{d,\max} = f_{v,d}) = f_{v,d} \cdot b_w \cdot z = 0,9 f_{v,d} \cdot b_w \cdot d$$

Nosilci **armirani z vzdolžno in strižno armaturo**

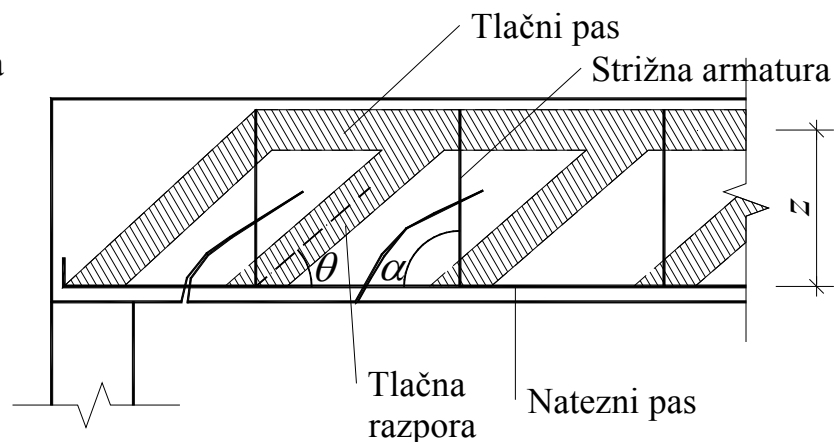
Ko imamo ob upogibnih še strižne razpoke $\rightarrow$ uporabimo model nadomestnega ravninskega paličja

Ideja - E. Mörsch že leta 1923!

- Kot θ je kot med horizontalo in smerjo tlačne razpore in je v splošnem spremenljiv (Navzdol je omejen zaradi problematičnega prenosa striga preko razpok pri zelo majhnih naklonih).
- Kot α pa je kot med horizontalo ter smerjo strižne armature in običajno znaša med 45° in 90° .

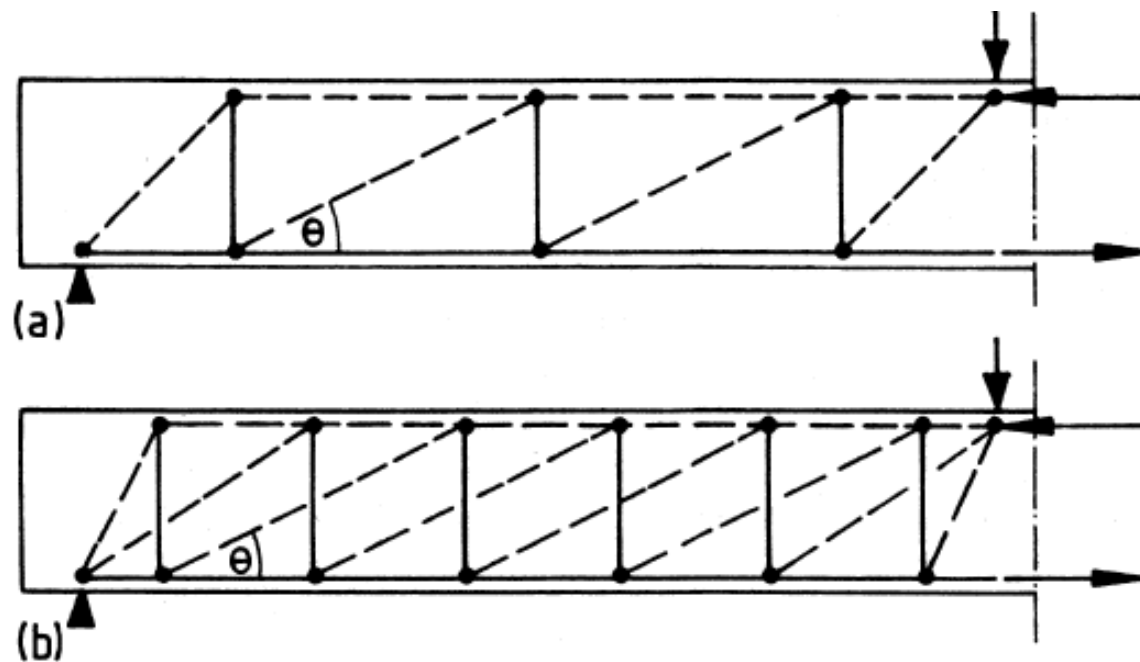


a) poševna strižna armatura



b) vertikalna strižna armatura

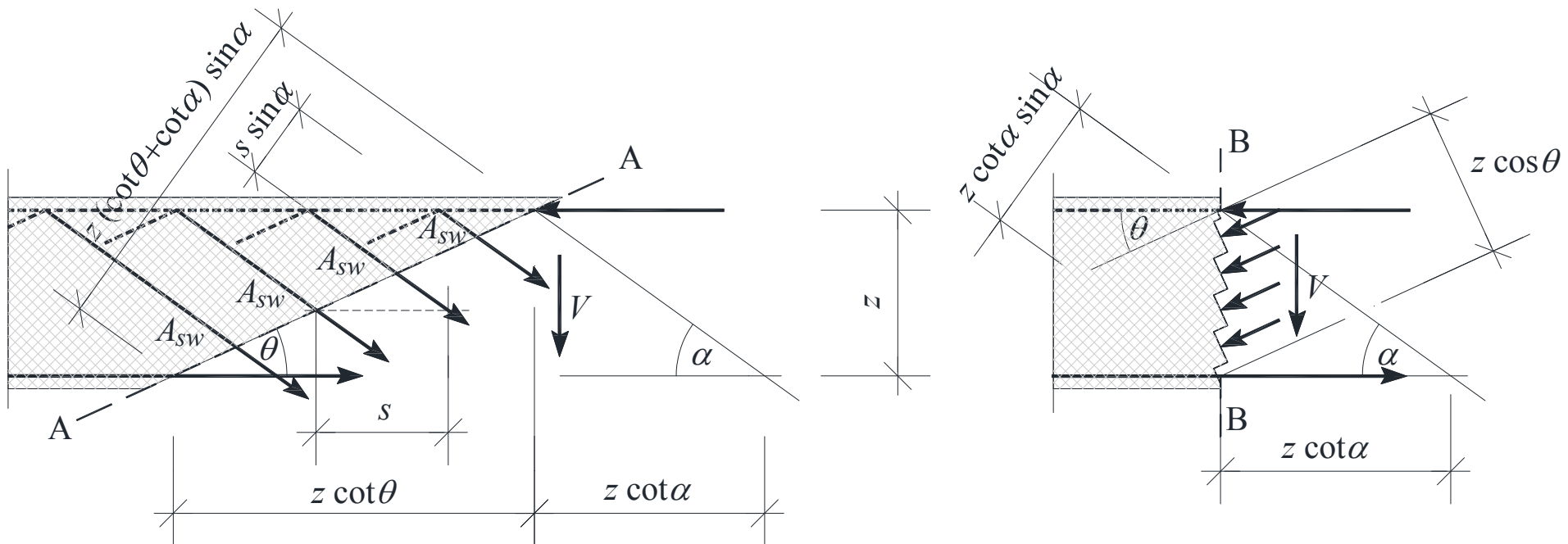
Različni možni nadomestni palični modeli za modeliranje strižne odpornosti



Strižna nosilnost mehanizma ravninske paličja

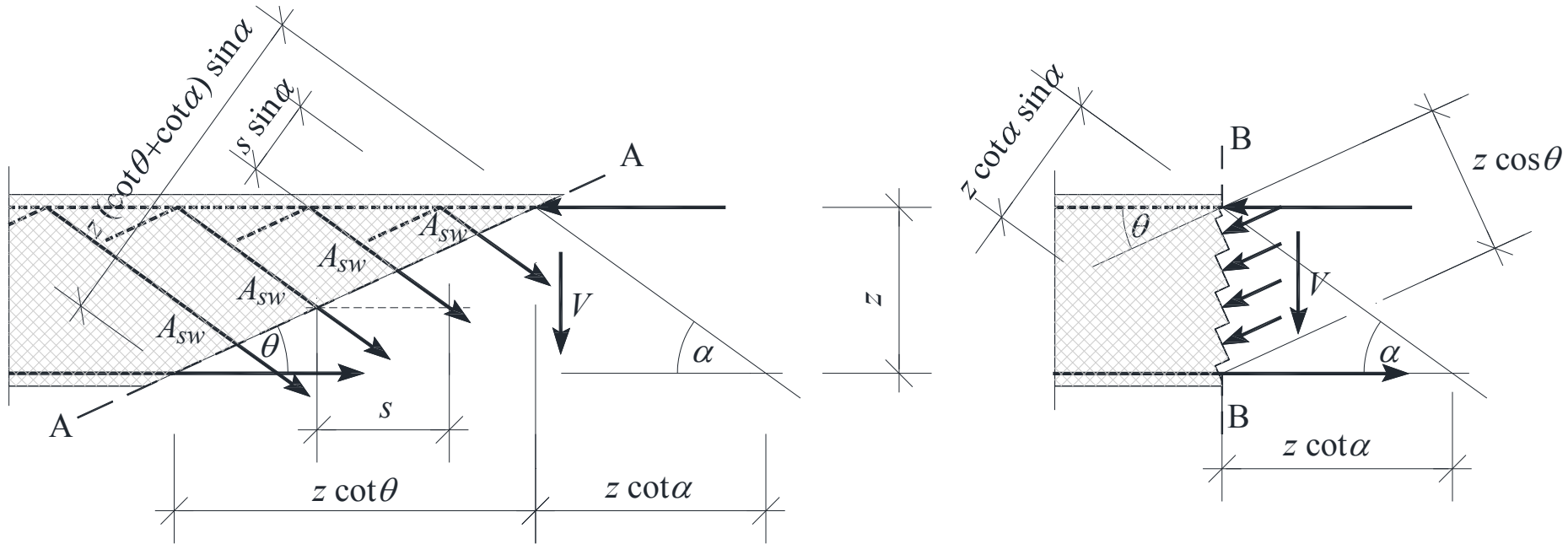
V izpeljavah je upoštevano:

- Palice strižne armature so na medsebojni horizontalni razdalji s .
- Prerez vseh palic v eni krivitvi znaša A_{sw} .
- Z z je označena ročica notranjih sil.
- σ_{sw} je napetost v strižni armaturi
- σ_{cw} pa napetost v poševnih tlačnih razporah.



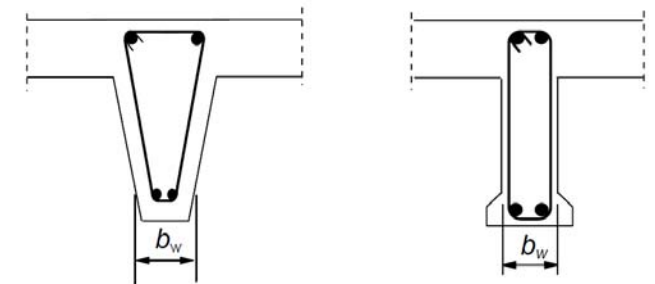
Pogoji ravnotežja v prerezih paličnega modela pri poševni strižni armaturi

Vertikalni prerez B-B, ki ga hkrati »sekajo« tlačne razpore in strižna armatura:



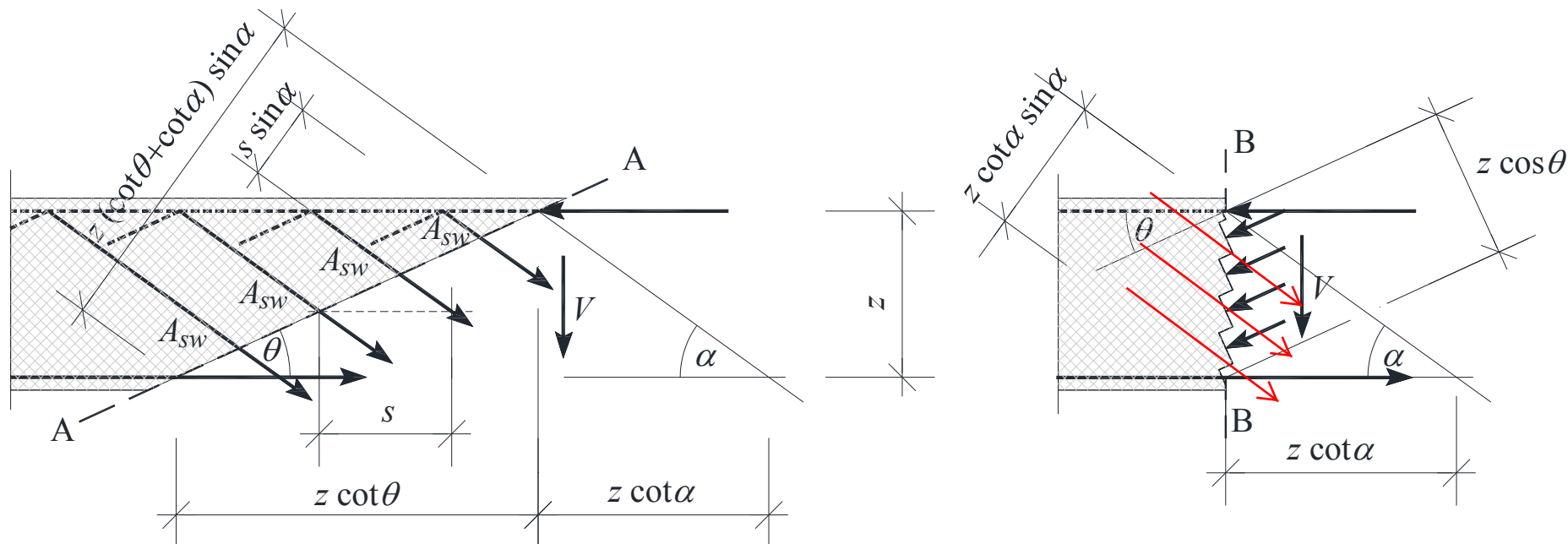
$$V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot \cot \alpha \cdot \sin \alpha}{s \cdot \sin \alpha} \cdot \sin \alpha + \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$$

$$\rightarrow V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot \cot \alpha}{s} \cdot \sin \alpha + \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$$



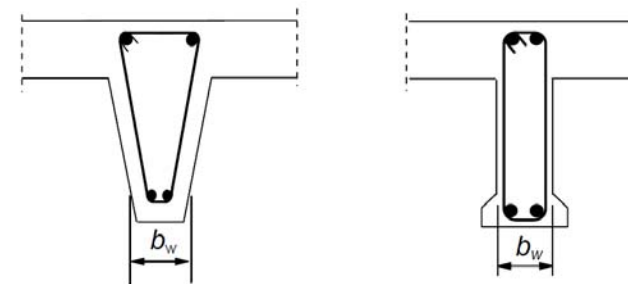
Pri tem je b_w najmanjša širina prereza med natezno armaturo in nevtralno osjo.

Vertikalni prerez B-B, ki ga hkrati »sekajo« tlačne razpore in strižna armatura:



$$V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot \cot \alpha \cdot \sin \alpha}{s \cdot \sin \alpha} \cdot \sin \alpha + \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$$

$$\rightarrow V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot \cot \alpha}{s} \cdot \sin \alpha + \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$$



Pri tem je b_w najmanjša širina prereza med natezno armaturo in nevtralno osjo.

$$V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot \cot \alpha}{s} \cdot \sin \alpha + \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$$

$$V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{s} \cdot \sin \alpha \rightarrow \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot \sin \alpha}{s} = \frac{V}{(\cot \theta + \cot \alpha)}$$

$$V = \frac{V \cdot \cot \alpha}{(\cot \theta + \cot \alpha)} + \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$$

$$V(\cot \theta + \cot \alpha) = V \cdot \cot \alpha + \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)$$

$$V = \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \sin^2 \theta \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \quad \text{oz.}$$

$$V = \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta}$$

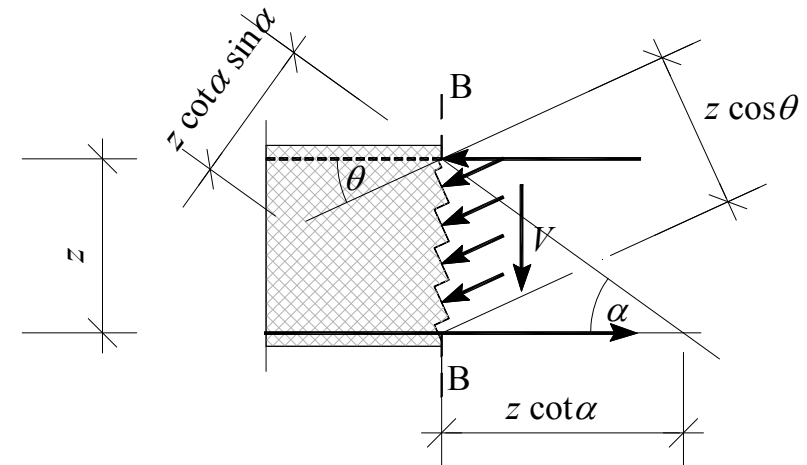
Vertikalni prerez B-B, ki ga hkrati »sekajo« tlačne razpore in strižna armatura:

Rezultirajoča horizontalna sila zaradi delovanja tlačne razpore in natezne strižne armature:

$$H = \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \cos \theta - \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot \cot \alpha}{s} \cdot \cos \alpha$$

$$\sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z = \frac{V}{\sin^2 \theta \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}$$

$$\frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z}{s} = \frac{V}{(\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha}$$



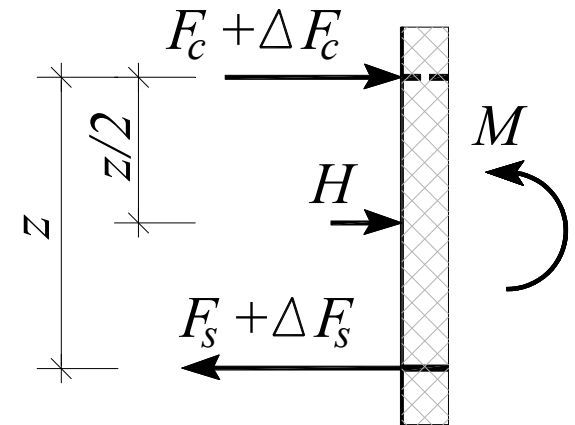
$$H = \frac{V \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)} - \frac{V \cdot \cot \alpha \cdot \cos \alpha}{(\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha} = \frac{V(\cot^2 \theta - \cot^2 \alpha)}{(\cot \theta + \cot \alpha)}$$

$$\rightarrow \boxed{H = V(\cot \theta - \cot \alpha)}$$

Sila H deluje na polovici razdalje med pasovi- na oddaljenosti $z/2$ od tlačnega pasu:.

→ Dodatna natezna sila v glavni natezni armaturi ΔF_s :

$$(F_s + \Delta F_s) \cdot z - H \cdot z / 2 - M = 0 \rightarrow F_s + \Delta F_s = \frac{M}{z} + \frac{H}{2}$$



Prirastek sile v natezni armaturi ΔF_s zaradi prevzema prečne sile z mehanizmom paličja:

$$\Delta F_s = \frac{H}{2} = \frac{V}{2} (\cot \theta - \cot \alpha)$$

Zakaj pride do te sile?

- V nadomestnem paličju je po celotni dolžini posameznega paličnega nateznega elementa konstantna sila
- Pri upogibnem dimenzioniranju pa se dobljena sila v natezni armaturi prilagaja poteku upogibnih momentov.

