

RakMK B4:n kohta 2.2.1.2 Poikkileikkauksen kapasiteetti

RakMK B4 1987  
painos (julkaisuvuosi)

Hakijan yhteystiedot

Oy Partek Betoniteollisuus Ab  
DI Pekka Häyrinen  
Sörnäisten rantatie 23 00500 HELSINKI  
Puh. 90-39441, telefax 90-394 4222

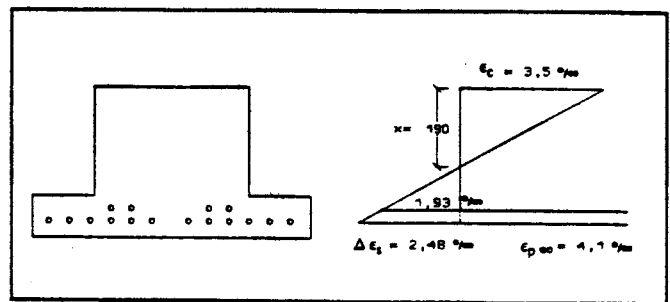
Hakijan allekirjoitus

*P. Heij*

Lyhyt selostus menetelmästä, käyttöalue ja mahdollinen kuva

Tulkitaan normien kohtaa 2.2.1.2 siten, että sallitaan jännebetonipoikkileikkauksen yliraudoittaminen eli poikkileikkaukseen saa sijoittaa veto-raudoitusta enemmän kuin tasapainoraudotus pelkässä taivutuksessa edellyttäen, että yliraudotettu rakenne suunnitellaan liitteenä olevan ohjeen mukaisesti:

- Betonin ja jännerästen jännitys määritetään ko. materiaalien jännitys-muodonmuutoskuvien perusteella
- Betonin puristuma ei ylitä normien kohdan 2.2.1.2 mukaisia arvoja
- Puristusvyöhykkeen leikkausrasitus otetaan huomioon pienentämällä puristusvyöhykkeen toimivaa puristuslujuutta



### Menetelmän rajoitukset

Matalissa jännebetonipalkeissa tulee yliraudotusraja vastaan jo melko pienellä teräsmäärällä, jolloin taivutuskapasiteetti jää myös pieneksi. Esitetyn ohjeen mukaan laskien poikkileikkauksessa voidaan käyttää suurempaa teräsmäärää, jolloin taivutuskapasiteettikin kasvaa.

Betoniyhdistyksen toimikunta on käynyt läpi ehdotuksen ja todennut sen täyttävän RakMK:n betonirakenteita koskevien määräysten vaatimukset. Kortiston käyttäjällä on vastuu kortiston ohjeiden käytöstä sekä siitä että RakMK:n betonirakenteita koskevia määräyksiä noudatetaan.

Tämä ohje on voimassa yhtä kauan kuin ylläoleva Rakennusmääräyskokoelman B4:n asianomainen kohta. Tämä ohje voidaan peruuttaa Suomen Betoniyhdistys - Finska Betongföreningen r.y.:n harkinnan perusteella.

Helsingissä syys kuun 17 pnä 19 90

SUOMEN BETONIYHDISTYS - FINSKA BETONGFÖRENINGEN r.y.

*Pentti Kaista*  
Pentti Kaista

*Klaus Söderlund*  
Klaus Söderlund



LIITE.

## YLIRAUDOITETUN JÄNNEBETONI POIKKILEIKKAUKSEN MITOITUSOHJE

### 1. OHJEEN SOVELLUSALUE

Ohje koskee yliraudoitettujen jännebetonipoikkileikkausten mitoittamista taivutukselle. Ohje koskee betonirakenteita, joiden nimellislujuus on korkeintaan K 100. Nimellislujuuden ollessa korkeintaan K 60 sovelletaan betoninormeja ja lujuuden ollessa välillä K 70...K 100 ko. lujuusaluetta käsittelevää normien lisäohjetta.

### 2. OHJEIDEN PERUSTA

Yliraudoitettujen jännebetonipoikkileikkauksen mitoitusohje perustuu Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen Betoni- ja silikaattitekniikan laboratorion lausuntoon n:o BET 81452 koskien teräs- ja jännebetonipoikkileikkauksen raudoitusmäärän ylärajaa.

### 3. YLIRAUDOITUS

Poikkileikkaus katsotaan yliraudoitetuksi, kun teräsmäärä on niin suuri, että teräksen muodonmuutos ei ylitä ko. materiaalin myötövenymää. Tasapainomurtotilaa, jossa teräsvenymä on teräksen myötövenymän suuruinen, vastaava raudoitus on tasapainoraudoitus. Kun teräsmäärä ylittää tasapainoraudoitusta vastaavan määrän, teräs ei myötää ja teräsvenymä on pienempi kuin  $\epsilon_{pyk}$  ja teräsjännitys  $\sigma_p < f_{pyk}$ .

Jännitetystä poikkileikkauksessa tasapainotilaa vastaava mekaaninen raudoitusaste määritetään kuormituksesta aiheutuvan teräksen venymän  $\epsilon_{pyk} - \epsilon_p$  perusteella, kun teräksen kokonaisvenymä on 0,2-rajaa vastaava venymä  $\epsilon_{pyk}$  ja esijännitystä vastaava venymä  $\sigma_p$ . Jännitetyn poikkileikkauksen tasapainoraudoitusta vastaava mekaaninen raudoitusaste

$$\omega_b = k \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{pyk} - \epsilon_{p\infty}} \quad (1)$$

missä  $\epsilon_{p\infty}$  on esijännitystä vastaava jänneteräksen venymä,  
 $\epsilon_{pyk}$  on jänneteräksen 0,2-rajaa vastaava kokonaisvenymä,  
 $\epsilon_{cu}$  on betonin murtopuristuma,  
 $k$  on betonin murtopuristumaa vastaava puristuvyöhykkeen kerroin  
 = betonin puristusresultantti  $N_c/(bdf_{cd})$

Kun esijännitysvoima tulkitaan ulkoiseksi normaalivoimaksi, jota ei oteta huomioon pelkkää taivutusta vastaavan tasapainoraidoitusmäärän laskemisessa, on jännitetyn poikkileikkauksen "pelkkää taivutusta vastaavan tasapainotilan" mukainen mekaaninen raidoitusaste

$$\omega_{bb} = k \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{pyk} - \epsilon_{p\infty}} * \frac{f_{pyd}}{f_{pyd} - \gamma \sigma_{p\infty}} \leq k \frac{f_{pyd}}{\sigma_{p\infty}}, \quad (2)$$

missä  $f_{pyd}$  on teräksen myötöraja tai 0,2-raja,  
 $\sigma_{p\infty}$  on esijännitys,  
 $\epsilon_{p\infty}$  on esijännitystä vastaava jänneteräksen venymä,  
 $\epsilon_{pyk}$  on jänneteräksen 0,2-rajaa vastaava kokonaisvenymä,  
 $\epsilon_{cu}$  on betonin murtopuristuma,  
 $k$  on betonin murtopuristumaa vastaava puristuvyöhykkeen kerroin  
 = betonin puristusresultantti  $N_c/(bdf_{cd})$  ja  
 $\gamma$  on jännevoiman varmuuskerroin (=0,9)

Kaavan (2) 1. termi vastaa jännitetyn poikkileikkauksen todellisen tasapainotilan, esijännitysvoima mukaanlukien, mukaista mekaanista tasapainoraidoitusastetta. Jälkimmäinen termi ottaa huomioon sen, että osa teräksen myötövenymästä aiheutuu esijännitysvoimasta. Kaavan (2) yläraja  $\omega_{bb} \leq k f_{pyd}/\sigma_{p\infty}$  vastaa tilannetta, jossa neutraaliakseli on jänneterästen kohdalla, jolloin jänneterästen lisävenymä ulkoisesta kuormasta on nolla ja koko poikkileikkaus on puristettu.