Mejna strižna odpornost in dimenzioniranje glede prečne sile po standardu SIST EN 1992-1-1

Splošne izraze za določanje nosilnosti glede prečne sile

$$V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{s} \cdot \sin \alpha \quad - \text{strižna nosilnost glede na strižno armaturo}$$

$$V = \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta} \quad - \text{strižna nosilnost glede na kapaciteto tlačnih razpor}$$

$$\Delta F_s = \frac{H}{2} = \frac{V}{2} (\cot \theta - \cot \alpha) \quad - \text{dodatna natezna sila v vzdolžni armaturi}$$

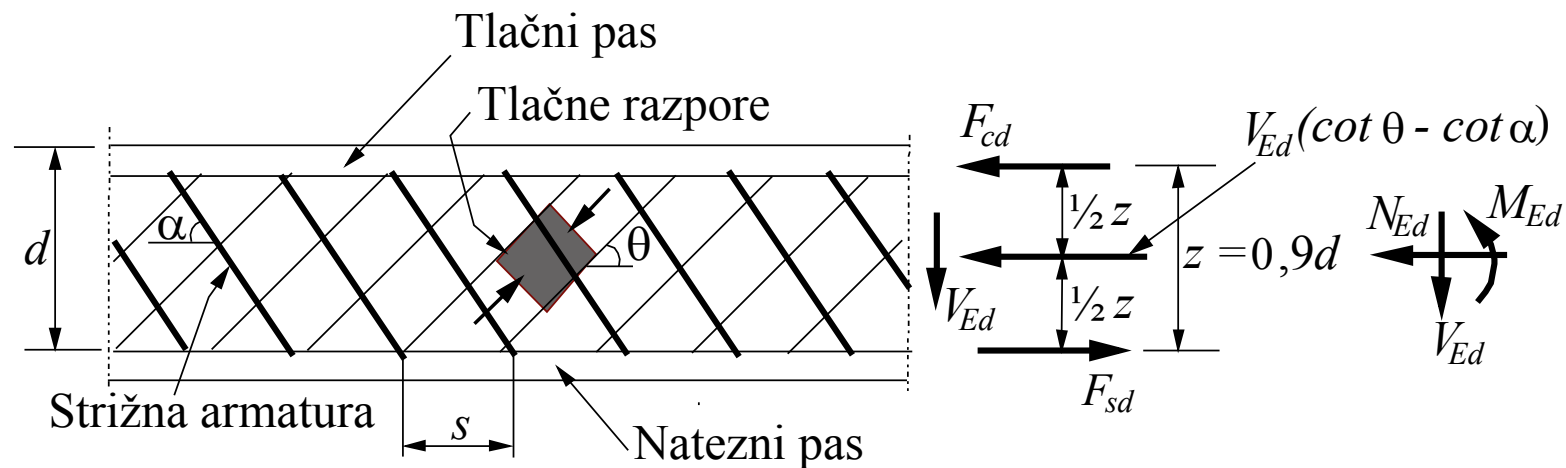
lahko uporabimo kot **podlago za določanje mejne odpornosti glede prečne sile v MSU**

Na teh izrazih temeljijo tudi ustrezna določila iz standarda EN 1992-1-1.

Model nadomestnega ravninskega paličja iz standarda SIST EN 1992-1-1:

Gre za model **s spremenljivim naklonom** tlačnih razpor !

Pri tem je naklon tlačnih razpor omejen z izrazom $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$.



V splošnih izpeljanih izrazih upoštevamo naslednje:

- napetost v strižni armaturi: $\sigma_{sw} = f_{ywd}$.
- napetost betona v tlačnih razporah, ki so v območju strižnih razpok

$$\sigma_{cw} = \alpha_{cw} \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} ;$$

α_{cw} koeficient s katerim zajamemo vpliv osnovnih vzdolžnih tlačnih napetosti zaradi osne sile;

neprednapete konstrukcije: $\alpha_{cw}=1$.

Koeficient ν_1 zajame redukcijo tlačne trdnosti na račun strižnih razpok:

$$\nu_1 = \nu = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck} [MPa]}{250} \right).$$

- za mejno odpornost glede prečne sile, ki jo določa nosilnost strižne armature uporabimo oznako $V_{Rd,s}$
- za mejno odpornost glede prečne sile, ki jo določa nosilnost tlačnih razpor uporabimo oznako $V_{Rd,max}$
- v izrazu za določitev dodatne natezne armature upoštevamo projektno prečno silo V_{Ed}

$$\sigma_{sw} = f_{ywd}, \quad \sigma_{cw} = \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}, \quad V \rightarrow V_{Rd,s} \quad V \rightarrow V_{Rd,max}, \quad V \rightarrow V_{Ed}$$

Dobimo izraze, ki so podani tudi v standardu SIST EN 1992-1-1:

- Mejna strižna odpornost glede na strižno armaturo:

$$V = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{s} \cdot \sin \alpha \rightarrow V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

- Mejna strižna odpornost glede na zmogljivost tlačnih razpor:

$$V = \sigma_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)}{1 - \cot^2 \theta} \rightarrow V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta}$$

- dodatna natezna sila v vzdolžni armaturi:

$$\Delta F_s = \frac{H}{2} = \frac{V}{2} (\cot \theta - \cot \alpha) \rightarrow \Delta F_{sd} = \frac{H_{Ed}}{2} = \frac{V_{Ed}}{2} (\cot \theta - \cot \alpha)$$

Premislek o vplivu kotov α in θ na strižno odpornost elementa!

Uporaba izrazov:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad V_{Rd,s} = V_{Ed} \rightarrow \frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha}$$

Zagotavljanje **duktilnega obnašanja** strižnega mehanizma:

strižna armatura mora biti plastificirana preden je izčrpana nosilnost tlačnih razpor:

$$V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max} \rightarrow \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \leq \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \frac{(\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta}$$

Največja možna strižna armatura $A_{sw,max}$, ki še zagotavlja njeno plastifikacijo:

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{s \cdot b_w} \leq \frac{\alpha_{cw} \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \sin^2 \theta}{\sin \alpha}$$

Dodatno natezno armaturo zaradi mehanizma ravninskega paličja določimo z izrazom:

$$\Delta A_s = \frac{\Delta F_{sd}}{f_{yd}} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot f_{yd}} (\cot \theta - \cot \alpha)$$

Za vrednost $\frac{M_{Ed}}{z} + \Delta F_{sd}$ ni potrebno vzeti več kot $\frac{M_{Ed,max}}{z}$,

$M_{Ed,max}$ - največji upogibni moment vzdolž elementa.

Mejna prečna sila $V_{Rd,c}$, do katere prečne armature elementa ni potrebno računati:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d.$$

$C_{Rd,C} = 0,18/\gamma_C$ reducirana natezna trdnost betona,

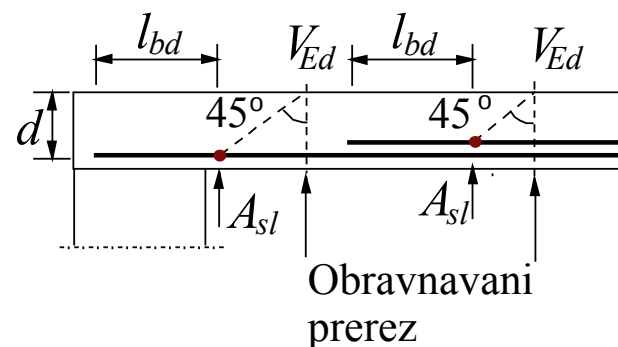
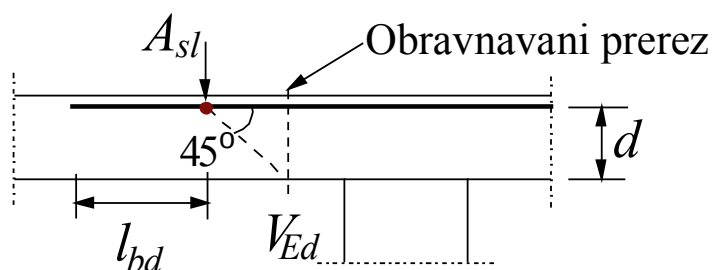
$\rho_l = A_{sl}/b_w d \leq 0,02$ delež ustrezno zasidrane vzdolžne armature

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd}$ [MPa] napetost zaradi tlačne osne sile,

$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$ (kjer je d v mm) je koeficient višine prereza,

$k_1 = 0,15$ koeficient tlačnih napetosti,

$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ pa vplivni koeficient trdnostnega razreda betona.



Ko se pri nosilcu, ki je armiran **le z vzdolžno armaturo** pojavijo še **strižne razpoke** je **možnost porušitve takega elementa odvisna predvsem od sposobnosti formiranja ločnega mehanizma:**

→ zahteve po vsaj minimalni strižni armaturi

→ izraz $\tau_d(z) = \frac{dM_{Ed}}{b(z) \cdot z \cdot dx} = \frac{V_{Ed}}{b(z) \cdot z}$ je podlaga za določitev mejne projektne prečne sile, ki ne zahteva računa strižne armature (damo le minimalno armaturo)

$$\tau_{d,\max} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} \rightarrow V_{Rd,c} = V_{Ed} (\tau_{d,\max} = f_{v,d}) = f_{v,d} \cdot b_w \cdot z = 0,9 f_{v,d} \cdot b_w \cdot d$$

Mejna prečna sila $V_{Rd,c}$, do katere prečne armature elementa ni potrebno računati:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d.$$

$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_C$ reducirana natezna trdnost betona,

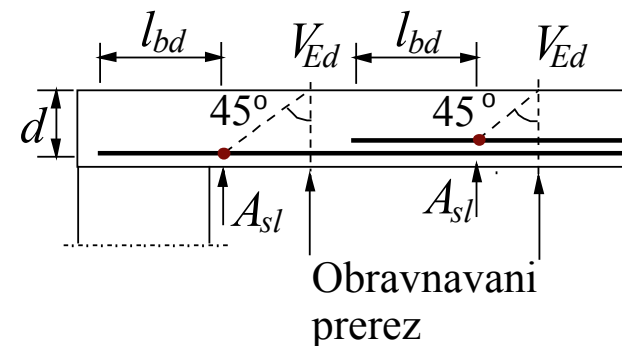
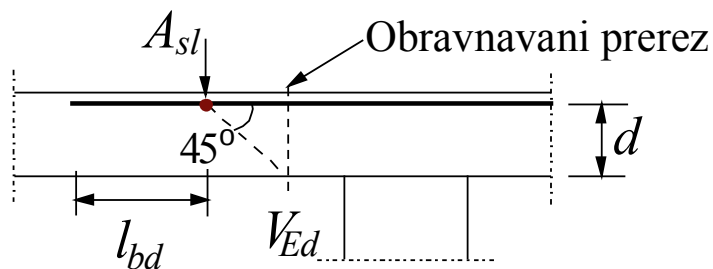
$\rho_l = A_{sl}/b_w d \leq 0,02$ delež ustrezno zasidrane vzdolžne armature

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd}$ [MPa] napetost zaradi tlačne osne sile,

$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$ (kjer je d v mm) je koeficient višine prereza,

$k_1 = 0,15$ koeficient tlačnih napetosti,

$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ pa vplivni koeficient trdnostnega razreda betona.



Projektna prečna sila $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$, $\rightarrow$ **prečna armatura A_{sw} računsko ni potrebna**

Namestimo se le minimalna strižna armatura:

$$\rho_{w,\min} = 0,08 \sqrt{f_{ck}} / f_{yk} ; \quad \rho_w = A_{sw} / (s \cdot b_w \cdot \sin \alpha) - \text{stopnja str. armiranja}$$

Prečna sila V_{Ed} večja od $V_{Rd,c}$ in manjša od $V_{Rd,max}$:

$V_{Rd,c} \leq V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \rightarrow$ potrebno namestiti ustrezno strižno armaturo:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha}$$

Splošen postopek za dimenzioniranje elementov na prečno silo

- pri vertikalni strižni armaturi ($\alpha = 90^\circ$)
- z optimizacijo naklona tlačnih razpor θ

Predpostavka: **strižna armatura potrebna** $\rightarrow V_{Ed} > V_{Rd,c}$.

Določimo projektno strižno napetost v_{Ed} :

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} \approx \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot 0,9d}.$$

$$\tau_d(z) = \frac{dM_{Ed}}{b(z) \cdot z \cdot dx} = \frac{V_{Ed}}{b(z) \cdot z}$$

Pri tem je V_{Ed} **polna vrednost projektne prečne sile brez upoštevanja redukcij** ob podporah.

v_{Ed} primerjamo z mejnimi vrednostmi $v_{Rd,max}$: $v_{Rd,max,cot\theta=1,0}$ in $v_{Rd,max,cot\theta=2,5}$

Trdnostni razred betona	$v_{Rd,max,cot\theta=2,5}$ [kN/cm ²]	$v_{Rd,max,cot\theta=1,0}$ [kN/cm ²]
C20/25	0,25	0,37
C25/30	0,31	0,45
C30/37	0,36	0,53
C35/45	0,42	0,60

- Če je vrednost v_{Ed} večja od $v_{Rd,max,cot\theta=1,0}$ **prerez ne zadošča in ga je potrebno povečati!**
- Če je vrednost v_{Ed} manjša od $v_{Rd,max,cot\theta=2,5}$, lahko **privzamemo $cot\theta=2,5$ in izračunamo potreben prerez strižne armature**, ki je nasploh **najmanjši možen prerez strižne armature**
- Če pa je vrednost v_{Ed} med obema mejnima vrednostma, lahko **določimo kot θ** , ki še zadošča glede odpornosti tlačnih razporah, ob tem pa **pri dani projektni strižni napetosti v_{Ed} zahteva najmanjšo količino strižne armature:**

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{v_{Ed}}{0,2 f_{ck} (1 - f_{ck} / 25)} \right) \quad v_{Ed} \text{ in } f_{ck} \text{ morata biti v kN/cm}^2.$$

Izraz je izpeljan z upoštevanjem $\alpha_{cw}=1,0$ in $\gamma_C=1,5$.

Ko poznamo naklon razpor θ oziroma $cot\theta$, določimo potrebno strižno armaturo:

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}^*}{z f_{ywd} \cot \theta}.$$

Pri tem je V_{Ed}^* reducirana prečna sila ob podpori. Sidranje vzdolžne armature?

Računski primer: Račun najmanjše možne strižne armature

Prerez se nahaja ob vmesni podpori ($M_{Ed} < 0$). Določiti je potrebno minimalno možno vertikalno strižno armaturo ($\alpha=0^\circ$) za podano vrednost projektne prečne sile V_{Ed} .

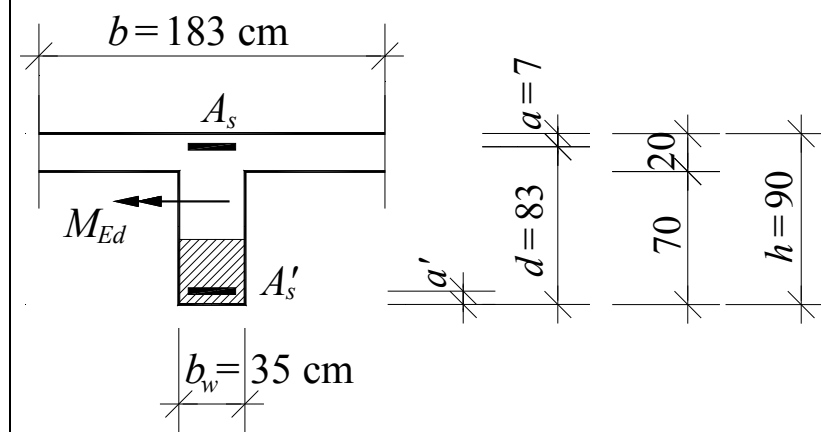
Beton: C35/45 $\rightarrow f_{ck} = 3,5 \text{ kN/cm}^2$

Jeklo: S500 $\rightarrow f_{ywd} = 43,5 \text{ kN/cm}^2$

$V_{Ed} = 1.200 \text{ kN}$

Projektna obtežba v obravnavanem polju pri merodajni obtežni kombinaciji: $(q+g)_{Ed} = 146 \text{ kN/m}$

Oddaljenost od osi do roba podpore: $t/2 = 0,10 \text{ m}$



Redukcija prečne sile ob podpori:

$$\Delta x = t/2 + d = 0,10 + 0,83 = 0,93 \text{ m} \rightarrow V_{Ed}^* = V_{Ed} - \Delta V_{Ed} = V_{Ed} - \Delta x \cdot (q+g)_{Ed} = 1.200 - 0,93 \cdot 146 = 1.064,2 \text{ kN}$$

Projektna strižna napetost:

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot 0,9d} = \frac{1.200}{35 \cdot 0,90 \cdot 83} = 0,46$$

$$v_{Rd,max,cot\theta=2,5} = 0,42 < v_{Ed} = 0,46 < v_{Rd,max,cot\theta=1} = 0,60$$

Iz pogoja tlačnih razpor dobimo optimalno vrednost kota θ :

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{v_{Ed}}{0,2 f_{ck} (1 - f_{ck} / 25)} \right) = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{0,46}{0,2 \cdot 3,5 \cdot (1 - 3,5 / 25)} \right) = \frac{1}{2} \arcsin(0,764) = 24,9^\circ \rightarrow \cot \theta = 2,15.$$

Najmanjša možna strižna armatura:

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}^*}{z f_{ywd} \cot \theta} = \frac{1.064,2}{0,9 \cdot 83 \cdot 43,5 \cdot 2,15} = 0,152 \text{ cm} = 0,152 \text{ cm}^2/\text{cm} = 15,2 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Pri konstruiranju vzdolžne armature moramo upoštevati dodatno silo v natezni armaturi:

$$\Delta F_{td} = 0,5 \cdot V_{Ed}^* (\cot \theta - \cot \alpha) = 0,5 \cdot 1.064,2 (2,15 - 0) = 1.144,9 \text{ kN}$$

Če ne bi izkoristili možnosti spremenljivega naklona razpor in bi upoštevali spodnjo mejo vrednosti $\cot \theta = 1$, bi dobili:

Potrebno strižno armaturo:

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}^*}{z f_{ywd} \cot \theta} = \frac{1.064,2}{0,90 \cdot 83 \cdot 43,5 \cdot 1,0} = 0,328 \text{ cm}^2/\text{cm} = 32,8 \text{ cm}^2/\text{m}!$$

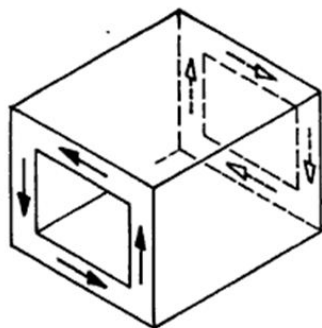
Pri konstruiranju vzdolžne armature pa bi morali upoštevati dodatno silo v natezni armaturi:

$$\Delta F_{td} = 0,5 \cdot V_{Ed}^* (\cot \theta - \cot \alpha) = 0,5 \cdot 1.064,2 (1,0 - 0) = 532,1 \text{ kN}$$

Račun mejne odpornosti armiranobetonskih elementov glede na torzijo

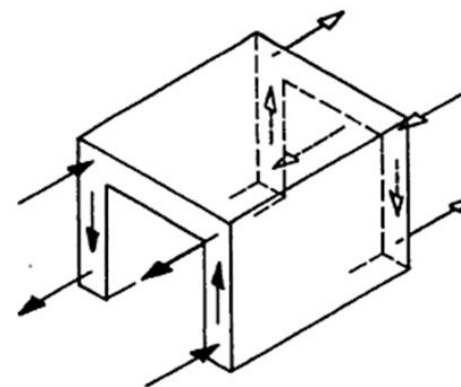
Praviloma ločimo med:

- **enakomerno torzijo**
(Saint Venant-ova oz. neovirana torzija)



- **Zaključen strižni tok** po obodu elementa
- Polni ter zaprti in tudi odprti tankostenski prerezi

- **ovirano torzijo** (»warping torsion«).



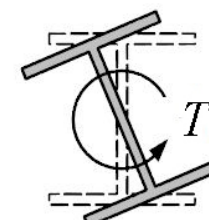
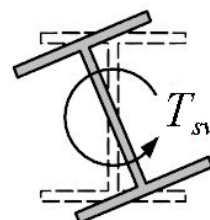
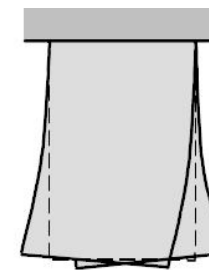
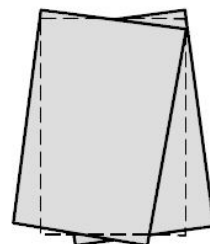
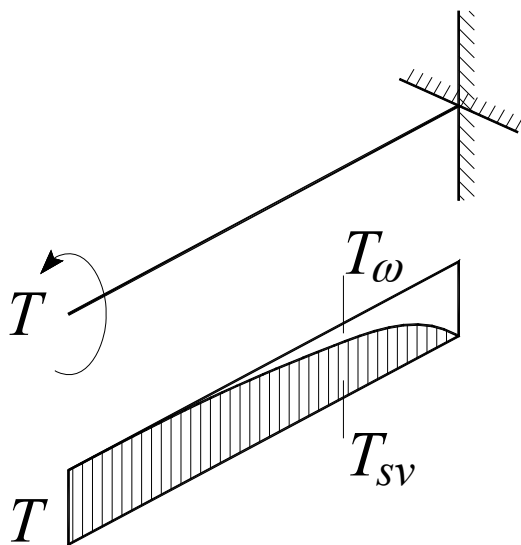
- Torzijsko odpornost zagotovljena z **upogibno odpornostjo posameznih sestavnih delov elementa**

Motnje napetostnega stanja enakomerne torzije - preprečevanje deplanacije prerezov:

- na mestih podpor s predpisanimi različnimi robnimi pogoji
- ko se notranji torzijski moment spreminja vzdolž osi elementa (npr. zaradi zvezne torzijske obtežbe, ali vnosa koncentrirane torzijske obtežbe).

Realne konstrukcije → Pogosti primeri, ko skupne torzijske odpornosti elementa ne zagotavljamo izključno le z enim ali z drugim mehanizmom pač pa jo **deloma zagotavljamo z enim in deloma z drugim mehanizmom**:

$$T = T_{sv} + T_{\omega} .$$



Ovirano torzijo lahko pri dokazih armiranobetonskih elementov **v MSN praviloma zanemarimo v primeru:**

- **polnih prerezov in**
- **zaprtih tankostenskih škatlastih prerezov.**

Celotno torzijsko obremenitev je v tem primeru **potrebno prevzeti z mehanizmom enakomerne** (Saint Venant-ove) torzije.

Odpri tankostenski elementi:

V splošnem **lahko učinek ovirane torzije običajno zanemarimo**

Izjema: Mehanizem ovirane torzije je zelo učinkovit način prevzema torzijske obremenitve in ga je smiselno upoštevati (npr. tam kjer so razpetine merodajne za prečni upogib posameznih sestavnih delov razmeroma kratke).

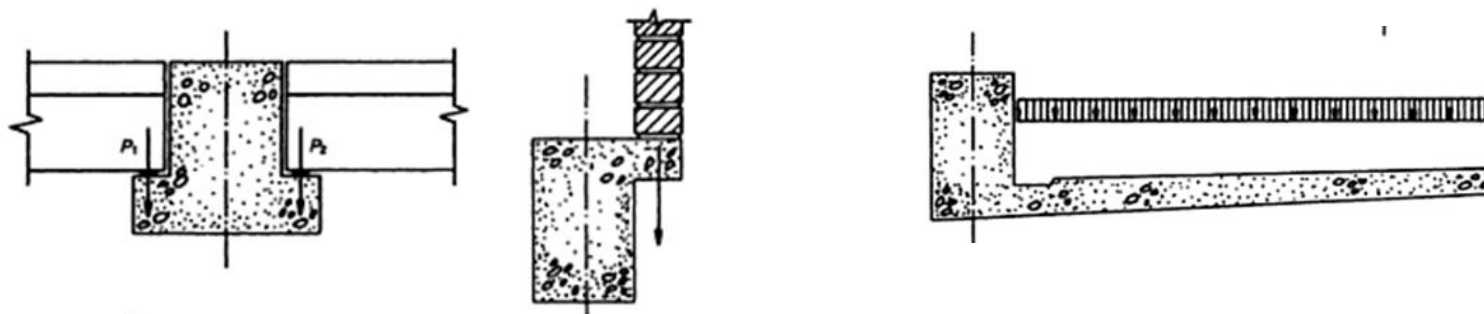
Pri zelo vitkih prečnih prerezih se račun v tem primeru izvede na podlagi prostorskega modela mreže linijskih nosilcev s katerim se določi razdelitev torzijskega momenta med oba mehanizma.

Osnovni izrazi, za določanje torzijske odpornosti in dimenzioniranje elementov glede na torzijsko obremenitev **v standardu SIST EN 1992-1-1** temeljijo na obnašanju elementov pri **enakomerni torziji**.

Upoštevanje torzijske obremenitve glede na pomen torzijske odpornosti pri zagotavljanju globalne varnosti in stabilnosti konstrukcij.

Statično ravnotežje konstrukcije odvisno od torzijske odpornosti elementov konstrukcije:

- V tem primeru govorimo o t.i. »**ravnotežni**« torziji
- **Potrebno izvesti celotno torzijsko dimenzioniranje** - MSN in MSU
- Primeri takšnih konstrukcij so:
 - elementi ukrivljeni v tlorisu,
 - ekscentrično obremenjeni statično določeni elementi,
 - nosilci zavrtih stopnic,
 - mostni nosilci (škatlasti in polni) z izrazito torzijsko obtežbo (ekscentrična prometna obtežba).

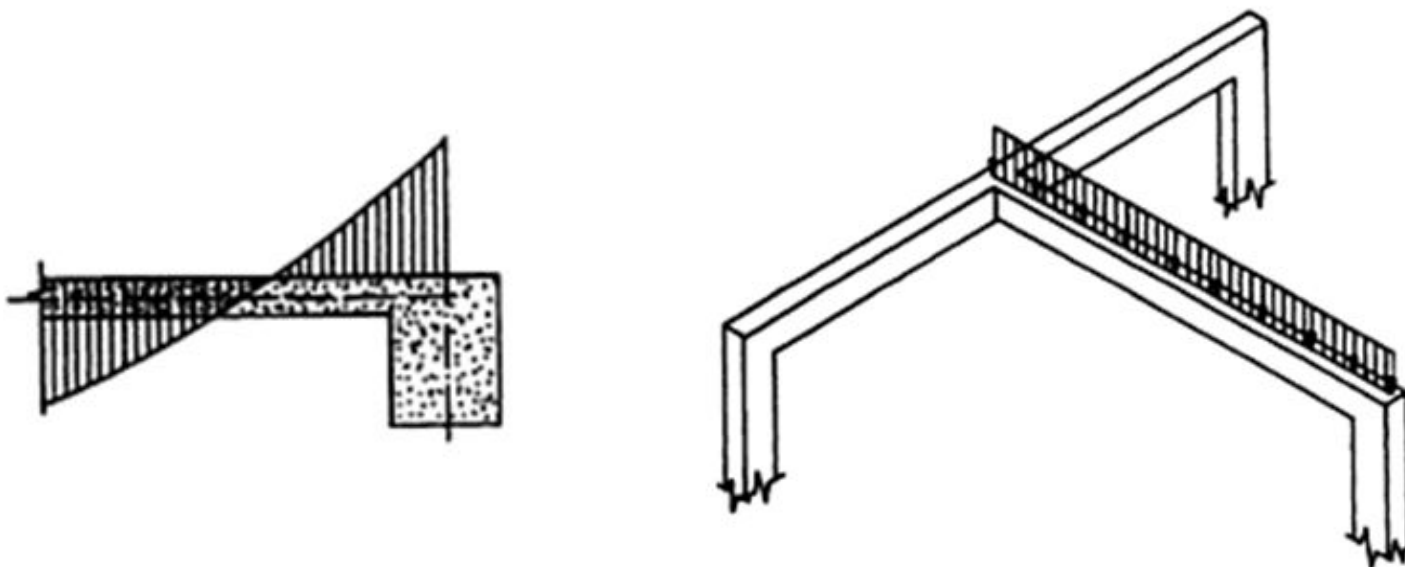


Kadar v statično nedoločenih konstrukcijah torzija izvira le iz pogojev zagotavljanja kompatibilnosti in stabilnost konstrukcije ni odvisna od torzijske odpornosti

- V tem primeru govorimo o t.i. »**kompatibilitetni**« torziji
- Takšne torzije **v MSN načeloma ni treba posebej preverjati**, v analizi konstrukcij pa lahko torzijsko togost elementov zanemarimo.
- **Vendar:** Za preprečitev prekomernega torzijskega razpokanja je **treba namestiti vsaj minimalno armaturo v obliki zaprtih stremen in vzdolžnih palic**.

Elementi z ustrezno minimalno armaturo → zagotavljajo duktilno obnašanje;

(torzijska togost se po pojavu torzijskih razpok znatno zmanjša v primerjavi s togostjo nerazpokanih elementov → torzijske obremenitve po pojavu razpok se zmanjšajo element se razbremeni).



Strižne napetosti zaprtih tankostenskih škatlastih prerezov pri torzijski obremenitvi

Teorija zaprtih tankostenskih škatlastih prerezov: → v splošnem različne debeline sten t_i

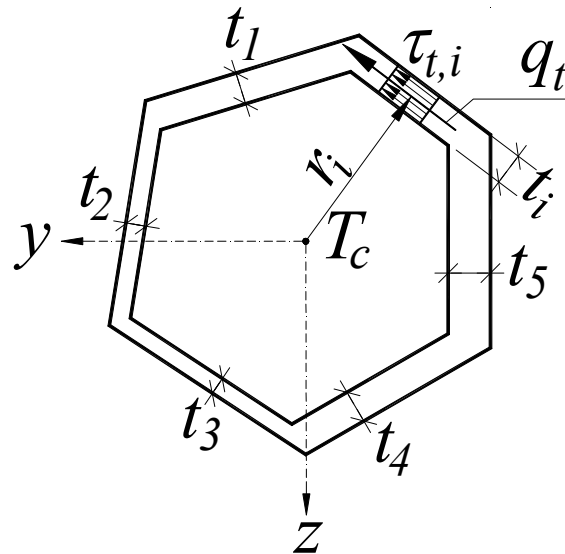
Rezultirajoči torzijski moment T :
$$T = \oint \tau_{t,i} \cdot t_i \cdot r_i \cdot ds$$

Privzamemo, da je strižni tok: $q_t = \tau_{t,i} \cdot t_i$ konstanten po obodu škatle

Prevedba krivuljnega integrala na ploskovni integral: → splošno znana enačba:

$$T = q_t \cdot 2 \cdot A_k \quad \rightarrow \quad \boxed{q_t = \frac{T}{2 \cdot A_k}}$$

A_k ploščina zaključenega poligona, ki ga omejujejo srednjice posameznih sten.



Največje strižne napetosti se pojavijo v steni z najmanjšo debelino:

$$\tau_{t,\max} = \frac{T}{2 \cdot A_k \cdot t_{\min}}$$

Dokler so **glavne natezne napetosti**, ki so pri **enakomerni torziji** ($\sigma = 0$) kar enake največjim strižnim napetostim $\tau_{t,\max}$, **manjše od natezne trdnosti betona**

$$\tau_{t,\max} \leq f_{ctd}$$

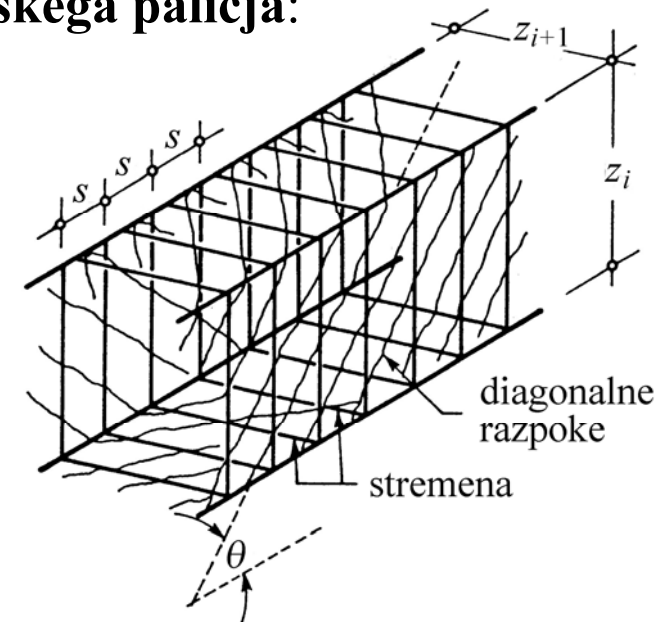
se element obnaša kot homogen in zagotavlja **odpornost s strižnimi napetostmi**. Vpliv armature je v tem primeru zanemarljiv!

Ko pa glavne napetosti betona dosežejo natezno trdnost f_{ctd} element razpoka.

Z nastankom torzijskih razpok se **spremeni nosilni mehanizem elementa**.

Razpokano stanje

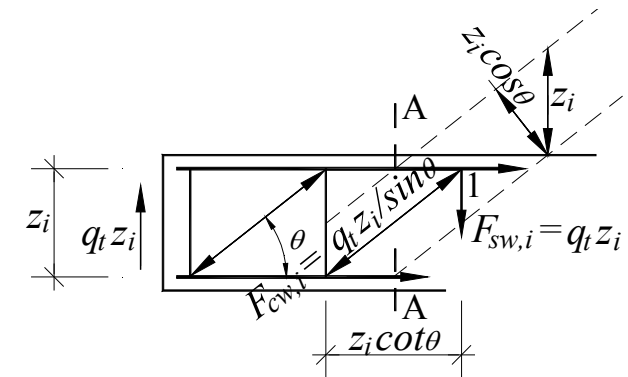
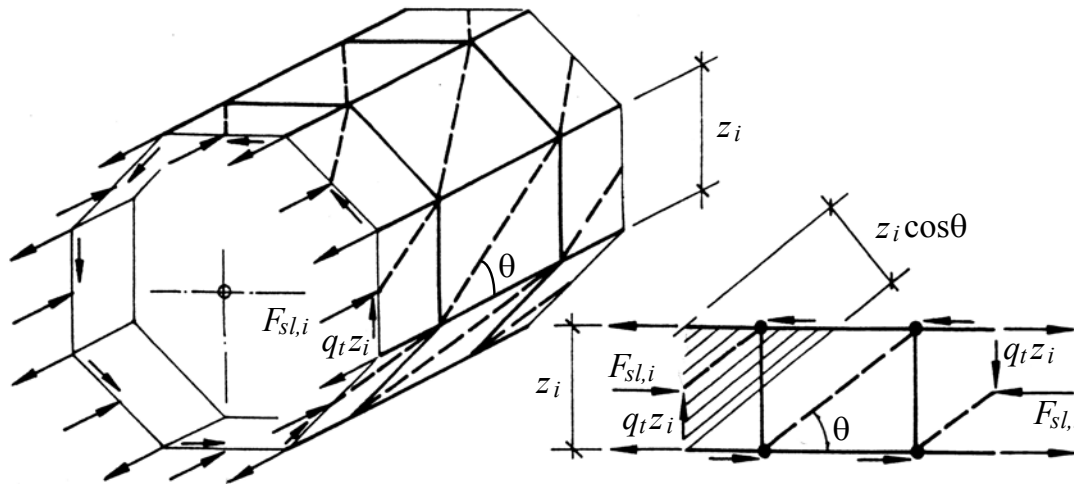
- element le še manjši del torzijske obremenitve prenese preko:
 - napetosti v nerazpokanem delu,
 - s trenjem v razpokah in
 - z možničnim učinkom vzdolžne armature.
- Večino torzijske obremenitve prevzame **model prostorskega paličja**:
 - tlačne betonske razpore med razpokami pod kotom θ ,
 - natezna stremena (A_{sw}), ki tvorijo vertikale, in
 - vzdolžna armatura (A_{sl}), ki tvori pasove paličij.



Strižni tok q_t : **izpeljan za homogene prereze** a ga tudi pri **modeliranju v z nadomestnim paličjem uporabimo** za opisovanje torzijskih strižnih obremenitev posameznih sten.

Torzijska nosilnost mehanizma prostorskega paličja

Model splošnega poligonalnega prostorskega nadomestnega paličja za analizo obnašanja razpokanega armiranobetonskega elementa pri torzijski obremenitvi:



Strižno obremenitev posameznih sten $q_t z_i$ uravnatežujejo **sile v tlačnih razporah** $F_{cw,i}$:

Ravnatežje»vertikalnih« sil v prerezu **A-A**:

$$F_{cw,i} = \frac{q_t \cdot z_i}{\sin \theta}$$

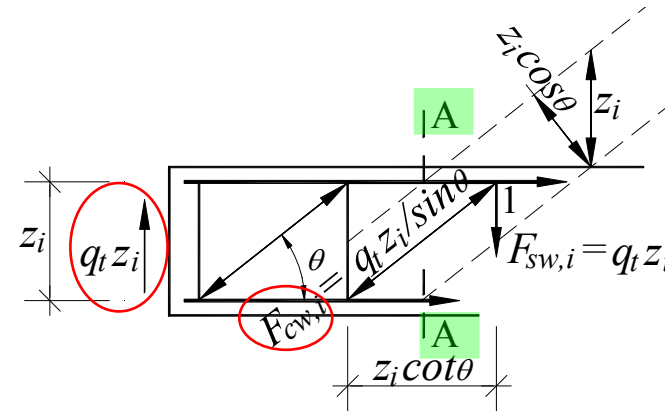
$$q_t = \frac{T}{2 \cdot A_k} \rightarrow F_{cw,i} = \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k \cdot \sin \theta}$$

Prerez tlačne razpore $A_{cw,i} = t_i \cdot z_i \cdot \cos \theta$:

→ napetost v razporah i -te stene: $\sigma_{cw,i} = \frac{F_{cw,i}}{A_{cw,i}} = \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k \cdot \sin \theta \cdot t_i \cdot z_i \cdot \cos \theta}$ oz.

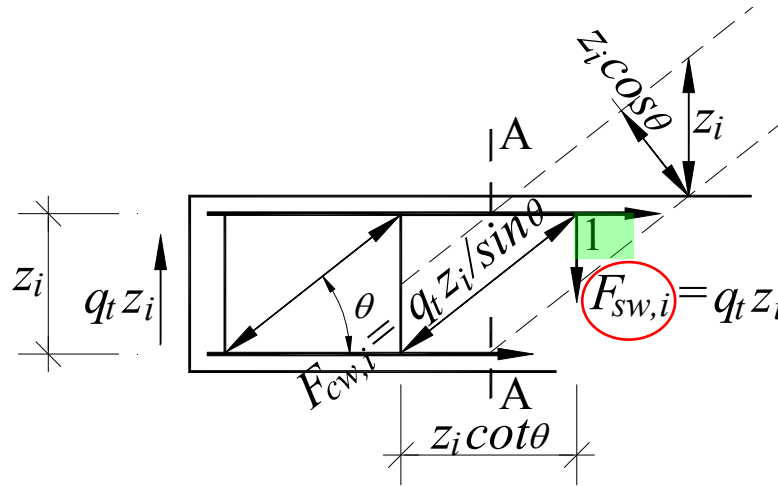
$$\sigma_{cw,i} = \frac{T}{2 \cdot A_k \cdot t_i \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}$$

$\sigma_{cw,i}$ se po stenah spreminja, produkt $\sigma_{cw,i} t_i$ pa je tako kot strižni tok q_t konstanten po obodu.