Tämän ohjeen mukaan laskettaessa voidaan jännitettyssä rakenteessa käyttää suurempaa teräsmäärää kuin kaavan (1) mukainen tasapainoraidoitus. On kuitenkin huomattava, että kun teräsmäärä ylittää kaavan (1) mukaisen tasapainoraidoitusmäärän, ei teräs enää myötää. Poikkileikkaus on tällöin yliaudoitettu. Kaavan (2) mukaan laskettu teräsmäärän yläraja on n. 1,5...3-kertainen tasapainoraidoitusmäärään nähden.

Jännitetyn poikkileikkauksen teräsmäärän yläraja taivutuskestävyyttä laskettaessa on kaavan (2) mukaan laskettu teräsmäärä.

#### 4. VOIMASUUREIDEN LASKENTA

Yliraudoitetuilla staattisesti määräämättömillä rakenteilla voimasuureiden jakautuma lasketaan yleensä kimmoteorian perusteella, koska suurilla rauditusmäärillä rakenteisiin ei synny plastisia mekanismeja ja momenttien tasoittuminen on vähäistä. Yliraudoitetuissakin rakenteissa tukimomenteja voidaan muuntaa betoninormien kaavan (2.22) mukaisesti. Yliraudoitetuissa poikkileikkauksissa puristusvyöhykkeen korkeus  $x$  murtotilassa on suhteessa teholliseen korkeuteen  $d$  on yleensä sen verran suuri, että käytettäessä betoninormien kaavaa (2.22) ei tukimomenttia voida käytännössä muuntaa kuin korkeintaan muutamia prosentteja.

#### 5. YLIRAUDOITETUN POIKKILEIKKAUKSEN KAPASITEETTI

Yliraudoitettun poikkileikkauksen kapasiteetti lasketaan seuraavien oletusten perusteella:

- Poikkileikkaukset pysyvät tasoina muodonmuutosten tapahtuessa
- Jänneteräksen ja betonin jännitys-muodonmuutoskuviot ovat normien kohtien 2.1.6.3 (jänneteräs) ja 2.1.6.2 (betoni, lujuus korkeintaan K 60) sekä normien lisäohjeen kohdan 2.1.5.2 mukaiset.
- Betonin vetolujuutta ei oteta huomioon poikkileikkauksen voimasuureita laskettaessa.
- Betonin puristuma poikkileikkauksen painopisteessä ja reunalla eivät saa ylittää normien kohdassa 2.2.1.2 sekä normien lisä-ohjeessa kohdassa 2.1.5.2 esitettyjä arvoja.
- Raudituksen puristumalle käytetään betonin puristuman arvoa ko. kohdassa.
- Raudituksen jännitys ja vetovoima lasketaan teräksen jännitys-muodonmuutoskäyrästä terästen kohdalla olevan muodonmuutoksen perusteella.
- Betonin puristusjännitysten jakautuma ja betonin puristusresultantti lasketaan betonin lujuuden ollessa korkeintaan K 60 jännitys-venymäriippuvuuden

$$\sigma_c = f_{cd} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cy}} e^{(1 - \epsilon_c / \epsilon_{cy})} \quad (3)$$

perusteella.

Betonin lujuuden ollessa K 70...K 100 käytetään ko. lujuusaluetta koskevan normien lisäohjeiden mukaista betonin jännitys-muodonmuutosriippuvuutta.

- Kun puristusvyöhykkeen leikkausrasitus ylittää arvon

$$V_{d,c} = 0,25 b'd f_{ctd} \quad (4)$$

pienennetään betonin puristusvyöhykkeen toimivaa puristuslujuutta arvoon

$$f_{cd}' = \frac{f_{cd}}{6\sqrt{1 + 3\alpha_v^2} - 5} \quad (5)$$

missä  $\alpha_v = V_{d,c}/F_{d,c}$ ,

$F_{d,c}$  = puristusvyöhykettä rasittava normaalivoima

$b'$  = puristusvyöhykkeen keskimääräinen leveys

$f_{cd}'$  = betonin tehollinen puristuslujuuden laskenta-arvo puristusjännityksen ja leikkausjännityksen vaikuttaessa samanaikaisesti

Kaavan (5) mukaan laskettu puristuslujuus  $f_{cd}'$  ei tule määrääväksi, kun palkin kuormituksena on tasainen kuorma. Jos palkkia rasittaa suuri pistekuorma tai kyseessä on jatkuva palkki, on suurin momentti ja suurin leikkausvoima samassa poikkileikkauksessa.

Kun poikkileikkauksen taivutuskapasiteetti on murtotilassa täysin käytetty hyväksi, on toimiva puristuslujuus pistekuormalla

$$f_{cd}' = f_{cd}/(6\sqrt{1 + 12*(z/L)^2} - 5) \quad (6)$$

Jatkuvan palkin välituella ilman tukimomentin muuntamista, on toimiva puristuslujuus

$$f_{cd}' = f_{cd}/(6\sqrt{1 + 75*(z/L)^2} - 5) \quad (7)$$

Kaavoissa (6) ja (7) on

$z$  = poikkileikkauksen sisäinen momenttivarso =  $d-0,4*x$

$L$  = palkin jänneväli

## 6. MITOITUSKÄYRÄSTÖ

Jännitetyn poikkileikkauksen taivutuskapasiteettia vastaava teräsmäärä voidaan määrittää oheisen käyrästön avulla. Käyrästössä on

- vaaka-akselilla mekaaninen raudoitussuhde  $\omega = A_p f_{pyd} / (bd f_{cd})$  ja
- pystyakselilla suhteellinen taivutuskapasiteetti  $m = M_u / (bd^2 f_{cd})$ .

Laskettaessa arvoja  $w$  ja  $m$  käytetään betonin puristuslujuutena  $f_{cd}$  tarvittaessa kaavan (5) mukaista alennettua puristuslujuutta.