Ravnotežje »vertikalnih« sil v vozlišču 1 → sila $F_{sw,i}$ v prečni stremenski armaturi i -te stene:

$$F_{sw,i} = F_{cw,i} \cdot \sin \theta = q_t \cdot z_i$$



Strižni tok q_t

$$q_t = \frac{T}{2 \cdot A_k} \rightarrow$$

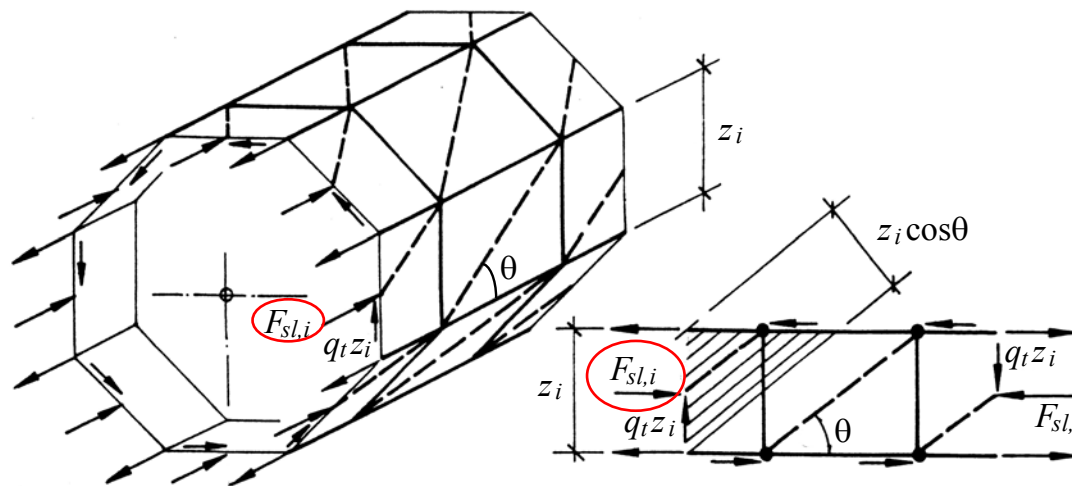
$$F_{sw,i} = \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k}$$

$F_{sw,i}$ - sila v palici modela, ki nadomešča prečno stremensko armaturo na dolžini $z_i \cot \theta$

Horizontalna komponenta **sile v tlačni razpori i -te stene $F_{sl,i}$** , ki jo moramo uravnovežiti s silami v vzdolžni natezni armaturi :

$$F_{sl,i} = F_{cw,i} \cdot \cos \theta = \frac{q_t \cdot z_i \cdot \cos \theta}{\sin \theta} = q_t \cdot z_i \cdot \cot \theta$$

$$q_t = \frac{T}{2 \cdot A_k} \rightarrow F_{sl,i} = \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k} \cdot \cot \theta$$



Celotno silo v vzdolžni natezni armaturi:

$$F_{sl} = \sum F_{sl,i} = \sum \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k} \cdot \cot \theta = \frac{T \cdot \cot \theta}{2 \cdot A_k} \cdot \sum z_i$$

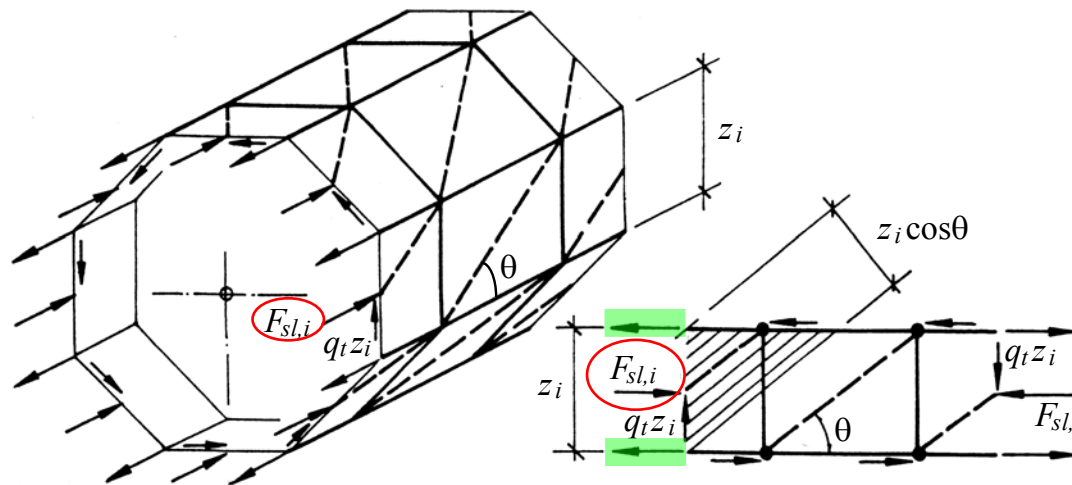
Obseg ploskve A_k omejene s srednjicami sten (vsoto dolžin stranic z_i) označimo kot u_k →

$$F_{sl} = \frac{T \cdot \cot \theta}{2 \cdot A_k} u_k$$

Horizontalna komponenta **sile v tlačni razpori i -te stene $F_{sl,i}$** ki jo moramo uravnovežiti s silami v **vzdolžni natezni armaturi**:

$$F_{sl,i} = F_{cw,i} \cdot \cos \theta = \frac{q_t \cdot z_i \cdot \cos \theta}{\sin \theta} = q_t \cdot z_i \cdot \cot \theta$$

$$q_t = \frac{T}{2 \cdot A_k} \rightarrow F_{sl,i} = \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k} \cdot \cot \theta$$



Celotno silo v vzdolžni natezni armaturi:

$$F_{sl} = \sum F_{sl,i} = \sum \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k} \cdot \cot \theta = \frac{T \cdot \cot \theta}{2 \cdot A_k} \cdot \sum z_i$$

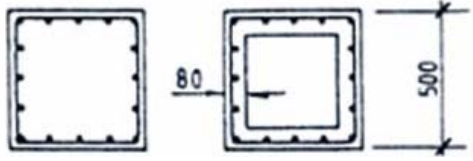
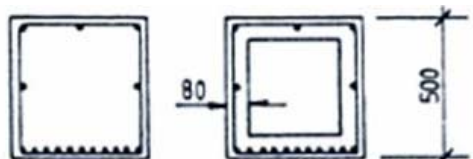
Obseg ploskve A_k omejene s srednjicami sten (vsoto dolžin stranic z_i) označimo kot u_k →

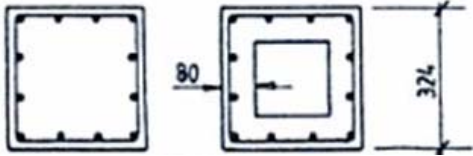
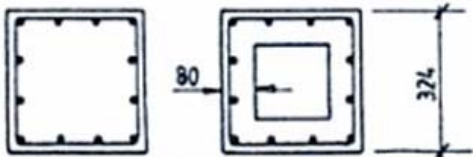
$$F_{sl} = \frac{T \cdot \cot \theta}{2 \cdot A_k} u_k$$

Mejna torzijska odpornost in dimenzioniranje glede torzije po standardu SIST EN 1992-1-1

Predpostavke in poenostavitve:

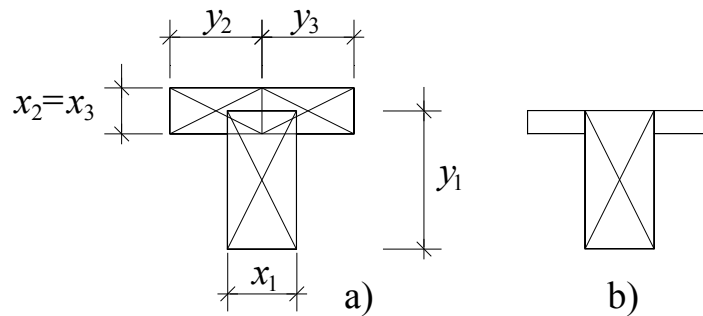
- Torzijska odpornost elementa se lahko izračuna na podlagi **odpornosti zaprtega tankostenskega škatlastega prereza**, pri katerem je ravnotežje zagotovljeno **z zaprtim strižnim tokom** (enakomerna torzija).
- Pri **votlih prerezih** upoštevana debelina stene ne sme presegati **dejanske debeline stene**.
- **Polni prerezi** se lahko modelirajo z **nadomestnimi tankostenskimi škatlastimi prerezi**.
- Prereze **razčlenjenih oblik**, kot so prerezi T-oblike, **razdelimo na pravokotne podprereze**, ki se lahko modelirajo z ustreznimi tankostenskimi prerezi. Podprereze se formira tako, da je dosežena največja možna vsota torzijskih togosti podprerezov.

	Armatura	Eksperimentalni rezultati	
		T_R [kNm]	M_R [kNm]
Lampert in Thürlimann T1/T4 	vzdolžne palice 16φ12 stremena φ12/110 mm	129/129	-/-
TB4/TB1 	vzdolžne palice 16φ12 stremena φ12/110 mm	114/115	146/134

	Armatura	Eksperimentalni rezultati	
		$T_{R,c}$ [kNm]]	T_R [kNm]]
Leonhardt in Schelling VQ1/VH1 	vzdolžne palice $12\phi 6$ stremena $\phi 6/100$ mm	13/12	21/21
VQ4/VH2 	vzdolžne palice $24\phi 6$ stremena $\phi 6/50$ mm	11/12	31/34

Razdelitev delujočega torzijskega momenta T_{Ed} na podprereze T_{Edi}

- Sorazmerno njihovim torzijskim **togostim v nerazpokanem stanju**



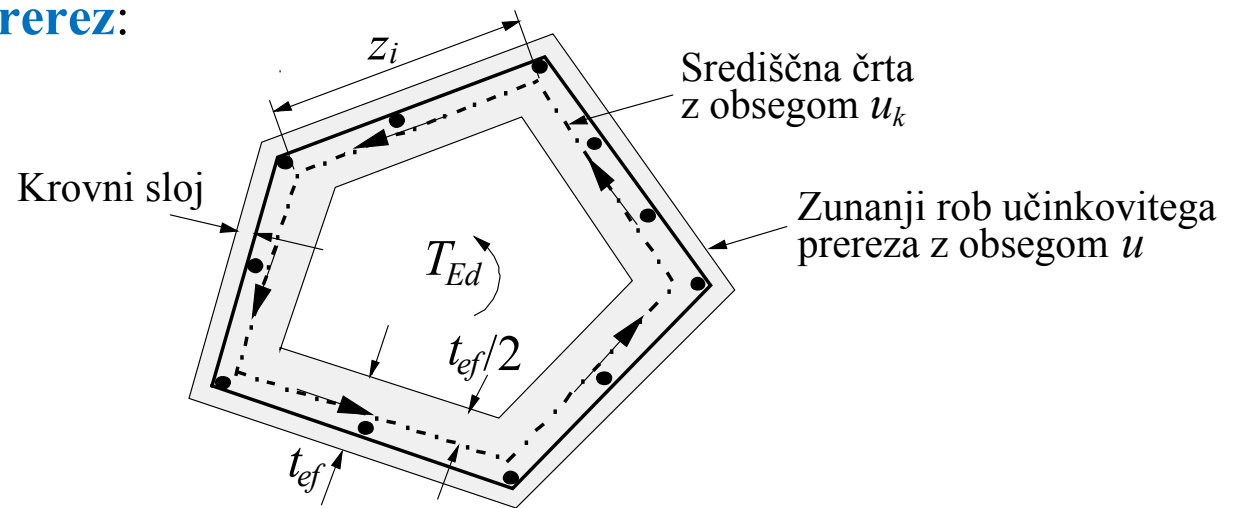
$$T_{Edi} = T_{Ed} \frac{k_i \cdot x_i^3 \cdot y_i}{\sum k_j \cdot x_j^3 \cdot y_j}$$

$$x_i \leq y_i, i=1,2,\dots,n$$

$$k_i = \frac{1}{3} \left[1 - 0,63 \frac{x_i}{y_i} \left(1 - \frac{x_i^4}{12 \cdot y_i^4} \right) \right]$$

- Modelni predpisi **CEB–FIP MC 1990** podajajo razdelitev z $k_i = 1$
- V primeru prereza z izrazito izstopajočim podprerezom pripišemo vso torzijsko obremenitev oz. **odpornost najbolj togemu podprerezu**.
- Vsak podprerez se **lahko dimensionira ločeno** na projektno torzijsko obremenitev T_{Edi} .
- Torzijsko odpornost prereza T_{Rdi} se lahko določi z vsoto torzijskih odpornosti T_{Rdi} posameznih podprerezov ($i=1,2,\dots,n$):
$$T_{Rd} = \sum T_{Rdi}$$

- Za račun torzijske odpornosti in dimenzioniranje polnih in votlih prerezov se uporabi **nadomestni zaprti tankostenski prerez**:



A_k ploskev, ki jo obdajajo srednjice spojenih sten, vključno z notranjimi votlimi območji,
 $t_{ef,i}$ **učinkovita debelina i -te stene**:

$t_{ef} = A/u$, a **ne manj kot dvakratna oddaljenost težišča vzdolžne armature od roba prereza**, pri votlih prerezih je zgornja meja učinkovite debeline **dejanska debelina stene**,

A celotna ploščina prečnega prereza znotraj zunanjega oboda, vključno z notranjimi votlimi območji,

u zunanji obseg prečnega prereza,

z_i dolžina stranice i -te stene, določena z razdaljo med presečiščema srednjice stene s srednjicama sosednjih sten.

Mejna torzijska odpornost in dimenzioniranje elementov pri čisti torziji

Iz sestava nadomestnega prostorskega paličja sledi, da se torzijsko obremenjen armiranobetonski element **lahko poruši na tri načine**, in sicer:

- zaradi prekoračitve trdnosti tlačnih razpor ali
- zaradi prešibkih stremen (A_{sw}) ali pa
- zaradi prešibke vzdolžne armature (A_{sl}).

Iz tega sledijo tri omejitve za mejni torzijski moment znanega betonskega elementa.

Določamo **mejno odpornost glede torzije v MSN** → upoštevamo naslednje:

- **plastifikacija strižne armature:** $\sigma_{sw} = f_{ywd}$.
- **plastifikacija vzdolžne armature:** $\sigma_{sl} = f_{yd}$.
- **beton** v tlačnih razporah, ki so **v območju torzijskih razpok:** $\sigma_{cw} = \alpha_{cw} \cdot \nu \cdot f_{cd}$;
pri tem je koeficient α_{cw} s katerim zajamemo vpliv osnovnih vzdolžnih tlačnih napetosti zaradi osne sile; v primeru neprednapetih konstrukcij enak 1: $\alpha_{cw}=1$ sicer pa so zanj podani izrazi glede na velikost vnesene tlačne napetosti. Koeficient ν pa je koeficient redukcije

tlačne trdnosti na račun torzijskih strižnih razpok (približno v smeri tlačnih razpor):

$$\nu = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck} [MPa]}{250} \right).$$

- za mejno torzijsko odpornost, ki jo določa **nosilnost tlačnih razpor uporabimo oznako $T_{Rd,max}$**
- za mejno torzijsko odpornost, ki jo določa **nosilnost prečne stremenske armature uporabimo oznako $T_{Rd,sw}$**
- za mejno torzijsko odpornost, ki jo določa **nosilnost vzdolžne armature pa uporabimo oznako $T_{Rd,sl}$**
- za odpornost glede tlačnih razpor je **merodajna stena z najmanjšo debelino**, zato za debelino stene t_i uporabimo oznako **$t_{ef,min}$** .

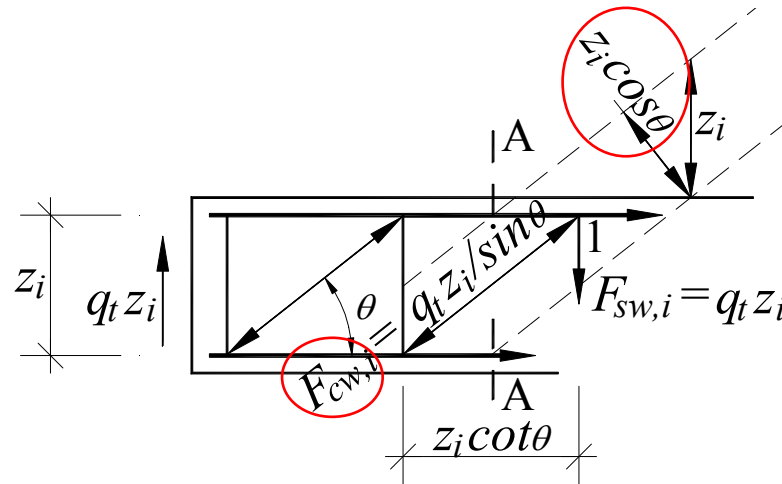
Mejna torzijska odpornost, ki jo določa nosilnost tlačnih razpor:

$$\sigma_{cw,i} = \frac{T}{2 \cdot A_k \cdot t_i \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \rightarrow T_{RD,max} = 2 \cdot \alpha_{cw} \cdot v \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,min} \cos \theta \cdot \sin \theta$$

$$\cos \theta \sin \theta \rightarrow \cot \theta / (1 + \cot^2 \theta) \rightarrow$$

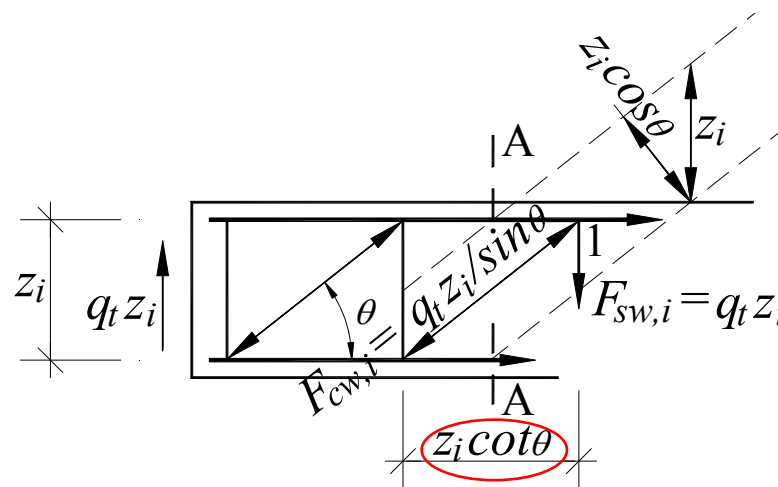
$$T_{RD,max} = \frac{2 \cdot \alpha_{cw} \cdot v \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,min} \cdot \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

Pri dimenzioniranju elementov moramo vedno izpolniti pogoj: $T_{Ed} \leq T_{RD,max}$.



Mejna torzijska odpornost, ki jo določa nosilnost prečne strižne armature:

$$F_{sw,i} = \frac{T \cdot z_i}{2 \cdot A_k} \rightarrow T_{Rd,sw} = \frac{F_{sw,i} \cdot 2 \cdot A_k}{z_i}$$



A_{sw} prerez enega stremena,
s razdalja med stremeni

→ skupni prerez stremen na dolžini $z_i \cot \theta$ (zajamemo z eno prečno palico modela) in pripadajoča mejna sila palice:.

$$F_{sw,i} = \frac{A_{sw}}{s} z_i \cot \theta \cdot f_{ywd} \rightarrow T_{Rd,sw} = \frac{A_{sw}}{s} 2 \cdot A_k \cdot \cot \theta \cdot f_{ywd} .$$

Dimenzioniranje: upoštevamo $T_{Rd,sw} = T_{Ed}$ in dobimo izraz za prerez stremen na enoto dolžine:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k \cdot \cot \theta \cdot f_{ywd}} .$$

Mejna torzijska odpornost, ki jo določa nosilnost vzdolžne torzijske armature:

$$F_{sl} = \frac{T \cdot \cot \theta}{2 \cdot A_k} u_k \rightarrow T_{Rd,sl} = \frac{F_{sl} \cdot 2 \cdot A_k}{u_k \cdot \cot \theta}$$

Skupni prerez vzdolžne armature za prevzem torzije ΣA_{sl} in $\sigma_{sl} = f_{yd}$

$$T_{Rd,sl} = \frac{\sum A_{sl} \cdot f_{yd}}{u_k} \frac{2 \cdot A_k}{\cot \theta} \cdot$$

Dimenzioniranje: upoštevamo $T_{Rd,sl} = T_{Ed}$ in dobimo potrebni prerez vzdolžne armature na enoto obsega:

$$\frac{\sum A_{sl}}{u_k} = \frac{T_{Ed} \cdot \cot \theta}{2 \cdot A_k \cdot f_{yd}} \cdot$$

Vzdolžna torzijska armatura mora biti na splošno **enakomerno razporejena vzdolž dolžin** stranic z_i , pri manjših prerezih pa se lahko skoncentrira na koncih teh dolžin.

V standardu SIST EN 1992-1-1 izraza za račun potrebne stremenske armature A_{sw}/s na enoto dolžine torzijsko obremenjenega elementa ni

- predvideva, da se določi z dimenzioniranjem **posameznih sten** nadomestnega škatlastega prereza na pripadajočo prečno silo $V_{Ed,i}$, ki izhaja iz torzijskega momenta T_{Ed} :

$$V_{Ed,i} = \tau_{t,i} \cdot t_{ef,i} \cdot z_i; \quad \tau_{t,i} \cdot t_{ef,i} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} \rightarrow \boxed{V_{Ed,i} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot z_i}$$

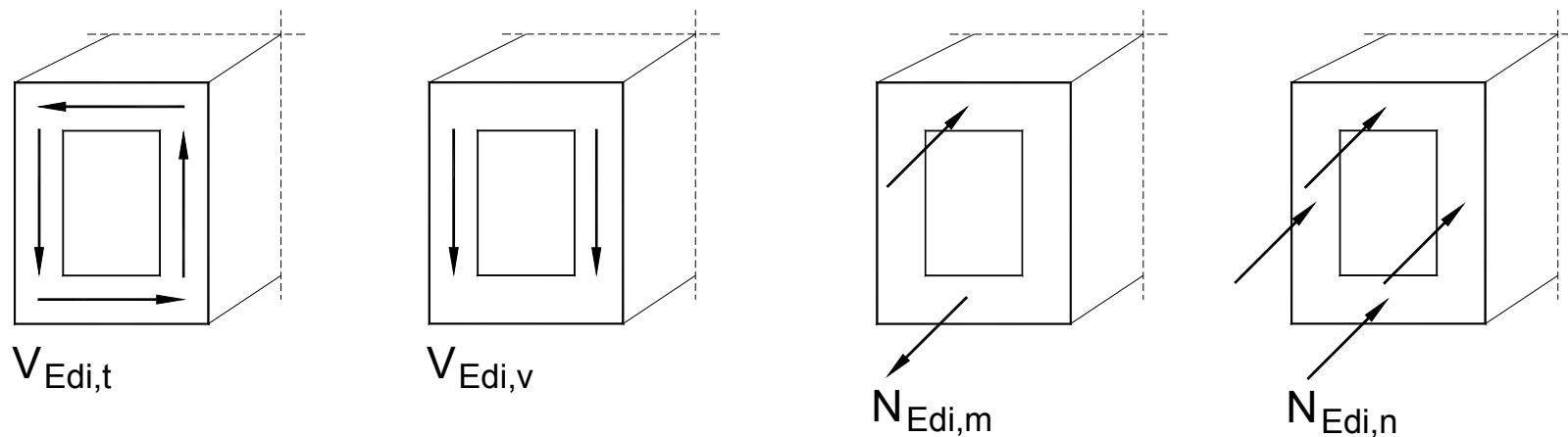
Izhodišče strižna armatura pri prečni

sili:
$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha};$$

$$\alpha = 90^\circ; \quad V_{Ed} = V_{Ed,i}; \quad z = z_i$$

$$\boxed{\frac{A_{sw}}{s} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta}}$$

Postopek dimensioniranja glede torzije z nadomestnimi prečnimi silami $V_{Ed,i}$ v konturnih stenah v standardu SIST EN1992-1-1 je pripravljen tako, da **omogoča upoštevanje hkratnega delovanja večih komponent vektorja obremenitve prereza** (N_{Ed} , M_{Ed} , V_{Ed} , T_{Ed}).

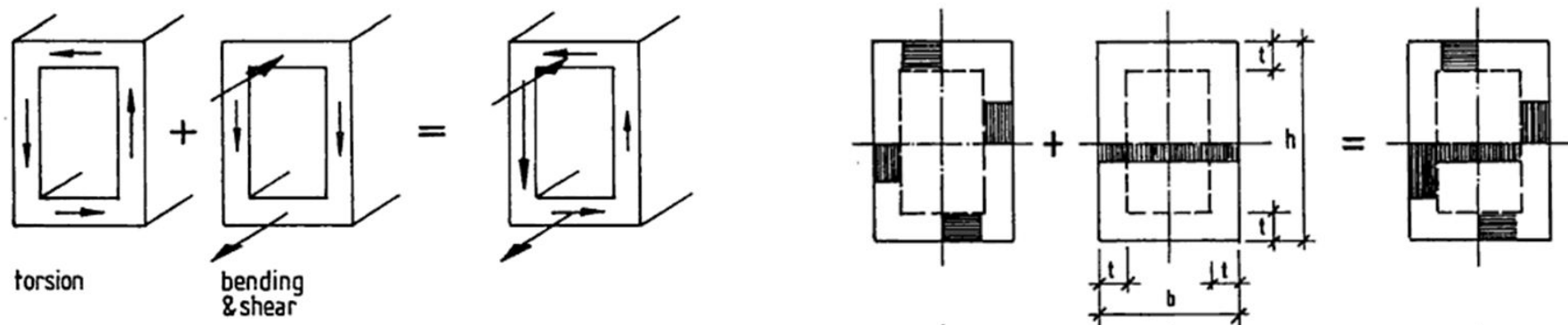


EksPLICITNO pa je omenjena:

- **kombinacija prečne sile in torzije,**
- **posredno pa še vpliv osne sile** v posameznem podprezu, ko je omenjena opustitev torzijske vzdolžne armature v tlačnih pasovih oziroma princip dodajanja te armature k ostali (osno-upogibni) armaturi v nateznih pasovih.

Kombinacija prečne sile in torzije

Učinki torzije in prečne sile pri votlih in polnih elementih lahko sovpadajo:



Pri dimenzioniranju na torzijo in prečno silo **se privzame enak** naklon tlačnih razpor θ .

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5.$$

Največja odpornost elementa, ki je izpostavljen torziji v kombinaciji s prečno silo, **je omejena z odpornostjo betonskih razpor**

$$\left[T_{Ed} / T_{Rd,max} + V_{Ed} / V_{Rd,max} \leq 1,0 \right],$$

T_{Ed} projektni torzijski moment, V_{Ed} projektna prečna sila,

$T_{Rd,max}$ projektna torzijska odpornost pri izkoriščenosti tlačnih razpor,

$V_{Rd,max}$ pa največja projektna odpornost glede prečne z ozirom na nosilnost razpor

Pri polnih prečnih prerezih se lahko za določitev $V_{Rd,max}$ upošteva celotna širina stojine.

Potrebno stremensko in vzdolžno armaturo pri kombinaciji prečne sile in torzije **določimo ločeno za prečno silo $A_{sw}(V_{Ed})$ in ločeno za torzijo $A_{sw}(T_{Ed})$ ter obe skupaj namestimo v element.**

Premislek: pri $A_{sw}(V_{Ed})$ imamo lahko večstrižno streme, pri $A_{sw}(T_{Ed})$ pa so zaprta stremena vedno le enostrižna.

Če pri približno pravokotnih prečnih prerezih velja

$$\boxed{T_{Ed} / T_{Rd,c} + V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1,0}$$

lahko **namestimo le minimalno vzdolžno in stremensko armaturo.**

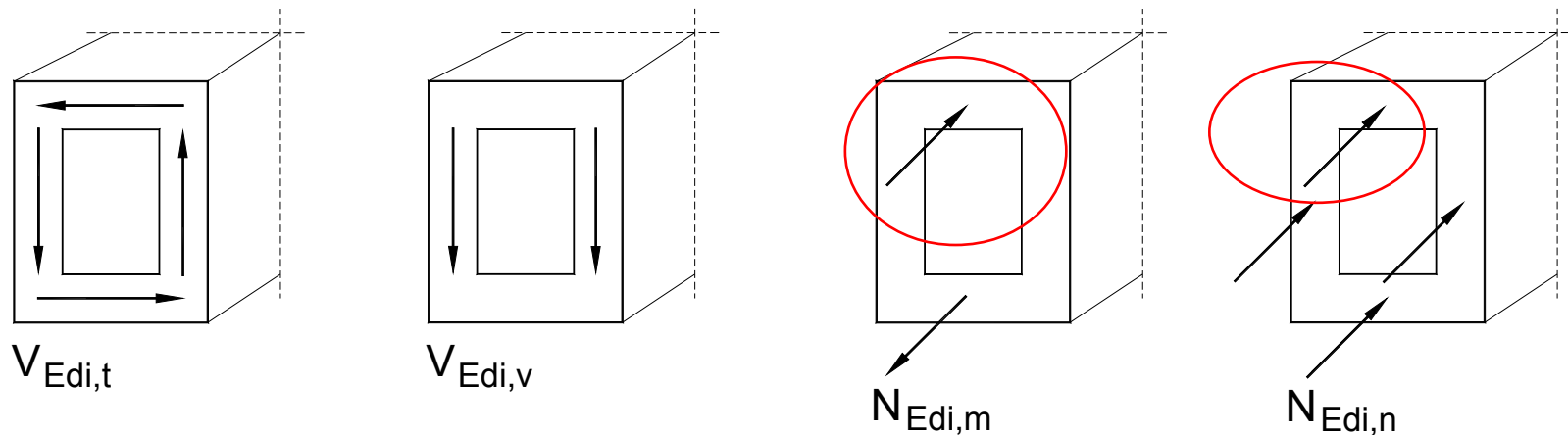
$T_{Rd,c}$ torzijski moment, pri katerem se pojavijo prve razpoke: $T_{Rd,c} = 2 A_k f_{ctd} t_{ef,min}$

$$\tau_{t,max} = \frac{T}{2 \cdot A_k \cdot t_{min}} = f_{ctd} \rightarrow T_{Rd,c}$$

$V_{Rd,c}$ pa je odpornost glede strižnih razpok glede prečne sile (glej pri prečni sili).

Vzdolžna torzijska armatura mora **biti na splošno enakomerno razporejena** vzdolž dolžin stranic z_i , pri **manjših prerezih pa se lahko skoncentrira na koncih teh dolžin**.

V tlačnih pasovih se lahko **prerez vzdolžne armature zmanjša** v sorazmerju z razpoložljivo tlačno silo (**pozor pri različnih kombinacijah obtežnih primerov**).



V nateznih pasovih je treba torzijsko vzdolžno armaturo **dodati k ostali** vzdolžni armaturi.

Geometrijski podatki:

$$b = 50 \text{ cm}; h = 60 \text{ cm}$$

$$a = 5 \text{ cm} \text{ (oddaljenost težišča vzd. armature od konture prereza)}$$

$$A = 50 \cdot 60 = 3.000 \text{ cm}^2$$

$$u = 2 \cdot (50 + 60) = 220 \text{ cm}$$

$$t_{ef} = A/u = 3.000 / 220 = 13,6 \text{ cm}$$

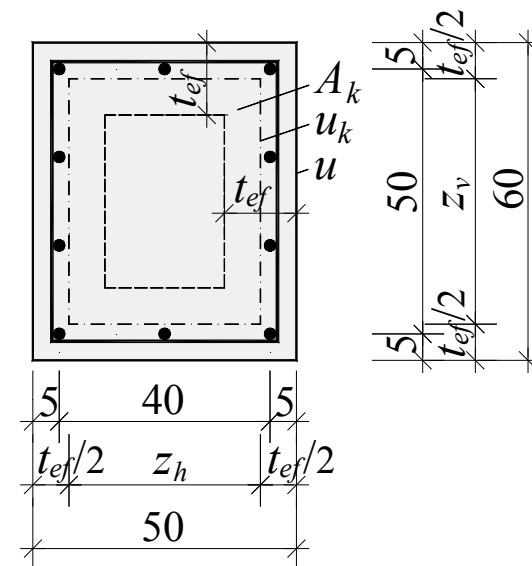
$$t_{ef} > 2 \cdot a = 2 \cdot 5 = 10 \text{ cm}$$

$$z_h = b - 2 \cdot t_{ef}/2 = b - t_{ef} = 50 - 13,6 = 36,4 \text{ cm}$$

$$z_v = h - 2 \cdot t_{ef}/2 = h - t_{ef} = 60 - 13,6 = 46,4 \text{ cm}$$

$$A_k = z_h \cdot z_v = 36,4 \cdot 46,4 = 1.689 \text{ cm}^2$$

$$u_k = 2 \cdot (z_h + z_v) = 2 \cdot (36,4 + 46,4) = 165,6 \text{ cm}$$



Torzijska odpornost betonskega prereza brez strižne armature:

$$t_{ef,min} = t_{ef} = 13,6 \text{ cm}$$

$$T_{Rd,c} = 2 \cdot A_k \cdot f_{ctd} \cdot t_{ef,min} = 2 \cdot 1689 \cdot 0,10 \cdot 13,6 = 4.594 \text{ kNcm} = 45,9 \text{ kNm}$$

$$T_{Ed} = 75,0 \text{ kNm} > T_{Rd,c} = 45,9 \text{ kNm} \rightarrow \text{Potrebne so nadaljnje kontrole!}$$

Ali prerez lahko prenese takšno projektno obremenitev z ozirom na tlačne razpore:

Privzamemo: $\theta = 45^\circ \rightarrow \cot \theta = 1$; $\sin \theta = \cos \theta = 0,707$

$$T_{Ed} / T_{Rd,max} + V_{Ed} / V_{Rd,max} \leq 1,0$$

$V_{Ed} = 0 \rightarrow$ ostane le pogoj: $T_{Ed} < T_{Rd,max}$

$$T_{Rd,max} = 2\nu\alpha_{cw}f_{cd}A_k t_{ef,i} \sin \theta \cos \theta = 2 \cdot 0,55 \cdot 1,0 \cdot 1,33 \cdot 1689 \cdot 13,6 \cdot 0,707^2 = 16.800 \text{ kNcm} = 168 \text{ kNm}$$

$$\nu = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \left[1 - \frac{20}{250} \right] = 0,55$$

$\alpha_{cw} = 1,0$ za konstrukcije brez prednapetja

$T_{Ed} = 75,0 \text{ kNm} < T_{Rd,max} = 168,0 \text{ kNm} \rightarrow$ Betonski prerez je ustrezen!

Potrebna vzdolžna armatura:

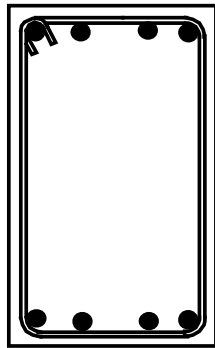
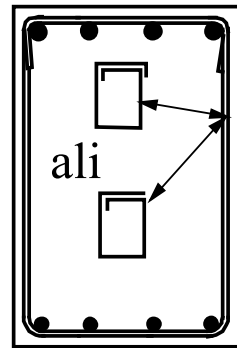
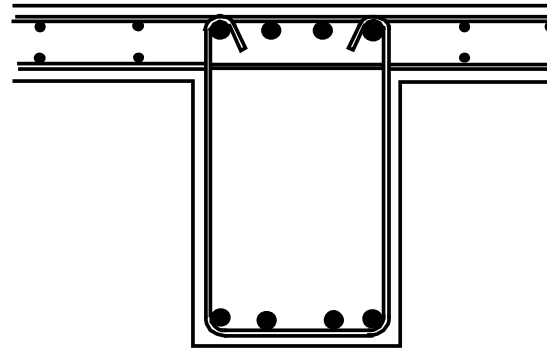
$$\sum A_{sl} = \frac{T_{Ed} u_k}{2 A_k f_{yd}} \cot \theta = \frac{75 \cdot 100 \cdot 165,6}{2 \cdot 1689 \cdot 43,5} 1,0 = 8,45 \text{ cm}^2 \rightarrow \mathbf{8 \phi 12} \text{ (} 9,05 \text{ cm}^2 \text{) po obodu}$$

Potrebna prečna armatura:

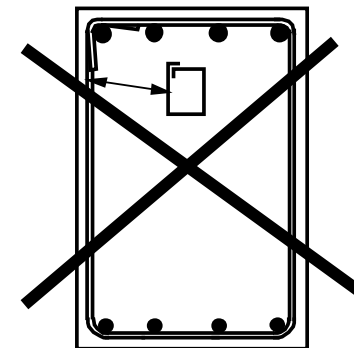
$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{T_{Ed}}{2 A_k f_{ywd} \cot \theta} = \frac{75 \cdot 100}{2 \cdot 1689 \cdot 34,8 \cdot 1,0} = 0,050 \text{ cm} = 0,050 \text{ cm}^2/\text{cm} = 5,0 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$\rightarrow$ stremena $\mathbf{\phi 8/10 \text{ cm}}$ ($A_{sw}/s = 5,03 \text{ cm}^2/\text{m}$)

Konstruiranje torzijskih stremen:

*a1)**a2)**a3)*

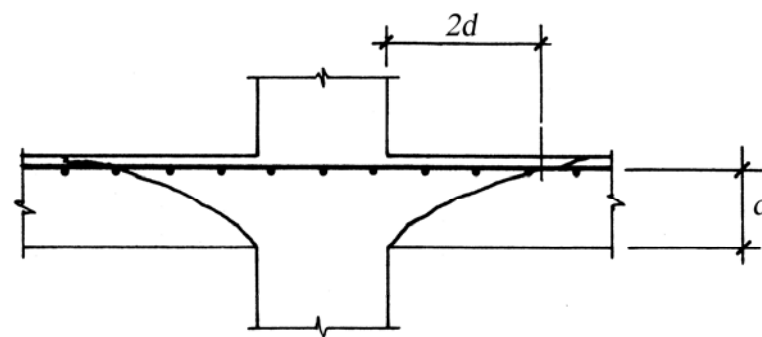
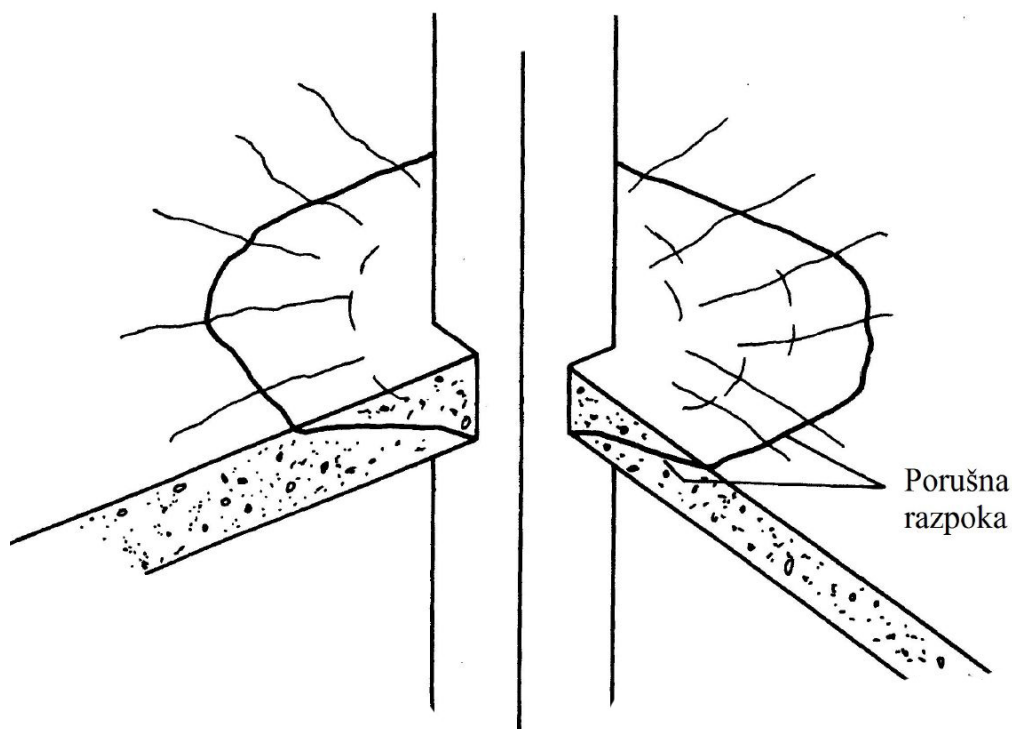
a) priporočene oblike stremen