Kapasiteetikäyrät on esitetty teräksen jännitysasteille  $\sigma_{p\infty} / f_{pyd} = 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9$ .

Eri jännitysasteita vastaavat kaavan (1) mekaaniset raudoitussuhteet tasapainoraudoituksella on esitetty seuraavassa taulukossa. Taulukossa on esitetty myös kaavan (2) mukaista maksimiraudoitustaseta ja sitä vastaava suhteellinen taivutuskapasiteetti.

Mitoituskäyrästö ja taulukko on laadittu jänneteräkselle St 1570/1770 ja betonille, jonka kuutiolujuus  $\leq K 60$ .

$\sigma_{p\infty} / f_{pyd}$	$\omega_b$	$m_b$	$\omega_{bb}$	$m_{bb}$
0,5	0,281	0,239	0,511	0,345
0,6	0,302	0,253	0,657	0,387
0,7	0,327	0,270	0,882	0,435
0,8	0,355	0,288	1,000	0,460
0,9	0,390	0,309	0,896	0,460

### ESIMERKKI MITOITUSKÄYRÄSTÖN KÄYTÖSTÄ

Poikkileikkaus ja raudoitus, katso liitteenä oleva mitoitus esimerkki.

Betoni K 60 -1  $f_{cd} = 31,1$  MPa

Teräs St 1570/1770  $f_{pyd} = 1365$  MPa

Puristuspuunnan leveys  $b = 380$  mm

#### 1. Teräsmäärä tunnetaan

16  $\phi$  12,5 punosta  $A_p = 16 \cdot 93 = 1488$  mm<sup>2</sup>.

Esijännitys häviöiden jälkeen  $\sigma_{p\infty} = 800$  MPa =  $0,59 \cdot f_{pyd}$ .

Tehollinen korkeus  $d = 317 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \omega &= A_p f_{pyd} / (bd f_{cd}) \\ &= 1488 \cdot 1365 / (380 \cdot 317 \cdot 31,1) = 0,542 > \omega_b \end{aligned}$$

Käyrästöstä saadaan suhteelliseksi momentiksi  $m = 0,36$ .

$$\begin{aligned} \text{Poikkileikkauksen taivutuskapasiteetti on } M_u &= m bd^2 f_{cd} \\ &= 0,36 \cdot 380 \cdot 317^2 \cdot 31,1 \cdot 10^{-6} = 427 \text{ kNm} \end{aligned}$$

## 2. Vaadittava taivutuskapasiteetti tunnetaan

Taivutusmomentin laskenta-arvo  $M_d = 427 \text{ kNm}$

Taivutusmomenttia vastaava suhteellinen momentti

$$m = M_d / (bd^2 f_{cd}) = 427 \cdot 10^{-6} / (380 \cdot 317^2 \cdot 31,1) = 0,36$$

Käyrästöstä saadaan jännitysasteen 0,59 kohdalta mekaaniseksi raudoitusasteeksi

$$\omega = 0,54$$

$$\begin{aligned} \text{Tarvittava teräsmäärä } A_p &= \omega (f_{cd} / f_{pyd}) bd \\ &= 0,54 \cdot (31,1 / 1365) \cdot 380 \cdot 317 = 1480 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

$$\text{Valitaan raudoitukseksi } 16 \phi 12,5 \quad A_p = 16 \cdot 93 = 1488 \text{ mm}^2.$$

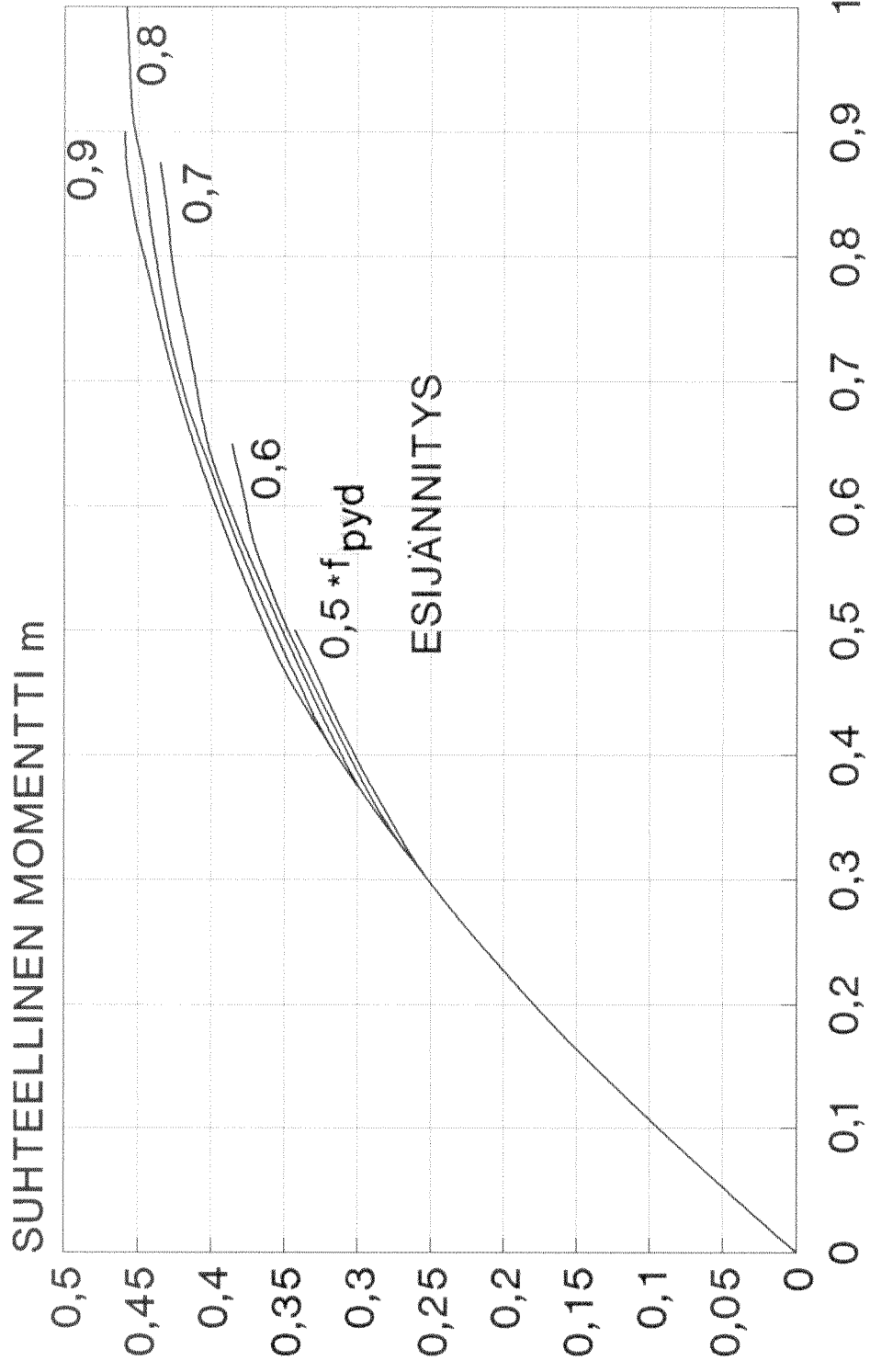
Liitteet:

- Mitoituskäyrästö
- Esimerkki



# SUHTELLINEN MOMENTTIKAPASITEETTI

$$m = M_u / (b d^2 f_{cd})$$

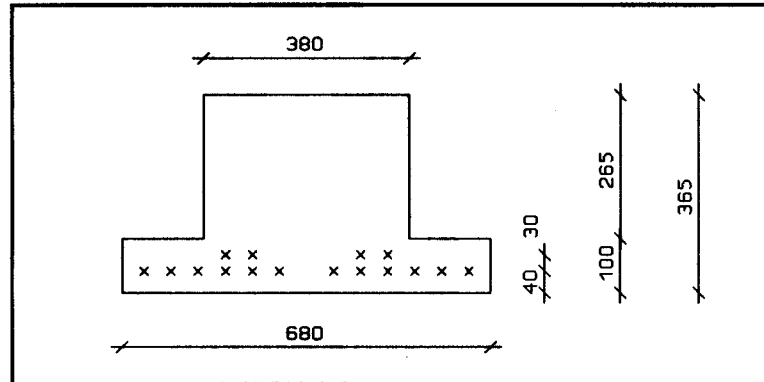


$$\text{MEK. RAUDOITUSASTE } \omega = A_p * f_{pyd} / (b d f_{cd})$$

Oy Partek Betoniteollisuus Ab  
Pekka Häyrinen

31.8.1990

## YLIRAUDOITETTU JÄNNEBETONIPALKKI ESIMERKKI



### 1. MATERIAALIT

BETONI K 60 -1

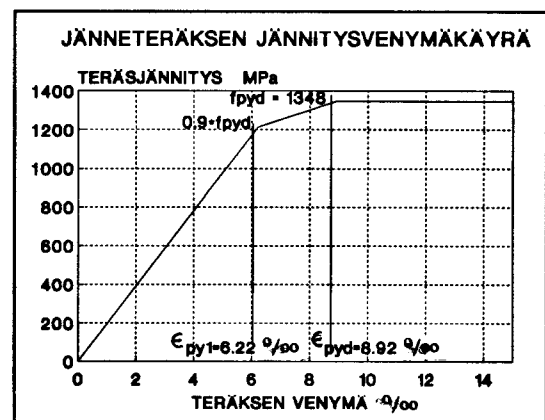
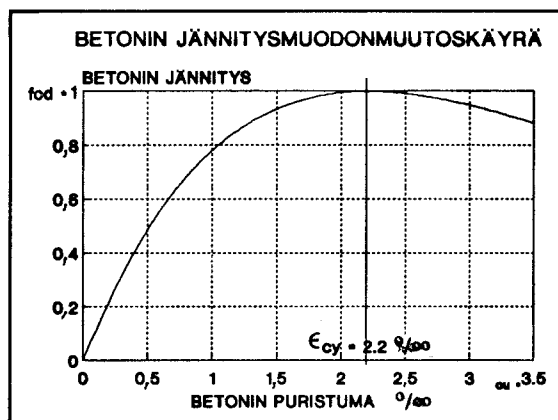
Puristuslujuuden laskenta-arvo  $f_{cd} = 31,1$  MPa

Vetolujuuden laskenta-arvo  $f_{ctd} = 2,27$  MPa

Myötöpuristuma  $\epsilon_{cy} = 2,2$  ‰

Murtopuristuma  $\epsilon_{cu} = 3,5$  ‰

Betonin jännitysvenymäkäyrä:  $\sigma_c = f_{cd} \epsilon_c / \epsilon_{cy} e^{(1 - \epsilon_c / \epsilon_{cy})}$



JÄNNETERÄS St 1550/1750

Lasketaluojaus  $f_{pyd} = 1348$  MPa

Venymäkäyrän 1. taitepiste  $\epsilon_{py1} = 6,22$  ‰

Myötövenymä  $\epsilon_{pyd} = 8,92$  ‰

0,2-raja  $\epsilon_{pyk} = 9,95$  ‰

Esijännitys  $t = \infty$   $\sigma_{p\infty} = 800$  MPa

Esijännitystä vast. venymä  $\epsilon_{p\infty} = 4,1 \text{ ‰}$

## 2. BETONIN PURISTUSRESULTANTTI

Käytettäessä betonille jännitysmuodonmuutoskäyrää

$$\sigma_c = f_{cd} \epsilon_c / \epsilon_{cy} e^{(1 - \epsilon_c / \epsilon_{cy})}$$

on puristusresultantti

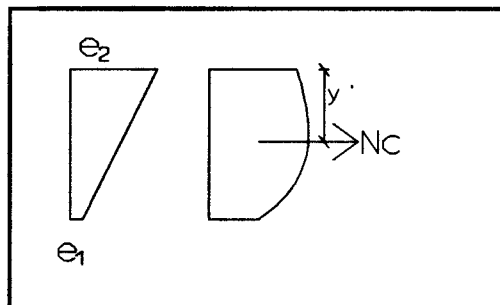
$$N_c = f_{cd} b x / (\epsilon_2 - \epsilon_1) / (\epsilon_c + \epsilon_{cy}) e^{(1 - \epsilon_c / \epsilon_{cy})}$$

ja puristusresultantin aiheuttama momentti neutraaliakselin suhteen

$$M_c = f_{cd} b x^2 / \left[ \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} (\epsilon_1 - 2 \epsilon_{cy}) (\epsilon_2 + \epsilon_{cy}) - \epsilon_c^2 \right] e^{(1 - \epsilon_c / \epsilon_{cy})}$$

Puristusresultantin sijainti  $\epsilon_2$ :sta

$$y' = x - M_c / N_c$$



Yliraudoitettu suorakaidepoikkileikkauksessa on murtotilassa

$\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$  ja  $\epsilon_p < \epsilon_{py}$ , joten

$\epsilon_1 = 0$  ja  $\epsilon_2 = 3,5 \text{ ‰}$ .