b) nepriporočena oblika stremen

Račun mejne odpornosti ploščastih armiranobetonskih elementov pri preboju

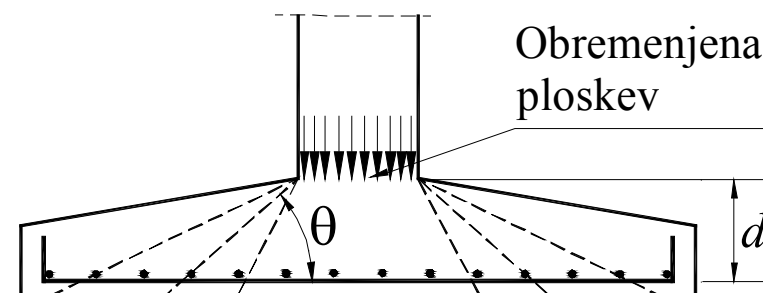
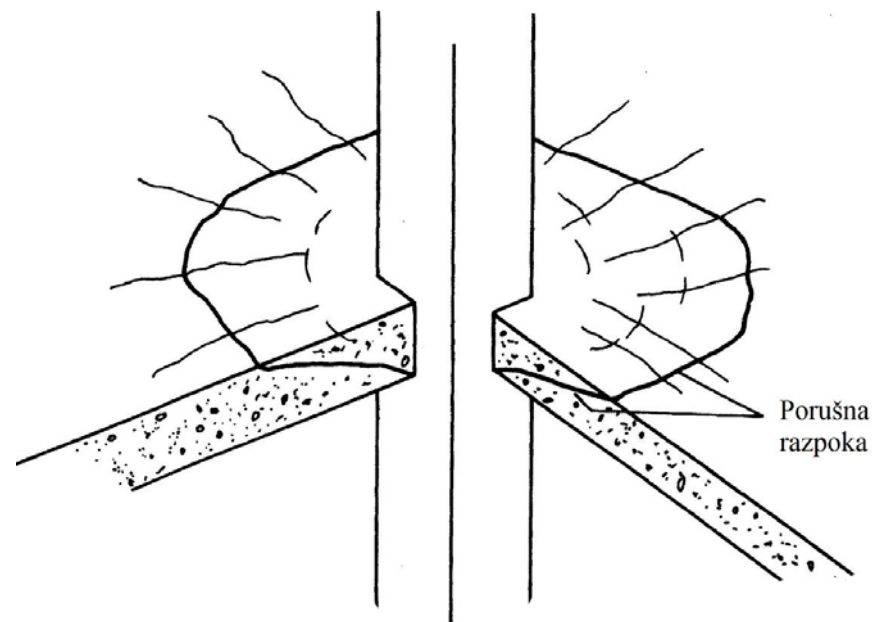
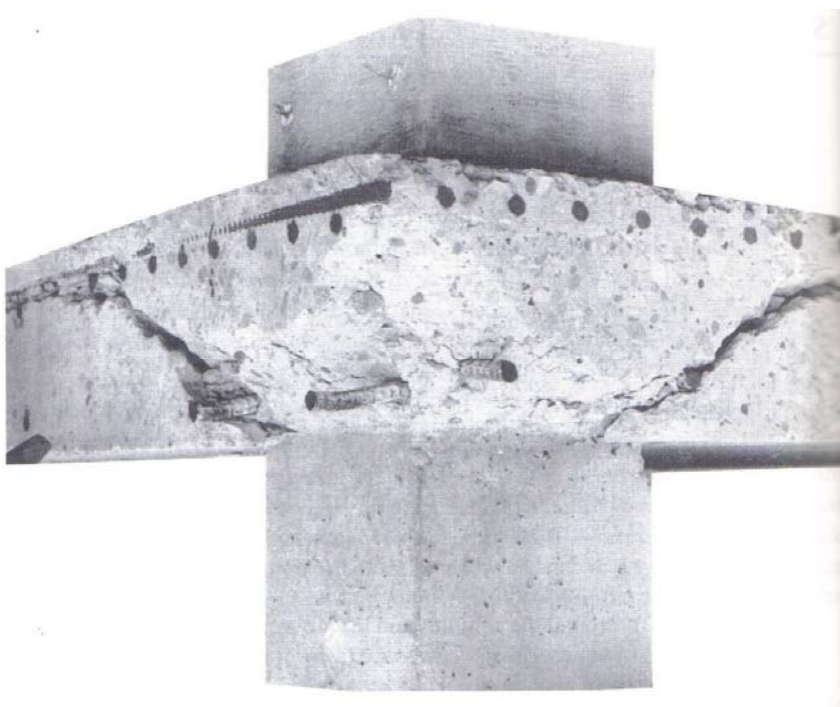
Preboj - primer strižne obremenitve, ki povzroči **iztrganje prisekanega »stožca«** iz betonskega ploščastega elementa.



Strig pri preboju ploščastih elementov se lahko pojavi zaradi **koncentrirane obtežbe** ali **reakcije stebra**, ki deluje na razmeroma **majhni ploskvi** imenovani obremenjena ploskev A_{load} .

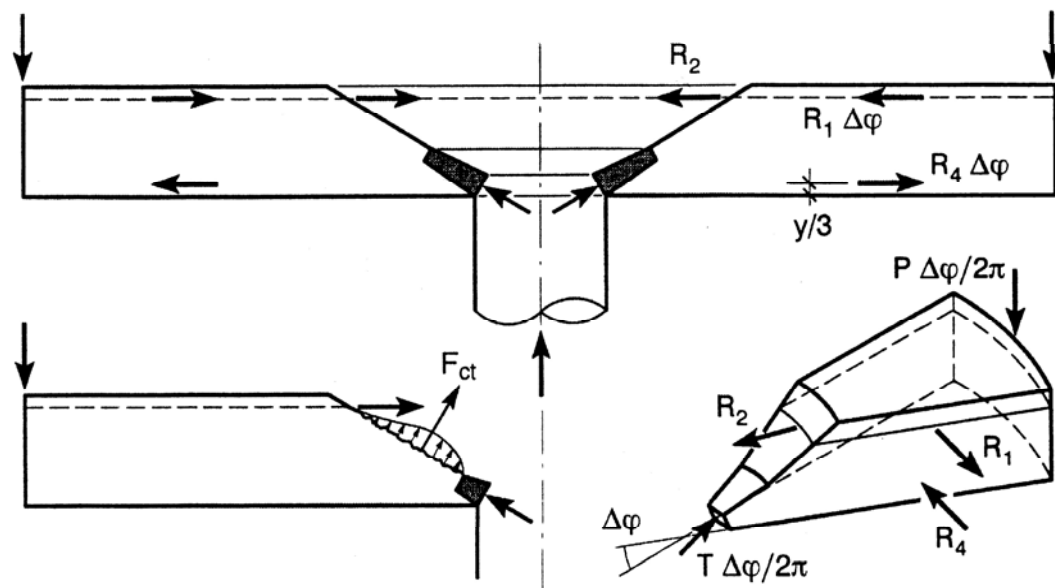
Značilni primeri konstrukcijskih elementov:

- polne gladke plošče podprte direktno s stebri
- in temelji stebrov



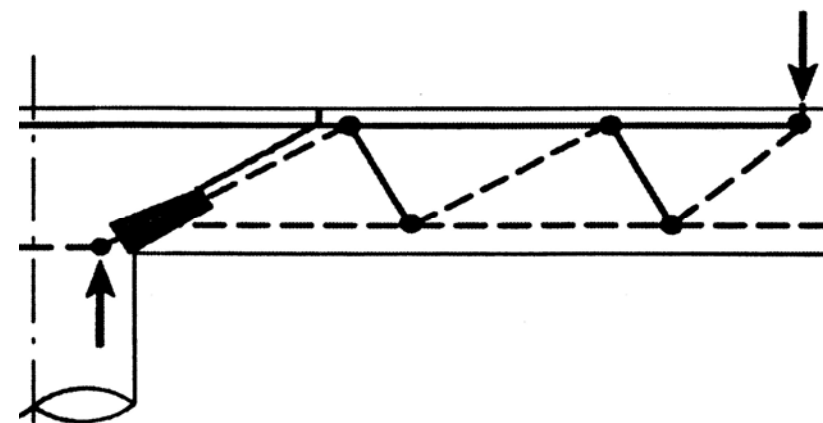
Na podlagi obsežnih eksperimentalnih raziskav so bili razviti **številni mehanski modeli za določanje odpornosti** ploščastih elementov glede preboja.

V novejšem času se **osnovni modeli dopolnjujejo še z modeli z vezmi in razporami**.



model z natezno trdnostjo

model Kinnunen/Nylander



*model Kinnunen/Nylander dopolnjen
z modelom z vezmi in razporami*

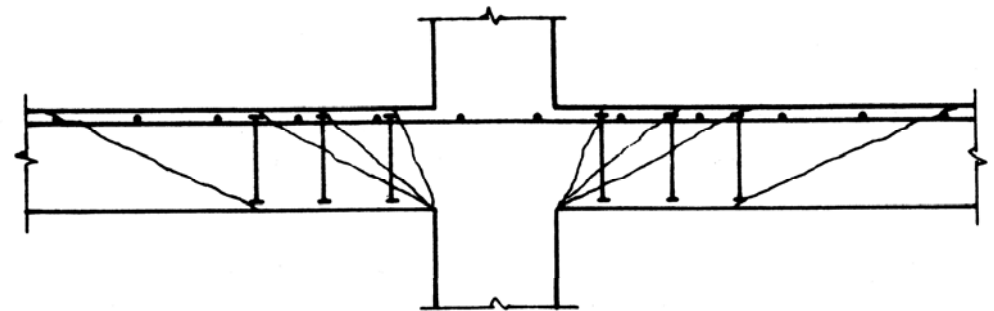
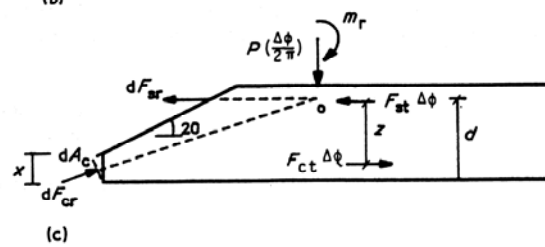
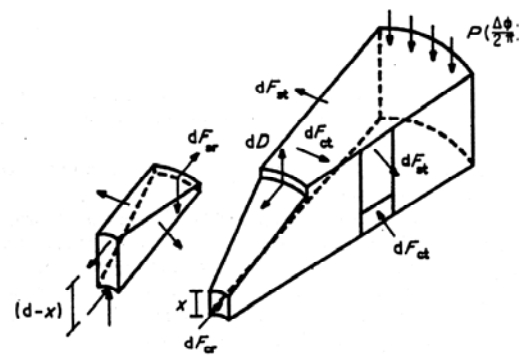
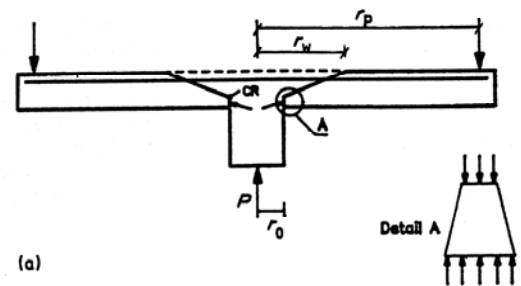
Eksperimentalne preiskave:



Eksperimentalne preiskave:



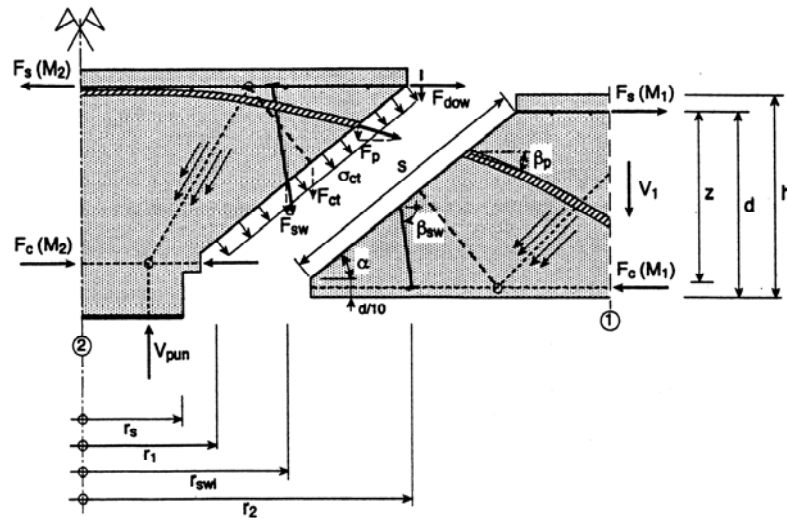
Mehanski modeli:



- Eksperimentalni rezultati

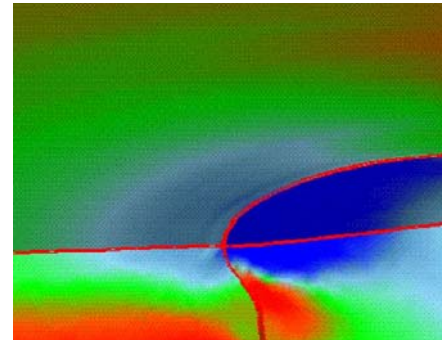


- Analiza z mehanskimi modeli



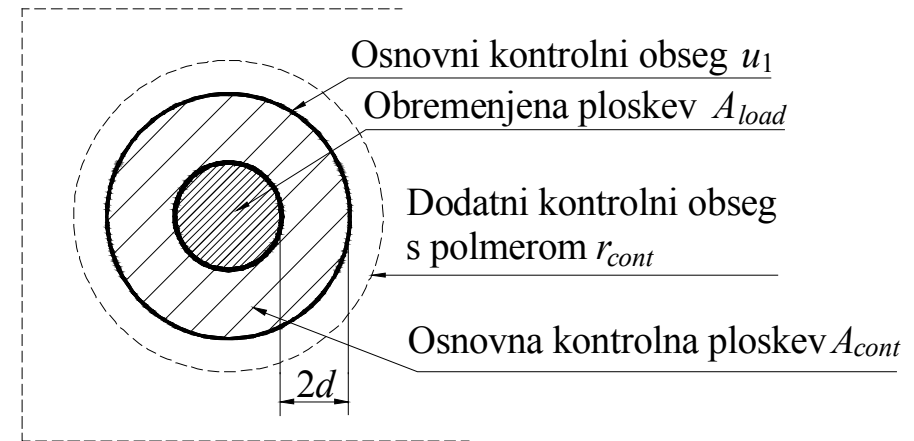
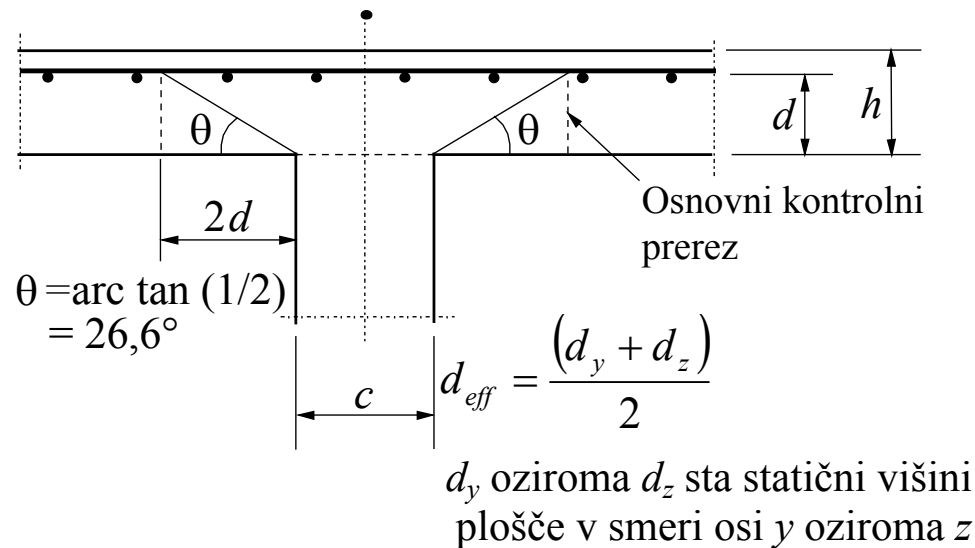
→ razvoj postopkov v predpisih in standardih

- Rezultati numeričnih simulacij (MKE)



Mejna odpornost in dimenzioniranje glede preboja po standardu SIST EN1992-1-1

Računski model za preverjanje varnosti pred poružitvijo zaradi preboja v MSN:

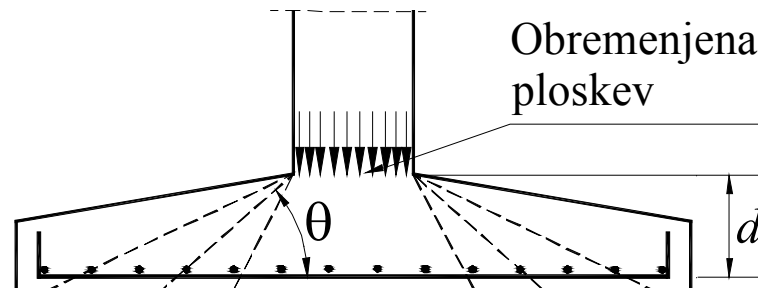


Strižno odpornost je treba preveriti:

- ob robu stebra in
- v osnovnem kontrolnem obsegu u_1 .

Pravila v SIST EN 1992-1-1, so načelno prirejena predvsem za primer zvezno razporejene obtežbe na gladkih ploščah na stebrih.

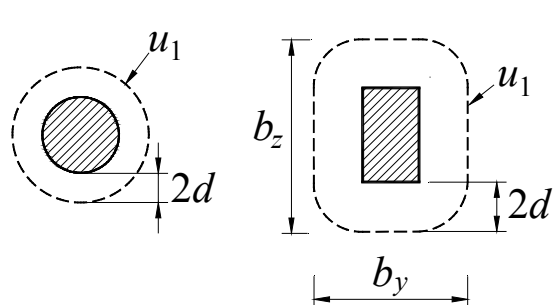
Temelji: obtežba (napetosti tal) znotraj kontrolnega obsega **prispeva k odpornosti konstrukcijskega sistema** in se pri določanju strižnih napetosti zaradi preboja **lahko odšteje**.



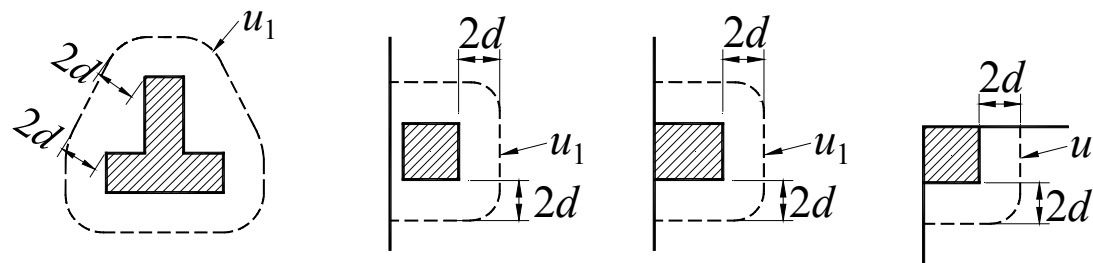
Razporeditev obtežbe in osnovni kontrolni obseg

Osnovni kontrolni obseg u_1 :

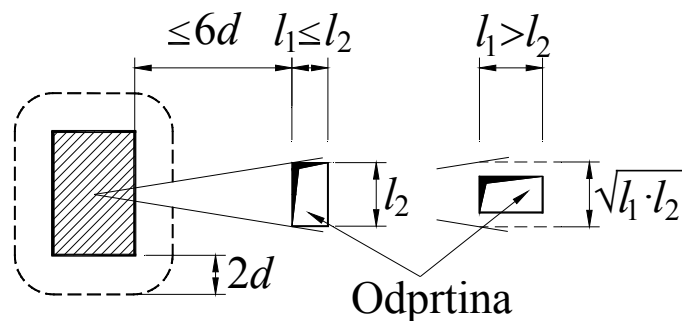
- Privzamemo, da je **na oddaljenosti $2,0 d$** od obremenjene ploskve,
- oblikovati pa ga je treba tako, da je njegova **dolžina najmanjša**