Tällöin on

$$N_c = 0,807 f_{cd} b x$$

$$M_c = 0,460 f_{cd} b x^2$$

$$y' = 0,43 x.$$

## 3. JÄNNITETYN POIKKILEIKKAUKSEN TASAPAINORAUDOITUS

Tasapainorauδοitusta vastaava mekaaninen raudoitussuhde

$$\omega_b = k \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{pyk} - \epsilon_{p\infty}} = 0,8 \frac{3,5}{3,5 + 9,95 - 4,1} = 0,3$$

Tasapainoraudoitusta vastaava teräsmäärä

$$\underline{A}_{pb} = \omega_b f_{cd} b d / f_{pyd} = 0,3 * 31,1 * 380 * 325 / 1348 = \underline{855 \text{ mm}^2}$$

(teräkset yhdessä rivissä => tehollinen korkeus  $d = 325 \text{ mm}$ )

$$A_{pb} = 855 \text{ mm}^2 \Rightarrow 9 \phi 12,5$$

#### 4. TASAPAINORAUDOITUSTA VASTAAVA TAIVUTUSKAPASITEETTI

Terästen venymä on  $\epsilon_{pyk}$ , joten teräkset myötäävät:

Terästen vetoresultantti

$$\underline{N}_s = A_{pb} f_{pyd} = 855 * 1348 = 1153000 \text{ N} = \underline{1153 \text{ kN}}$$

Betonin puristusresultantti

$$N_c = 0,807 x b f_{cd} = N_s$$

$$\Rightarrow \text{Puristuspuinnan korkeus } \underline{x} = N_s / (0,807 b f_{cd})$$

$$= 1153000 / (0,807 * 380 * 31,1) = \underline{121 \text{ mm}}$$

Puristusresultantin sijainti ylhäältä

$$\underline{y}' = 0,43 * 121 = \underline{52 \text{ mm}}$$

Tarkistetaan teräsvenymä

$$d = 325 \text{ mm} \quad \underline{\Delta \epsilon}_s = \epsilon_{cu} (d-x) / x = 3,5 * (325-121) / 121 = 5,9 \text{ ‰}$$

$$\underline{\epsilon}_{p \text{ tot}} = \epsilon_s + \epsilon_{p\infty} = 5,9 + 4,1 = 10 \text{ ‰} > \epsilon_{pyd} = 8,92 \text{ ‰}$$

=> teräkset myötäävät.

#### TAIVUTUSKAPASITEETTI

$$\text{Momenttivarsi } \underline{z} = d - y' = 325 - 52 = \underline{273 \text{ mm}}$$

Taivutuskapasiteetti tasapainorauoituksella

$$\underline{M}_{ub} = N_s z = 1153 * 0,273 = \underline{315 \text{ kNm}}$$

#### 5. JÄNNITETYN POIKKILEIKKAUKSEN MAKSIMITERÄSMÄÄRÄ

Jännitetyn poikkileikkauksen maksimiteräsmäärä saadaan suunnitteluohjeen kaavasta (2):

$$\underline{\omega}_{\text{max}} = \omega_b * (f_{pyd} / (f_{pyd} - \sigma_{p\infty}))$$

$$= 0,3 * (1348 / (1348 - 0,9 * 800)) = \underline{0,644}$$

$$\underline{A}_{p \text{ max}} = \omega_{\text{max}} f_{cd} b d / f_{pyd} = 0,644 * 31,1 * 380 * 317 / 1348 = \underline{1789 \text{ mm}^2}$$

Teräkset 2:ssa rivissä => tehollinen korkeus  $d = 317 \text{ mm}$ .

Maksimiteräsmäärä on n. 2,1-kertainen tasapainoraudoitukseen verrattuna.

## 6. PALKIN RAUDOITUS

Valitaan palkin teräsmääräksi 16  $\phi$  12,5  $A_p = 1488 \text{ mm}^2$ .

Teräkset 2:ssa rivissä:

alimmassa rivissä 12 punosta  $c_1 = 40 \text{ mm}$  alhaalta

toisessa rivissä 4 punosta  $c_2 = 70 \text{ mm}$  alhaalta

Tehollinen korkeus  $\underline{d} = 365 - (12 \cdot 40 + 4 \cdot 70) / 16 = 365 - 48 = \underline{317 \text{ mm}}$ .

## 7. PALKIN KUORMITUKSENA TASAINEN KUORMA

### 7.1. MAKSIMIMOMENTIN KOHTA

Betonin toimivaa puristuslujuutta on pienennettävä, jos puristusvyöhykkeen leikkausrasitus

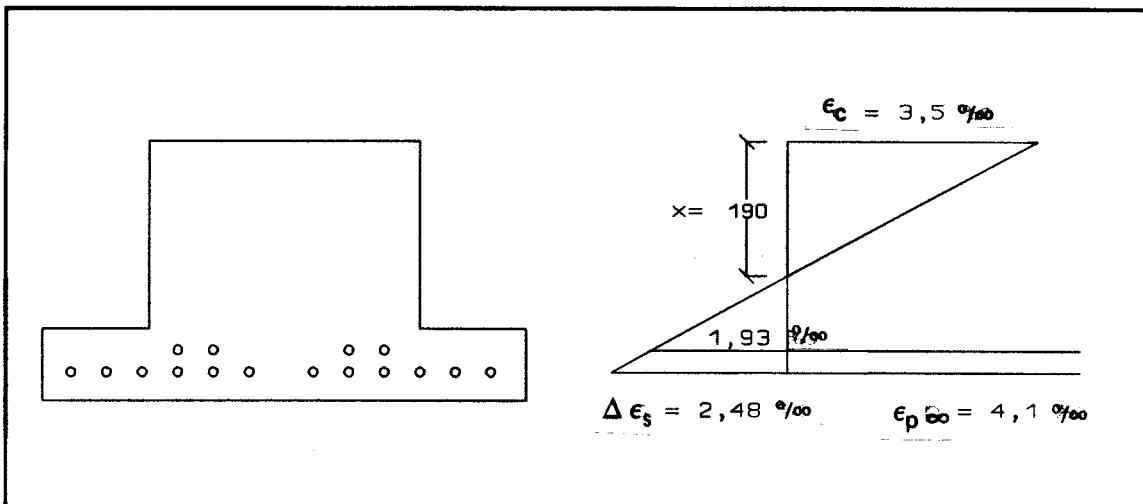
$$V_{d,c} \geq \underline{V}_{u,c} = 0,25 b'd f_{ctd} = 0,25 \cdot 0,38 \cdot 0,313 \cdot 2,27 \cdot 1000 = \underline{67,5 \text{ kN}}$$

Maksimimomentin kohdassa  $x = 0,5 L$ , on

$$V_d = 0 \Rightarrow V_{d,c} = 0 < \underline{V}_{u,c}$$

joten puristuslujuutta ei tarvitse pienentää  $\Rightarrow \underline{f_{cd}} = \underline{31,1 \text{ MPa}}$ .