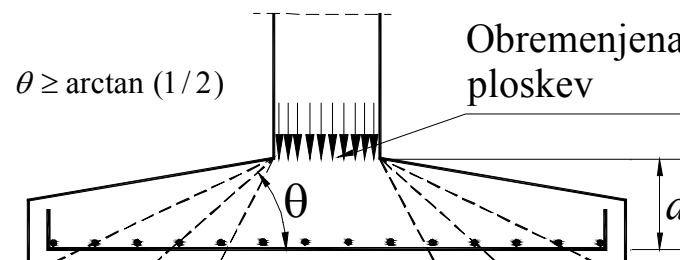
vmesni stebri



robni in vogalni stebri



Kontrolni obseg blizu odprtine v plošči

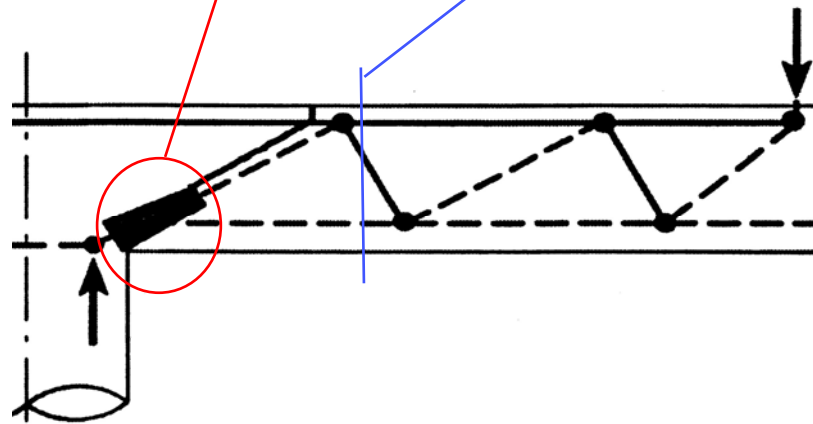


Kontrolni obsegi pri temeljih in ploščah spremenljive višine

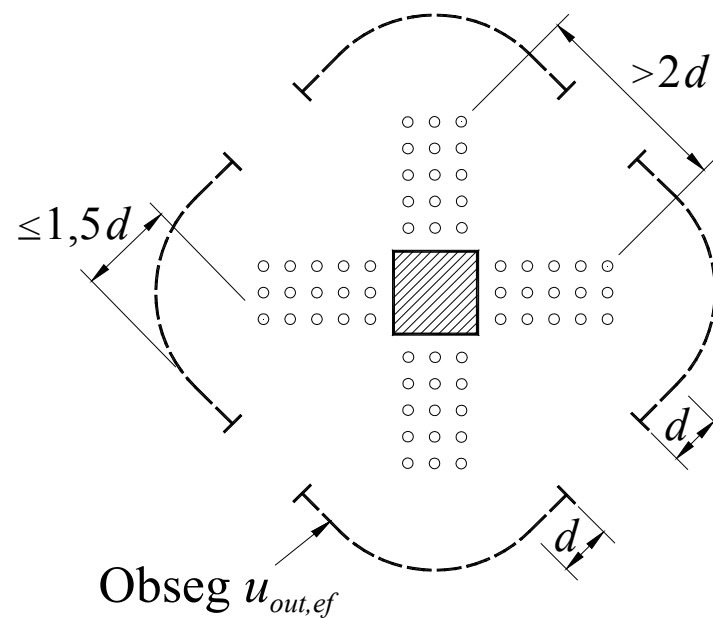
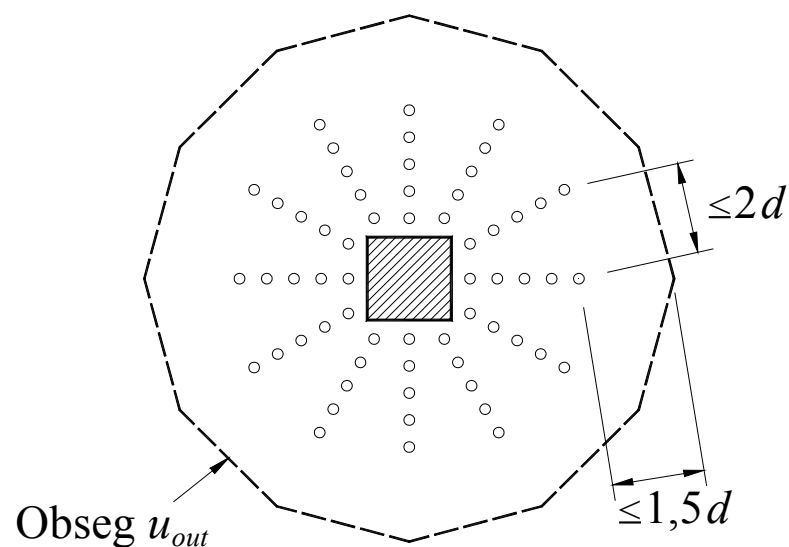
Dokaz strižne odpornosti proti preboju

Dokaz varnosti proti preboju temelji na:

- preverjanju ob robu stebra (**odpornost tlačnih razpor**) in
- preverjanju v osnovnem kontrolnem obsegu u_1 (**ugotavljanje potrebe po strižni armaturi**).



Če je potrebna strižna armatura znotraj osnovnega obsega $\rightarrow$ potrebno poiskati **dodatni kontrolni obseg u_{out} oziroma $u_{out,ef}$, pri katerem strižna armatura ni več potrebna.**



Ob obodu stebra oziroma ob obsegu obremenjene ploskve največja strižna napetost v_{Ed} **ne sme biti večja** od največje projektne strižne odpornosti $v_{Rd,max}$, ki zajame **odpornost mehanizma glede najbolj obremenjenih tlačnih razpor**:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} = 0,5 \nu f_{cd}.$$

Pri tem so:

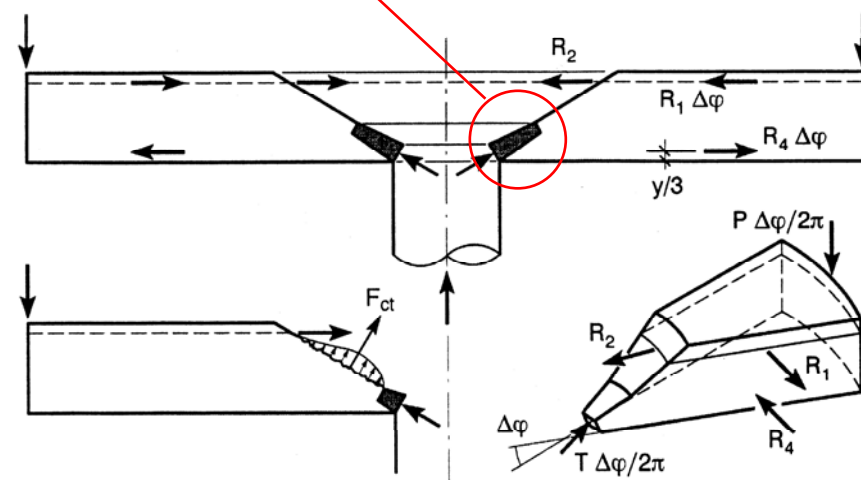
$\nu = 0,60(1 - f_{ck}/250)$ redukcijski faktor tlačne nosilnosti razpokanega betona,

V_{Ed} prečna sila, ki deluje ob obodu stebra **z obsegom u_0** ,

d statična višina plošče (glej **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.**):

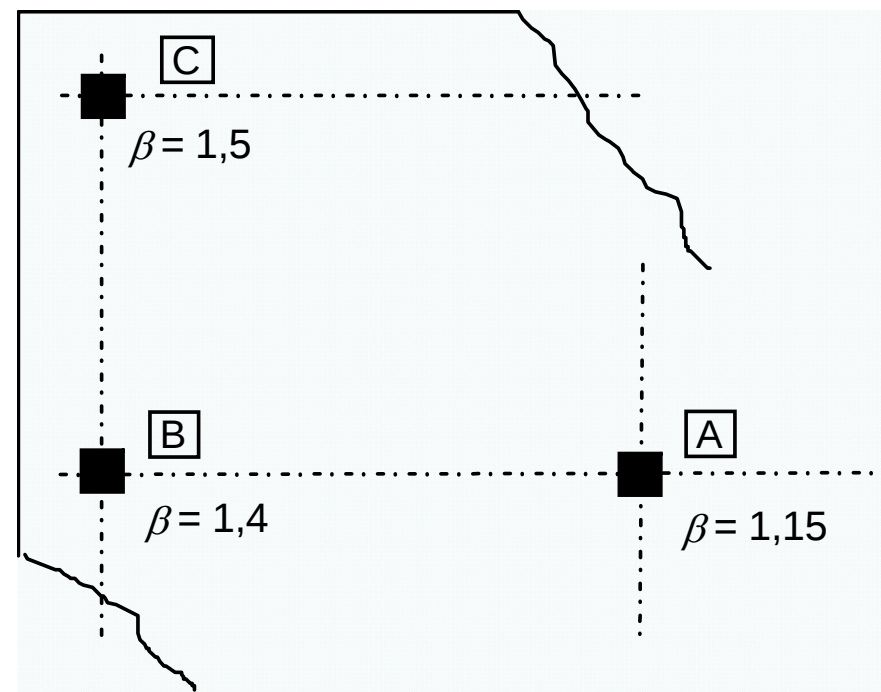
$$d = d_{eff} = \frac{(d_y + d_z)}{2}$$

β koeficient, ki upošteva možno ekscentričnost obtežbe.

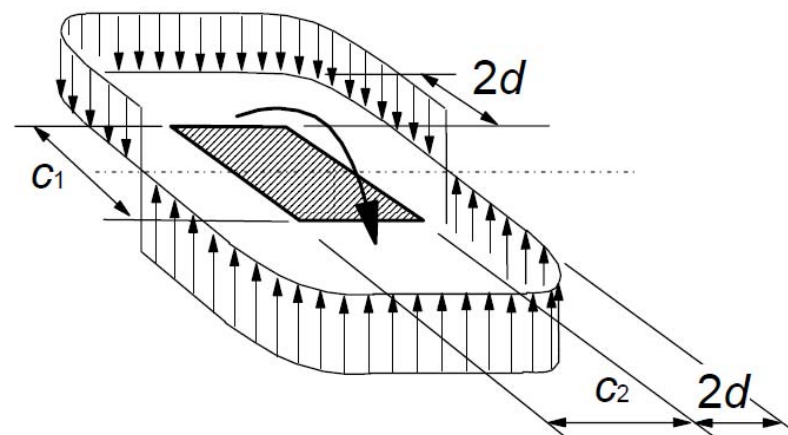


β koeficient, ki upošteva možno ekscentričnost obtežbe.

Za konstrukcije, pri katerih **horizontalna stabilnost ni odvisna od delovanja okvirjev iz stebrov in plošč** in se dolžine sosednjih razponov med seboj ne razlikujejo za več kot za 25 %, se lahko za β uporabijo približne vrednosti,



Drugi primeri → določitev koeficienta β v točkah 6.4.3 (3) do (5) standarda SIST EN 1992-1-1 s podanimi ustrezni izrazi.



Prebojna strižna odpornost plošč in temeljev stebrov brez strižne armature

$v_{Ed} \leq v_{Rd,c} \rightarrow$ posebna strižna armatura proti preboju ni potrebna

$v_{Rd,c}$ - **empirično določena strižna trdnost upogibno armiranega betona**

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i \cdot d} \leq v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp})$$

Pri tem so:

V_{Ed} prečna sila, ki deluje v kontrolnem obsegu u_i ,

f_{ck} tlačna trdnost betona v MPa,

$C_{Rd,c}$ koeficient določen na podlagi velikega števila eksperimentalnih preiskav: $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_C$

$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$ (d v mm) koeficient statične višine plošče,

$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0,02$ **srednja stopnja armiranja plošče v smeri osi y in z**; Upošteva se armatura v območju **širine stebra v posamezni smeri in po $3d$ na vsako stran**

$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2$ srednja tlačna napetost plošče zaradi osnih sil $N_{Ed,y}$ in $N_{Ed,z}$ v smeri osi y in z,

$v_{\min} = 0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$ pa reducirana strižna trdnost betona.

Temelji stebrov (točkovni temelji, temeljne plošče):

Lahko upoštevamo reducirano strižno silo $V_{Ed,red}$:

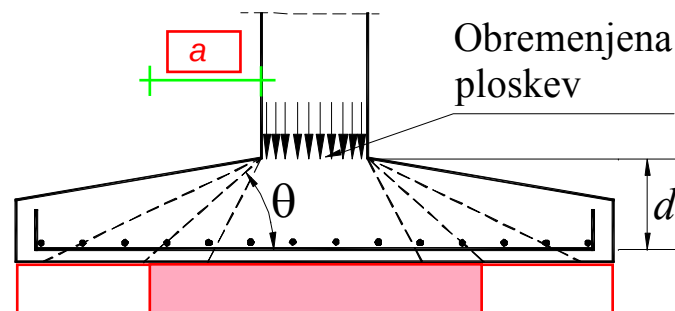
$$V_{Ed,red} = V_{Ed} - \Delta V_{Ed}$$

ΔV_{Ed} rezultirajoča prečna obtežba zaradi napetosti tal zmanjšanih za vpliv lastne teže temelja, ki ima prijemališče znotraj kontrolnega obsega:

Centrično obremenjeni temelji stebrov:

Če velja
$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,red}}{u \cdot d} \leq v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \cdot 2d / a \geq v_{min} \cdot 2d / a$$

→ **strižna armatura proti preboju ni potrebna**



Prebojna strižna odpornost plošč in temeljev stebrov s strižno armaturo

$v_{Ed} \geq v_{Rd,c}$ → potrebna strižna armatura: pogoj $v_{Ed} \leq v_{Rd,cs}$ → A_{sw} ,

$$v_{Rd,cs} = 0,75v_{Rd,c} + 1,5\left(d/s_r\right)A_{sw}f_{ywd,ef}\left(1/(u_1d)\right)\sin\alpha$$

Upoštevamo $v_{Ed} = v_{Rd,cs}$ in dobimo:

$$A_{sw} = \frac{(v_{Ed} - 0,75v_{Rd,c})u_1d}{1,5\left(d/s_r\right)f_{ywd,ef}\sin\alpha}.$$

kjer so:

A_{sw} ploščina prečnega prereza strižne armature v enem obsegu okoli stebra [mm^2],

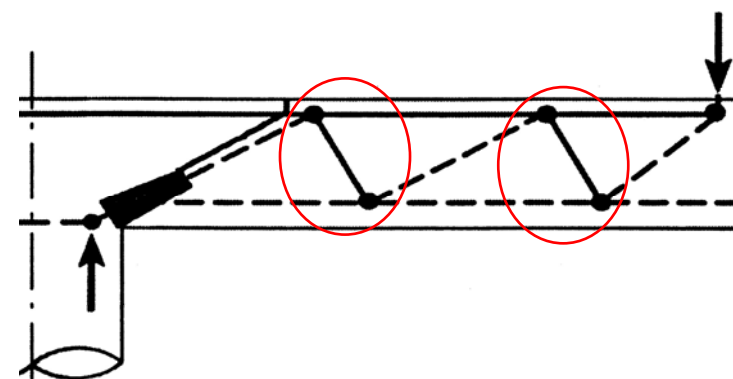
s_r radialna medsebojna oddaljenost obsegov strižne armature [mm],

$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 d \leq f_{ywd}$ [MPa] učinkovita projektna trdnost strižne armature proti preboju,

d srednja vrednost statičnih višin v med seboj pravokotnih smereh y in z [mm],

α pa kot med strižno armaturo proti preboju in ravnino plošče.

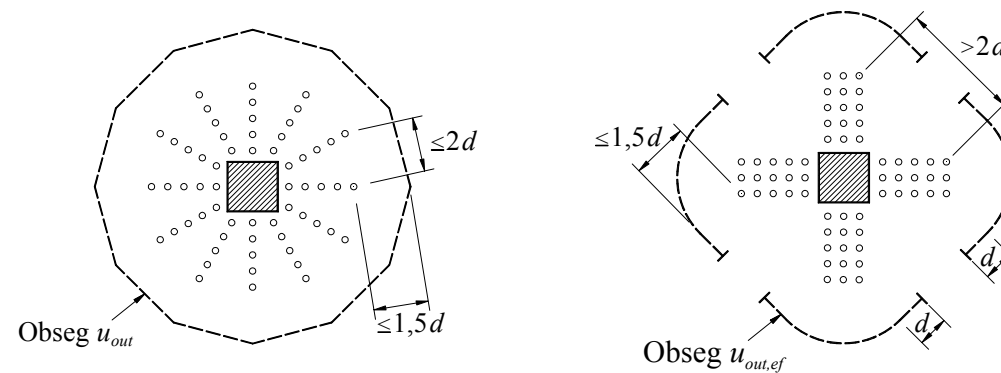
Pozor: $v_{Rd,c}$ v izrazu za račun armature!



Dodatni **kontrolni obseg pri katerem strižna armatura ni potrebna**, u_{out} (ali $u_{out,ef}$):

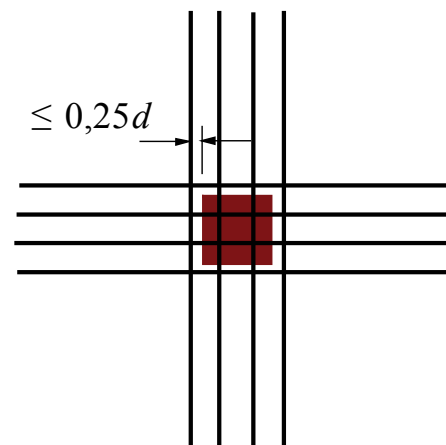
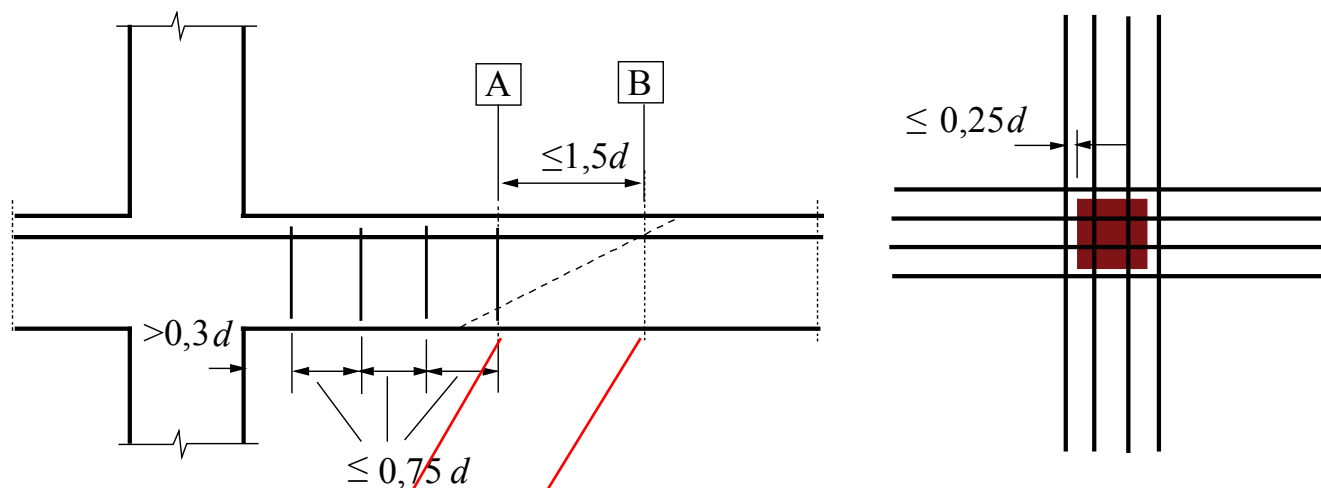
$$v_{Ed}(u_{out}) = v_{Rd,c} \rightarrow \boxed{u_{out} = \beta V_{Ed} / (v_{Rd,c} d)}$$

Najbolj zunanjo vrsto strižne armature je treba namestiti znotraj obsega u_{out} ali $u_{out,ef}$ tako, da njena oddaljenost od tega obsega **ne presega vrednosti $1,5d$** .



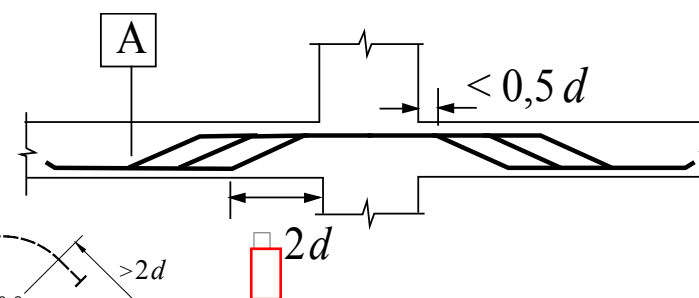
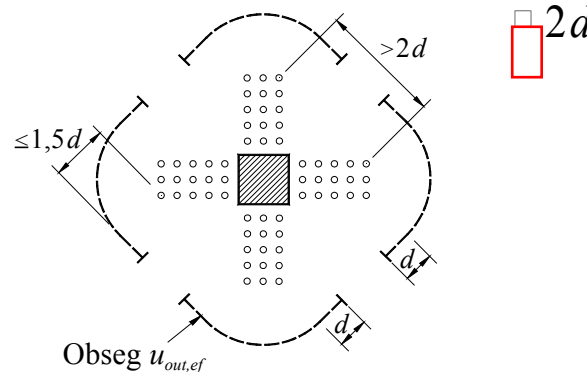
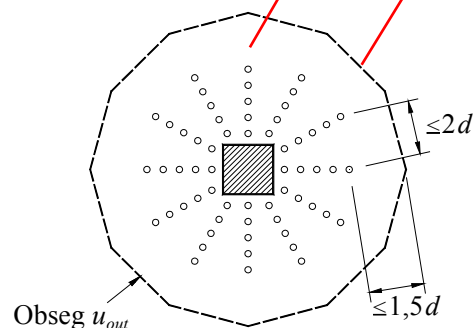
Dodatni kontrolni obsegi pri notranjih stebrih

Detajliranje oziroma konstruiranje strižne armature pri preboju gladkih plošč na stebrih: točka 9.4.3 standarda SIST EN 1992-1-1.



A zunanji kontrolni obseg, ki še zahteva strižno armaturo

B prvi zunanji kontrolni obseg, ki ne zahteva armature



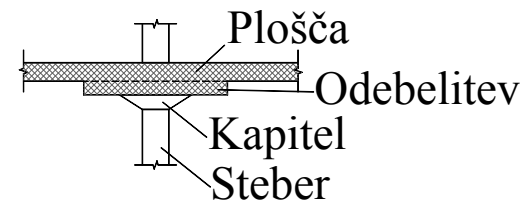
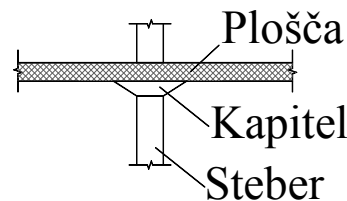
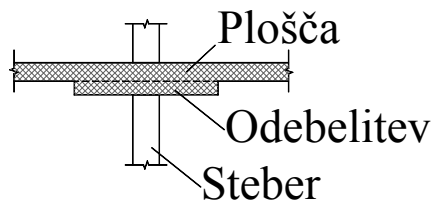
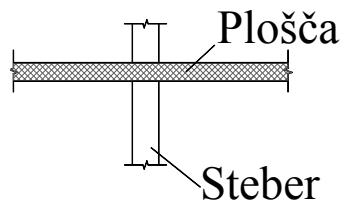
Povečanje odpornosti plošč proti preboju

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd, \max} = 0,5 v f_{cd}$$

ni izpolnjen ali dobimo preveliko armaturo:

→ **Ukrepi za povečanje odpornosti proti preboju:**

- **povečanje debeline plošče** po celi ploskvi ali **povečanje premera stebra**
- izvedejo se **skokovite odebelitve v območju nad stebri**. Te odebelitve so tlorisno krožne ali pravokotne (običajno kar kvadratne) oblike in pri tem oblika odebelitev ni nujno vezana na obliko prečnega prereza stebra.
- Izvedemo lahko tudi povečanje dimenzij stebra v bližini vozlišča s stropom, v tem primeru govorimo o **kapitelih stebra**. Pri stebrih krožnega prereza so kapiteli prisekani stožci, v primeru pravokotnih stebrov pa prisekane piramide.
- Pri najbolj obremenjenih stropovih je možna tudi **kombinacija odebelitve plošče in izvedba kapitelov stebrov**



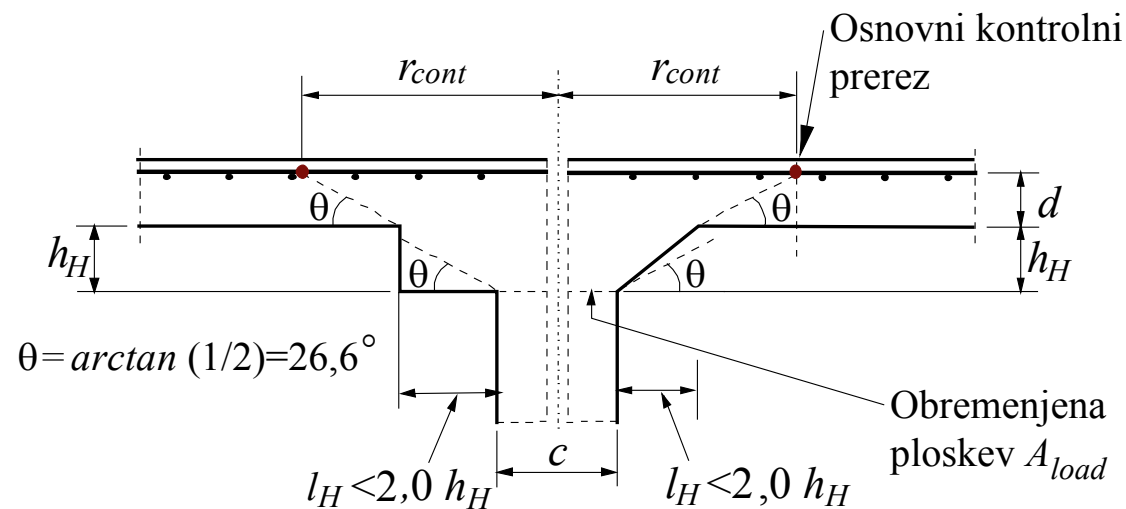
Pri pravokotnem stebru s pravokotnim kapitelom z $l_H < 2h_H$:

celotnima dimenzijama l_1 in l_2 : $l_1 = c_1 + 2l_{H1}$, $l_2 = c_2 + 2l_{H2}$

→ polmer kontrolnega obsega r_{cont} manjša izmed vrednosti po izrazih:

$$r_{cont} = 2d + 0,56\sqrt{l_1 \cdot l_2},$$

$$r_{cont} = 2d + 0,69l_1.$$



Plošča s kapitelom stebra ($l_H < 2h_H$)

Plošče **z razširjenimi kapiteli stebrov** pri katerih je $l_H > 2h_H$

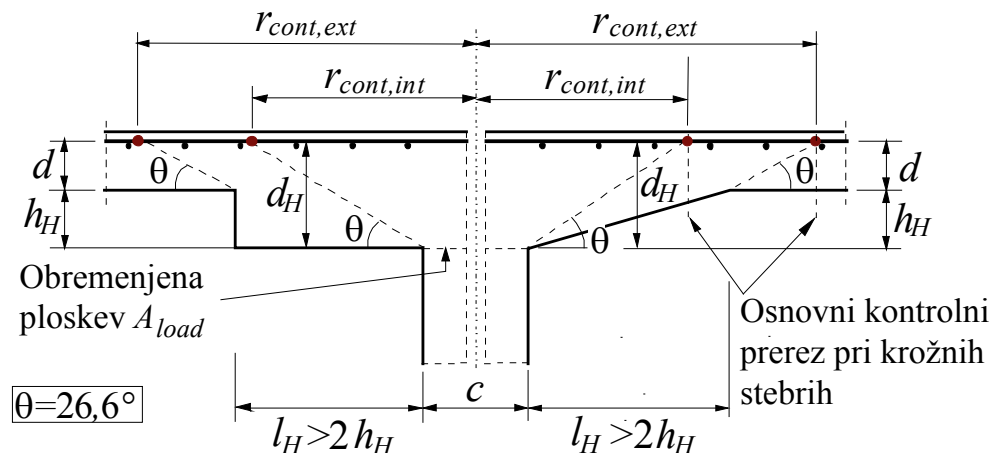
→ potrebno preveriti **kontrolne prereze znotraj kapitela in kontrolne prereze v plošči**.

Pri ploščah na okroglih stebrih s krožnimi kapiteli:

$$r_{cont,ext} = 2d + l_H + 0,5c$$

$$r_{cont,int} = 2(d + h_H) + 0,5c$$

l_H oddaljenost roba kapitela od roba stebra, h_H debelina kapitela, c premer okroglega stebra.

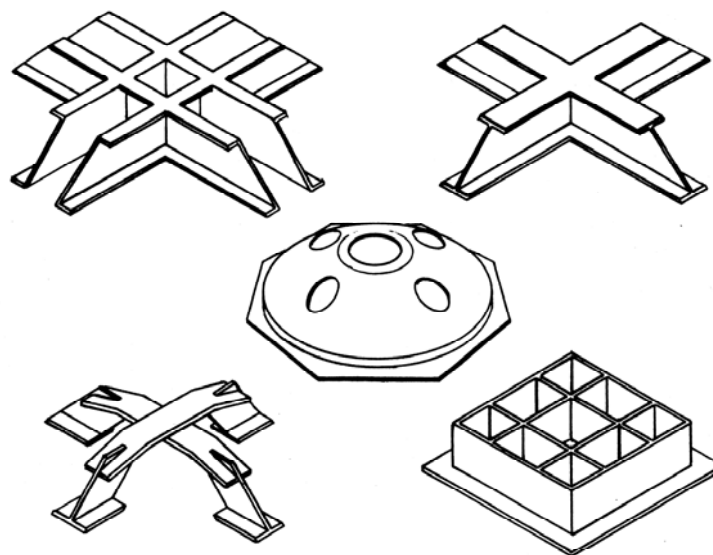


Plošča z odebelitvijo ali razširjenim kapitelom stebra ($l_H > 2h_H$)

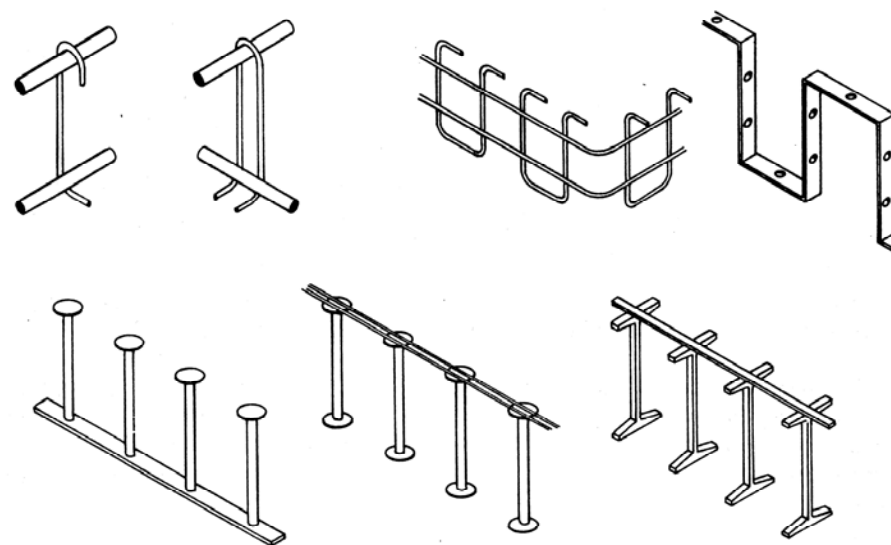
Za kontrole v **notranjem kontrolnem obsegu** se v računih za d vzame vrednost d_H .

Posebno obremenjene plošče:

Del klasične strižne armature nadomestijo → patentirane **kovinske glave** ali patentirani **sistemi strižne armature**.

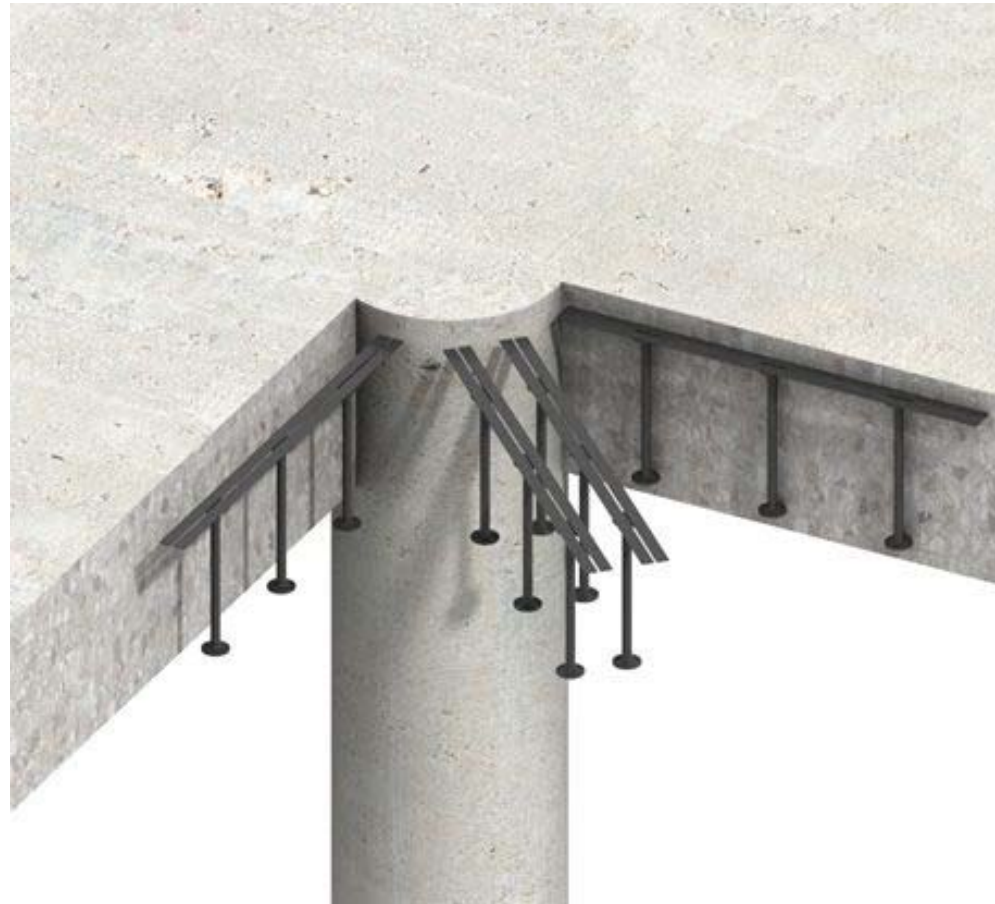


kovinske glave



patentirana strižna armatura

Dimenzioniranje se izvaja po navodilih proizvajalcev.



Računski primer: *Dimenzioniranje gladke plošče na stebrih proti preboju*

Gladka stropna plošča debeline 25 cm na stebrih dimenzij $b_s/h_s=30/60$ cm.

Kontrola nevarnosti preboja pri notranjem stebri.

Projektna obremenitev: $V_{Ed} = 620$ kN

Beton C25/30: $f_{ck} = 2,5$ kN/cm² $\rightarrow f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C = 1,0 \cdot 2,5 / 1,5 = 1,67$ kN/cm²

Armatura S500: $f_{yk} = 50$ kN/cm² $\rightarrow f_{yd} = f_{yk} / \gamma_S = 50,0 / 1,15 = 43,5$ kN/cm²

Statični višini: $d_y = 23$ cm

$$d_z = 22 \text{ cm} \rightarrow d_{eff} = (d_y + d_z) / 2 = (22 + 23) / 2 = 22,5 \text{ cm}$$

Koeficienta armiranja z glavno natezno armaturo **v območju širine stebra v posamezni smeri in po 3d na vsako stran znašata:**

$$\rho_{ly} = 0,6 \% = 0,006 \text{ in}$$

$$\rho_{lz} = 0,8 \% = 0,008.$$

Osnovni kontrolni obseg:

$$2 \cdot d = 2 \cdot 22,5 = 45 \text{ cm}$$

$$u_l = 2 \cdot (b_s + h_s) + 2\pi \cdot (2d) = 2 \cdot (30 + 60) + 2 \cdot \pi \cdot (45) = 462,6 \text{ cm}$$

Obseg ob obodu stebra:

$$u_0 = 2 \cdot (b_s + h_s) = 2 \cdot (30 + 60) = 180 \text{ cm}$$

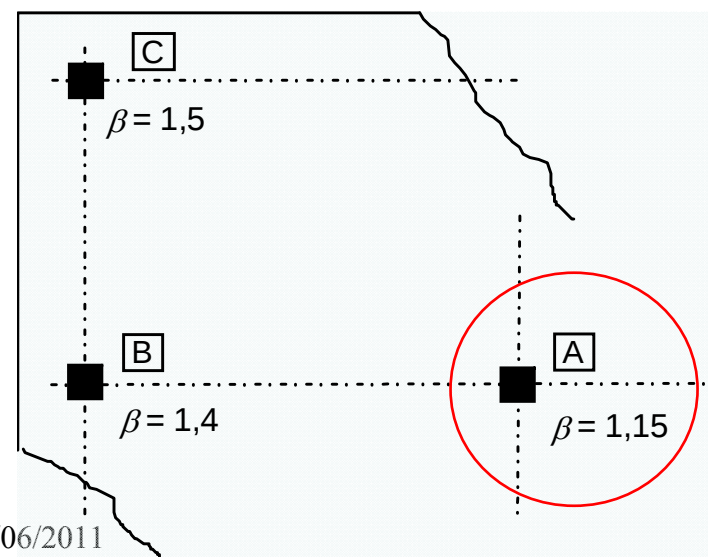
Projektna strižna napetost:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_1 d} = 1,15 \frac{620}{462,6 \cdot 22,5} = 0,0682 \text{ kN/cm}^2$$

Koeficient β zajame vpliv ekscentrične obremenitve plošče zaradi momentov, ki se preko stebrov prenesejo v ploščo (glej 6.4.3 (3) SIST EN 1992-1-1).

Za konstrukcije, pri katerih horizontalna **stabilnost ni odvisna le od delovanja okvirja iz stebrov in plošč** in se dolžine sosednjih razponov ne razlikujejo za več kot 25 %, se lahko za koeficient β uporabijo približne vrednosti, podane na sliki **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti..**

→ $\beta = 1,15$ (za notranje stebre).



Ali je strižna armatura potrebna:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp})$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{225}} = 1,94 \leq 2$$

$$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_C = 0,18 / 1,5 = 0,12$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} = \sqrt{0,006 \cdot 0,008} = 0,007 \leq 0,02$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 1,94^{3/2} \cdot 25^{1/2} = 0,47 \text{ MPa} = 0,047 \text{ kN/cm}^2$$

$$v_{Rd,c} = 0,12 \cdot 1,94 (100 \cdot 0,007 \cdot 25)^{1/3} + 0 = 0,604 \text{ MPa} = 0,0604 \text{ kN/cm}^2 < v_{Ed} = 0,0682 \text{ kN/cm}^2$$

→ Strižna armatura je potrebna!

Odpornost glede tlačnih razpor – merodajen prerez ob stebru:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd, \max}$$

$$v_{Rd, \max} = 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} = 0,5 \cdot 0,54 \cdot 1,67 = 0,45 \text{ kN/cm}^2$$

$$v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \left[1 - \frac{25}{250} \right] = 0,54$$

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} = \frac{1,15 \cdot 620}{180 \cdot 22,5} = 0,18 \text{ kN/cm}^2 \leq v_{Rd, \max} = 0,45 \text{ kN/cm}^2 \rightarrow \text{Pogoj je izpolnjen!}$$

Potrebna strižna armatura:

Izberemo poševne palice $\alpha = 45^\circ \rightarrow \sin \alpha = 0,707$.

Odpornost strižno armiranih plošč je določena z izrazom

$$v_{Rd,cs} = 0,75v_{Rd,c} + 1,5(d/s_r)A_{sw}f_{ywd,ef}(1/(u_1d))\sin \alpha = v_{Ed} \rightarrow A_{sw},$$

A_{sw} ploščina prečnega prereza enega obsega strižne armature okoli stebra [mm²],

s_r radialna razdalja med obsegi strižne armature [mm],

$f_{ywd,ef}$ učinkovita projektna trdnost strižne armature proti preboju:

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd} \text{ [MPa]} \rightarrow f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 \cdot 225 = 306 \text{ MPa},$$

d srednja vrednost statičnih višin v medsebojno pravokotnih smereh [mm],

α kot med strižno armaturo proti preboju in med ravnino plošče.

Če so navzdol **ukrivljene palice predvidene v eni sami vrsti**, se za razmerje d/s_r lahko vzame vrednost **0,67**.

Preverimo, če zadošča ena vrsta palic $\rightarrow$ upoštevamo razmerje $d/s_r = 0,67$:

$$A_{sw} = \frac{(v_{Ed} - 0,75v_{Rd,c})u_1d}{1,5(d/s_r)f_{ywd,ef}\sin \alpha} = \frac{(0,682 - 0,75 \cdot 0,604)4626 \cdot 225}{1,5 \cdot 0,67 \cdot 306 \cdot 0,707} = 1096 \text{ mm}^2 = 10,96 \text{ cm}^2$$

$\rightarrow$ Izberemo npr. **12 ϕ 12 mm** (po 3 palice v obeh pravokotnih smereh)!

Hvala
za
pozornost!