### POIKKILEIKKAUKSEN TAIVUTUSKAPASITEETTI



Määritetään kokeilemalla neutraaliakselin paikka siten, että

$$N_c = 0,807 f_{cd} b x = \Sigma N_s$$

Teräsvenymä kuormituksesta

$$\epsilon_s = \epsilon_c * (d-x)/x = \epsilon_{cu} * (d-x)/x$$

Jänneteräksen kokonaisvenymä

$$\epsilon_{p \text{ tot}} = \epsilon_s + \epsilon_{p\infty}$$

Teräsjännitys teräksen jännitys-venymäkäyrän mukaan  $\sigma_s = f(\epsilon_{p \text{ tot}})$  :

$$\epsilon_{p \text{ tot}} \leq \epsilon_{py1} \quad : \quad \sigma_s = E_p \epsilon_{p \text{ tot}}$$

$$\epsilon_{py1} < \epsilon_{p \text{ tot}} < \epsilon_{pyd} \quad : \quad \sigma_s = f_{pyd} * [0,9 + 0,1 * (\frac{\epsilon_{p \text{ tot}} - \epsilon_{py1}}{\epsilon_{pyd} - \epsilon_{py1}})]$$

$$\epsilon_{p \text{ tot}} \geq \epsilon_{pyd} \quad : \quad \sigma_s = f_{pyd}$$

Terästen vetoresultantti  $N_s = \Sigma \sigma_s A_p$

Kokeillaan puristuspinnan korkeutta  $x = 190 \text{ mm}$ .

ALIN RIVI:  $d_1 = 365 - 40 = 325 \text{ mm}$

Teräsvenymä  $\underline{\Delta \epsilon_s} = 3,5 * (325 - 190) / 190 = \underline{2,48 \text{ ‰}}$

kokonaisvenymä  $\underline{\epsilon_{p \text{ tot}}} = 2,48 + 4,1 = \underline{6,58 \text{ ‰}}$

teräsjännitys  $\underline{\sigma_s} = 1348 * (0,9 + 0,1 * (6,58 - 6,22) / (8,92 - 6,22)) = \underline{1231,5 \text{ MPa}}$

terästen vetovoima  $12 \phi 12,5$

$$\Rightarrow \underline{N_{s1}} = 12 * 93 * 1231,5 * 10^{-3} = \underline{1374,4 \text{ kN}}$$

TOINEN RIVI:  $d_2 = 325 - 30 = 295 \text{ mm}$

Teräsvenymä  $\underline{\Delta \epsilon_s} = 3,5 * (295 - 190) / 190 = \underline{1,93 \text{ ‰}}$

kokonaisvenymä  $\underline{\epsilon_{p \text{ tot}}} = 1,93 + 4,1 = \underline{6,03 \text{ ‰}} < \epsilon_{py1}$

teräsjännitys  $\underline{\sigma_s} = 195 \text{ 000} * 6,03 * 10^{-3} = \underline{1176,7 \text{ MPa}}$

terästen vetovoima  $4 \phi 12,5$

$$\Rightarrow \underline{N_{s2}} = 4 * 93 * 1176,7 * 10^{-3} = \underline{437,7 \text{ kN}}$$

Terästen vetoresultantti

$$\underline{N}_s = N_{s2} + N_{s2} = 1374,4 + 437,7 \text{ kN} = \underline{1812 \text{ kN}}$$

Betonin puristusresultantti

$$\underline{N}_c = 0,807 b \times f_{cd} = 0,807 \cdot 190 \cdot 380 \cdot 31,1 \cdot 10^{-3} = \underline{1812 \text{ kN}}$$

=>  $N_s = N_c$  => x:n arvo on oikea

Betonin puristusresultantin sijainti ylhäältä

$$y' = 0,43 x = 0,43 \cdot 190 = \underline{82 \text{ mm.}}$$

Taivutuskapasiteetti

$$\begin{aligned} \underline{M}_u &= \sum N_{si} \cdot (d_i - y') = N_{s1} (d_1 - y') + N_{s2} (d_2 - y') \\ &= 1374,4 \cdot (0,325 - 0,082) + 437,7 \cdot (0,295 - 0,082) = \underline{428 \text{ kNm}} \end{aligned}$$

Taivutuskapasiteetti on n. 1,36-kertainen verrattuna tasapainoraidoitus vastaavaan kapasiteettiin, kun teräsmäärä on 1,75\* tasapainoraidoitus.

Jos palkin jänneväli  $L = 5 \text{ m}$ , voi palkin kuormitus olla

$$q_d = 8 M_u / L^2 = 8 \cdot 428 / 5^2 = \underline{137 \text{ kN/m}}$$

## 7.2. TAIVUTUSKESTÄVYYS KOHDASSA $X = L/3$

Jos maksimimomentin kohdalla on käytetty hyväksi koko taivutuskestävyys

$$M_u = 428 \text{ kNm} = M_d \text{ max, on}$$

$$q_d = 137 \text{ kN/m.}$$

Kohdassa  $x = L/3$  on

$$\text{taivutusmomentti } \underline{M}_d = 0,5 \cdot q_d L^2 x / L (1 - x/L) = 0,5 \cdot 137 \cdot 5^2 \cdot 0,33 \cdot (1 - 0,33) = \underline{380 \text{ kNm}}$$

$$\text{ja leikkausvoima } \underline{V}_d = 0,5 \cdot q_d L (1 - 2 \cdot x/L) = 0,5 \cdot 137 \cdot 5 \cdot (1 - 2 \cdot 0,33) = \underline{114 \text{ kN}}$$

Leikkauskestävyys, kun tarkasteltava poikkileikkaus on leikkausraudoittamaton

$$\begin{aligned} \underline{V}_{co} &= 0,3 k (1 + 50 \rho) b_w d f_{ctd} \\ &= 0,3 \cdot (1,6 - 0,307) \cdot (1 + 50 \cdot 0,0128) \cdot 380 \cdot 307 \cdot 2,27 \cdot 10^{-3} = \underline{168 \text{ kN}} \end{aligned}$$

$$(A_p = 1488 \text{ mm}^2 \Rightarrow \rho = A_p / (b d) = 1488 / (380 \cdot 307) = 0,0128)$$

$V_d < V_{co}$ , joten poikkileikkaus kestää leikkausraudoittamattomana. Tällöin koko leikkausvoima rasittaa puristusvyöhykettä, joten

$$V_{d,c} = V_d = 114 \text{ kN} > V_{u,c}$$

=> betonin puristuslujuutta on pienennettävä.

Oletetaan, että puristusvyöhykettä rasittava normaalivoima (= puristusvoima) on edellä saatu puristusresultantti  $N_c$ .

$$F_{d,c} = N_c = 1812 \text{ kN}$$

$$V_{d,c} = V_d = 114 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow \alpha_v = V_{d,c}/F_{d,c} = 114/1812 = \underline{0,063}$$

Redusoitu puristuslujuus

$$f_{cd}' = f_{cd}/(6 \sqrt{1 + 3 \alpha_v^2} - 5) = 31,1/(6 \sqrt{1 + 3 \cdot 0,063^2} - 5)$$

$$= 31,1/1,034 = \underline{30,0 \text{ MPa}}$$

Lasketaan neutraaliakselin paikka samalla tavalla kokeilemalla kuten edellä.

Kokeillaan  $x = 195 \text{ mm}$ :

			Alin rivi	Toinen rivi
tehollinen korkeus	$d$	mm	325	295
teräsvenymä	$\Delta \epsilon_s$	‰	2,33	1,79
kokonaisvenymä	$\epsilon_{p \text{ tot}}$	‰	6,43	5,89
teräsjännitys	$\sigma_s$	MPa	1223,7	1149,5
teräsmäärä	$A_p$	mm <sup>2</sup>	1116	372
terästen vetovoima	$N_{si}$	kN	1365,6	427,6

$$\text{Terästen vetovoima } N_s = 1365,6 + 427,6 = \underline{1793 \text{ kN}}$$

Betonin puristusresultantti

$$N_c = 0,807 \times b \times f_{cd}' = 0,807 \cdot 195 \cdot 380 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = \underline{1794 \text{ kN}}$$

$N_c = N_s$ , joten  $x$ :n arvo on oikea

Puristusresultantin sijainti ylhäältä

$$y' = 0,43 x = 0,43 \cdot 195 = \underline{84 \text{ mm}}$$

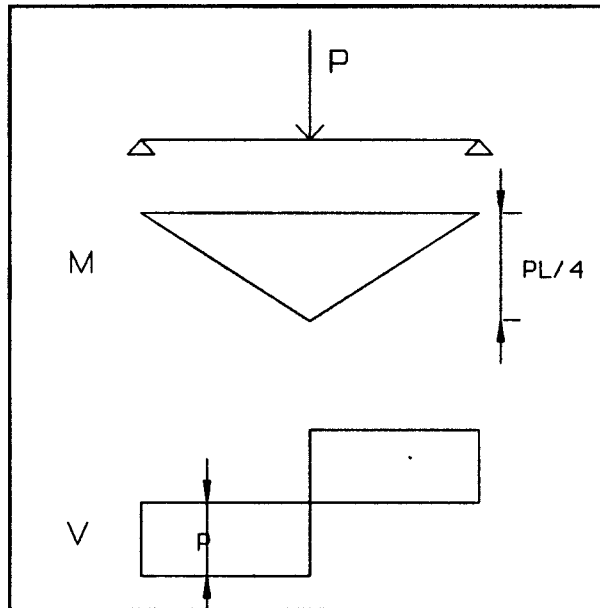
Taivutuskapasiteetti

$$M_u' = 1365,6 \cdot (0,325 - 0,084) + 427,6 \cdot (0,295 - 0,084) = \underline{420 \text{ kNm}} < M_u = 428 \text{ kNm}$$

$M_d = 380 \text{ kNm} < M_u'$ , joten poikkileikkauksen kapasiteetti on riittävä.



## 8. PISTEKUORMITETTU PALKKI



Taivutusmomentti  $M_d = P L/4 = V_d L/2$

Leikkausvoima  $V_d = P/2$

Murtotilassa käytetään redusoitu taivutuskapasiteetti täysin hyödyksi. Maksimimomentin kohdalla on suuri leikkausvoima, joten taivutuskapasiteettia on tarkasteltava yhdessä leikkausvoiman kanssa.

Puristusvyöhykkeen leikkausrasitus  $V_{d,c} = V_d$ , jos koko leikkausvoima otetaan betonilla.

Puristusvyöhykettä rasittava puristusvoima  $F_{d,c} = N_c$

$$M_d = M_u = N_c z \Rightarrow M_d = V_d L/2 = N_c z$$

$$\Rightarrow \alpha_v = V_{d,c}/F_{d,c} = V_d/N_c = \underline{2z/L},$$

jos koko leikkausvoima  $V_d$  otetaan betonilla (leikkausraudoittamaton).

Betonin redusoitu puristuslujuus

$$f_{cd}' = f_{cd}/(6 \sqrt{1 + 3 \alpha_v^2} - 5) = f_{cd}/(6 \sqrt{1 + 12*(z/L)^2} - 5)$$

Jänneväli  $L = 5 \text{ m}$

Edellä saatiin ilman puristuslujuuden redusointia taivutuskestävyydeksi  $M_u = 428 \text{ kNm}$

ja betonin puristusresultantiksi  $N_c = 1812$  kN, joten momenttivarsi

$$\underline{z} = M_u / N_c = 428 / 1812 = \underline{0,236 \text{ m}}$$

$$\underline{\alpha}_v = 2z / L = 2 * 0,236 / 5 = \underline{0,094}$$

Betonin redusoitu puristuslujuus

$$f_{cd}' = 31,1 / (6 \sqrt{1 + 3 * 0,094^2} - 5) = \underline{28,8 \text{ MPa}} \approx 0,93 f_{cd}$$

Lasketaan neutraaliakselin paikka kokeilemalla kuten edellä:

Kokeillaan  $x = 201$  mm:

			Alin rivi	Toinen rivi
tehollinen korkeus	$d$	mm	325	295
teräsvenymä	$\Delta \epsilon_s$	‰	2,16	1,64
kokonaisvenymä	$\epsilon_{s \text{ tot}}$	‰	6,26	5,74
teräsännitys	$\sigma_s$	MPa	1215,6	1119,9
teräsmäärä	$A_p$	mm <sup>2</sup>	1116	372
terästen vetovoima	$N_{si}$	kN	1356,1	416,6

$$\text{Terästen vetovoima } N_s = 1356,1 + 416,6 = \underline{1773 \text{ kN}}$$

Betonin puristusresultantti

$$N_c = 0,807 \times b \times f_{cd}' = 0,807 * 201 * 380 * 28,8 * 10^{-3} = \underline{1775 \text{ kN}}$$

$N_c \approx N_s$ , joten  $x$ :n arvo on oikea

Puristusresultantin sijainti ylhäältä

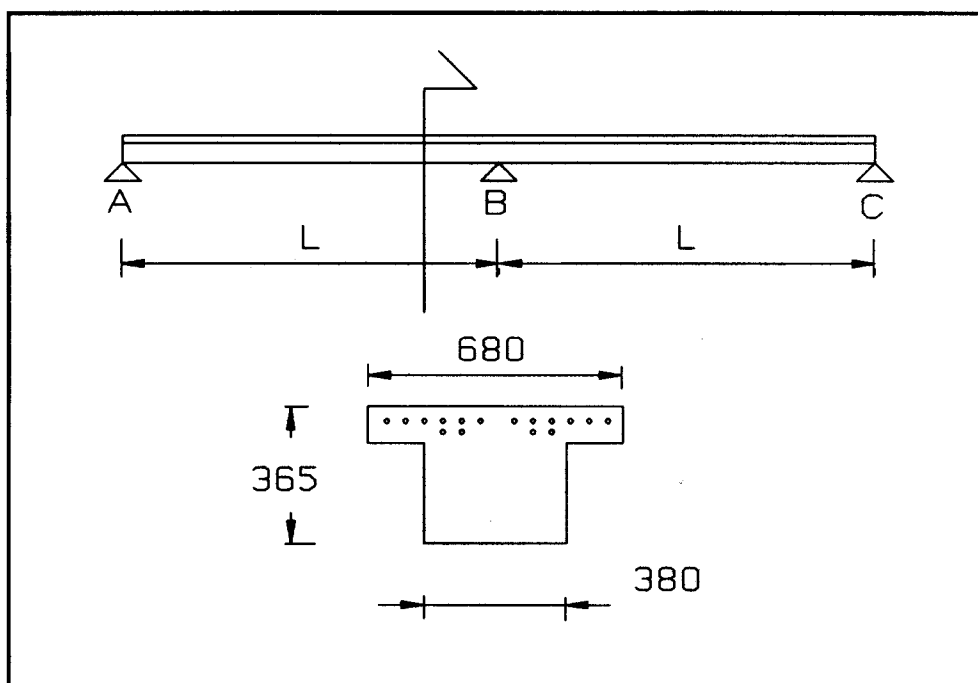
$$\underline{y}' = 0,43 x = 0,43 * 201 = \underline{86 \text{ mm}}$$

Taivutuskapasiteetti

$$\underline{M}_u' = 1356,1 * (0,325 - 0,086) + 416,6 * (0,295 - 0,086) = \underline{411 \text{ kNm}}$$

$$\text{Momenttivarsi } z = M_u / N_c = 411 / 1773 = 0,232 \text{ m} \approx z_{\text{oletus}} = 0,236 \text{ m}$$

## 9. JATKUVA PALKKI YLIRAUDOITETTUNA



Poikkileikkaus ja rauditus kuten edellä.

Puristuspuunnan leveys  $b = 380$  mm, korkeus  $h = 365$  mm ja tehollinen korkeus  $d = 317$  mm

Rauditus  $(12+4) \phi 12,5$

Palkkia rasittaa tasainen kuorma  $q_d$

Keskituella taivutusmomentti

$$M_{Bd} = -q_d L^2/8 = V_{Bd} L/5$$

$$\text{Leikkausvoima } V_{Bd} = 0,625 q_d L$$

Murtotilassa taivutuskestävyys

$$M_u = N_c z = M_{Bd} = V_{Bd} L/5$$

$$\alpha_v = V_{d,c}/F_{d,c} = V_{Bd}/N_c = 5 z/L,$$

kun koko leikkausvoima rasittaa betonin puristusvyöhykettä.

Redusoitu puristuslujuus

$$f_{cd}' = f_d / (6 \sqrt{1 + 75 (z/L)^2} - 5)$$

Oletetaan sisäiseksi momenttivarreksi  $z = 230 \text{ mm}$

$$\Rightarrow \alpha_v = 5z/L = 5 \cdot 0,23/5 = 0,23$$

Redusoitu puristuslujuus

$$f_{cd}' = 31,1 / (6 \sqrt{1 + 3 \cdot 0,23^2} - 5) = 21,3 \text{ MPa} \approx 0,7 f_{cd}$$

Ratkaistaan neutraaliakselin paikka kokeilemalla kuten edellä

Kokeillaan  $x = 236 \text{ mm}$ :

			Alin rivi	Toinen rivi
tehollinen korkeus	$d$	mm	325	295
teräsvenymä	$\Delta \epsilon_s$	‰	1,32	1,88
kokonaisvenymä	$\epsilon_{p \text{ tot}}$	‰	5,42	4,98
teräsännitys	$\sigma_s$	MPa	1057,6	970,7
teräsmäärä	$A_p$	mm <sup>2</sup>	1116	372
terästen vetovoima	$N_{si}$	kN	1180,2	361,0

$$\text{Terästen vetovoima } \underline{N_s} = 1180,2 + 361,0 = \underline{1541 \text{ kN}}$$

Betonin puristusresultantti

$$\underline{N_c} = 0,807 \times b f_{cd}' = 0,807 \cdot 236 \cdot 380 \cdot 21,3 \cdot 10^{-3} = \underline{1540 \text{ kN}}$$

$N_c \approx N_s$ , joten  $x$ :n arvo on oikea

Puristusresultantin sijainti ylhäältä

$$\underline{y'} = 0,43 x = 0,43 \cdot 236 = \underline{101 \text{ mm}}$$

Taivutuskapasiteetti

$$\underline{M_u}' = 1180,2 \cdot (0,325 - 0,101) + 361,0 \cdot (0,295 - 0,101) = \underline{334 \text{ kNm}}$$

$$\text{Momenttivarsi } z = M_u / N_c = 334 / 1541 = 0,217 \text{ m} < z_{\text{oletus}} = 0,230 \text{ m}$$

Lasketaan  $\alpha_v$  uudelleen käyttäen momenttivartta  $z = 217 \text{ mm}$ :

$$\alpha_v = 5 \cdot 0,217 / 5 = 0,217$$

Redusoitu puristuslujuus

$$f_{cd}' = 31,1 / (6 \sqrt{1 + 3 \cdot 0,217^2} - 5) = 22,1 \text{ MPa}$$

Kokeillaan  $x = 232$  mm:

			Alin rivi	Toinen rivi
tehollinen korkeus	$d$	mm	325	295
teräsvenymä	$\Delta \epsilon_s$	‰	1,41	0,96
kokonaisvenymä	$\epsilon_{p \text{ tot}}$	‰	5,51	5,06
teräsjännitys	$\sigma_s$	MPa	1074,5	986,2
teräsmäärä	$A_p$	mm <sup>2</sup>	1116	372
terästen vetovoima	$N_{si}$	kN	1199,1	366,8

$$\text{Terästen vetovoima } N_s = 1199,1 + 366,8 = \underline{1566 \text{ kN}}$$

Betonin puristusresultantti

$$N_c = 0,807 \times b \times f_{cd}' = 0,807 \times 232 \times 380 \times 22,1 \times 10^{-3} = \underline{1567 \text{ kN}}$$

$N_c \approx N_s$ , joten  $x$ :n arvo on oikea

Puristusresultantin sijainti ylhäältä

$$y' = 0,43 \times x = 0,43 \times 232 = \underline{100 \text{ mm}}$$

Taivutuskapasiteetti

$$M_u' = 1199,1 \times (0,325 - 0,100) + 366,8 \times (0,295 - 0,100) = \underline{342 \text{ kNm}}$$

$$\text{Momenttivarsi } z = M_u / N_c = 342 / 1566 = 0,218 \text{ m} \approx z_{\text{oletus}} = 0,217 \text{ m}$$

### MOMENTTIPINNAN SIIRTO:

BN 2.1.7.4 kaava 2.22:

$$\Delta M / M = 0,6 - x/d > 0$$

Puristuspinnan korkeus  $x = 232$  mm

Sisäinen momenttivarsi  $z = 217$  mm

Puristusresultantin sijainti  $y' = 100$  mm

Tehollinen korkeus  $d = z + y' = 217 + 100 = 317$  mm

$$x/d = 232/317 = 0,73 > 0,6$$

=> Yliraudoitettu palkissa ei yleensä voi suorittaa momenttipinnan siirtoa.