Mitoitus käyttörajatilassa

Jännitykset käyttötilassa

Oletukset:
- Tasot pysyvät tasoina (Bernoullin otaksuma)
  => lineaarinen muodonmuutosjakautuma
  => betonin ja teräksen välillä ei ole liukumaa (yhteensopivuusehto)

$$\frac{x}{d} = \frac{|\varepsilon_c|}{|\varepsilon_c| + \varepsilon_s}$$

- Betoni ja teräs eivät myötää
  => jännityksen ja muodonmuutoksen välinen yhteys noudattaa Hooken lakia

- Betoni ei ota vetojännityksiä

Betonin jännitysjakautuma jännitysjakautuma kolmiomainen =>
$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c$

Teräsjännitys $\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s$

- Tasapainoehdot toteutuvat
  => jännitysresultantit ovat tasapainossa ulkoisten kuormien aiheuttamien voimasuureiden kanssa

$$N_c = N_s$$
$$N_s \cdot z = M_E$$

$$N_c = \frac{b \cdot x}{2} \cdot \sigma_c = \frac{b \cdot x}{2} \cdot E_c \cdot \varepsilon_c = N_s = A_s \cdot \sigma_s = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$\frac{b \cdot x}{2} \cdot E_c \cdot \frac{x}{d - x} \cdot \varepsilon_s = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$\left(\frac{x}{d}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{x}{d}} = 2 \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{A_s}{b \cdot d}$$

$$\frac{x}{d} = \alpha_e \cdot \rho \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho}} - 1\right)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{\frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{eff}}} \qquad \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \qquad \varphi_{eff} = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{E,pitkä}}{M_E}$$

Momenttivarsi $z = d - \frac{x}{3}$

Teräsjännitys ja -venymä

$$N_s = A_s \cdot \sigma_s = \frac{M_E}{z}$$

$$\sigma_s = \frac{M_E}{z \cdot A_s}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Betonin jännitys

$$N_c = \frac{b \cdot x}{2} \cdot \sigma_c$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot M_E}{z \cdot b \cdot x}$$

Halkeaman leveys

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

$s_{r,max}$ on suurin halkeamaväli (tyypillisesti 150…300 mm)

ε_{sm} on keskimääräinen raudoituksessa vaikuttava venymä

ε_{cm} on keskimääräinen betonin venymä halkeamien välillä

Halkeaman kohdalla teräsvenymä on $\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}$ haljenneen poikkileikkauksen mukaan laskettuna (betoni ei ota vetoa).

Lähellä neutraaliakselia betonin venymä pieni, joten lähellä neutraaliakselia betoni ottaa vetoa, koska $\sigma_c < f_{ct}$

Halkeaman etäännyttäessä teräksen tartunnan vaikutuksesta teräsjännitystä siirtyy betonille jolloin teräsjännitys pienenee betonin jännitys kasvaa, kunnes etäisyydellä s_r betonin jännitys ylittää vetolujuuden ja syntyy seuraava halkeama. Halkeamien välillä betonin jännitys $\sigma_c < f_{ct}$ ja teräsjännitys pienempi kuin haljenneen poikkileikkauksen mukaan laskettu σ_s.

Halkeaman välillä tapahtuva pituudenmuutos
= halkeaman leveys= halkeamaväli *keskimääräinen venymä halkeamien välillä

Keskimääräinen venymä halkeamien välillä

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

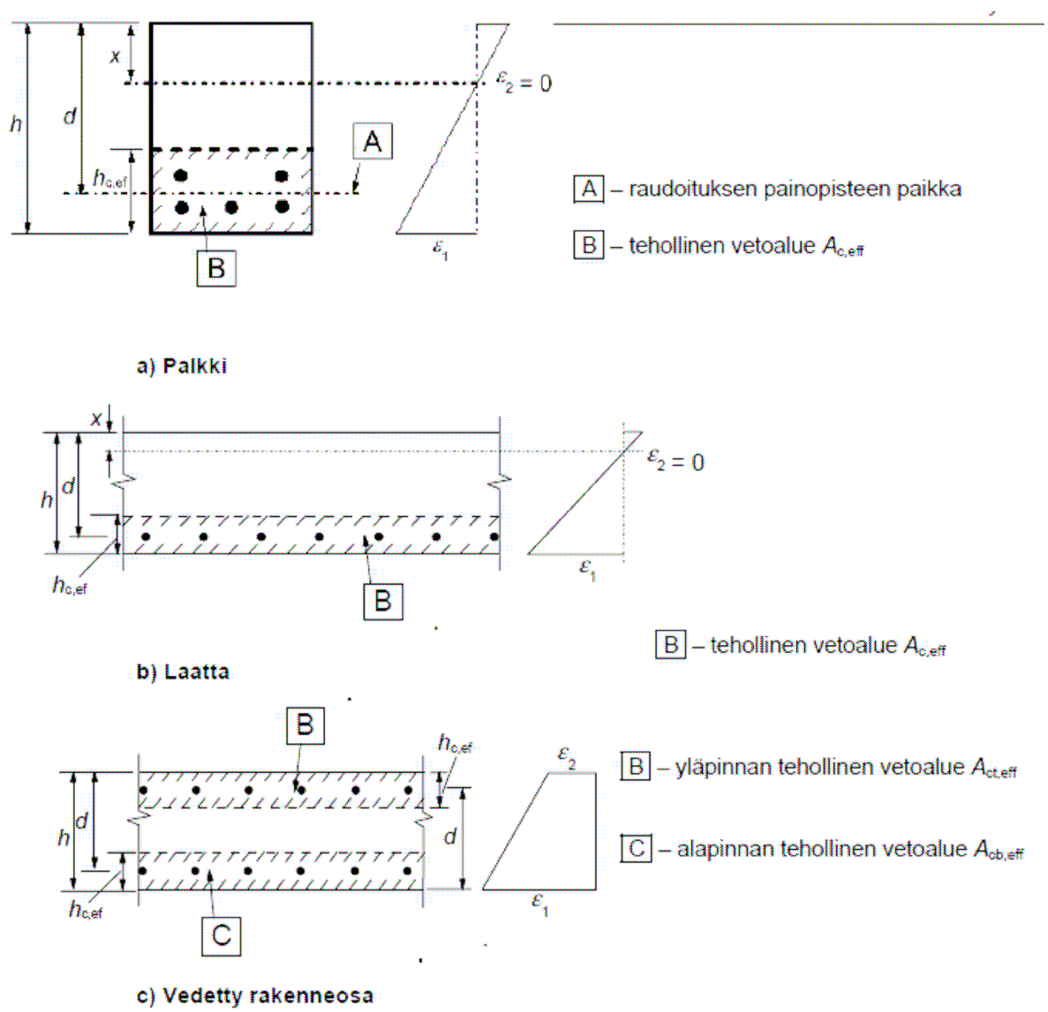
$f_{ct,eff} = f_{ctm}$

$k_t = 0{,}6$ lyhytaikaselle kuormitukselle
$k_t = 0{,}5$ pitkäaikaiselle kuormitukselle

Tehollisen vetovyöhykkeen $A_{c,eff}$ suhteellinen teräsmäärä $\rho_p = \dfrac{A_s}{A_{c,eff}}$

Tehollisen vetovyöhykkeen pinta-ala $A_{c,eff} = b \cdot h_{eff}$

Tehollisen vetovyöhykkeen korkeus $h_{eff} \leq \begin{cases} 2{,}5 \cdot (h - d) \\ \dfrac{h - x}{3} \\ \dfrac{h}{2} \end{cases}$



Kuva 7.1: Tehollinen vetoalue (tyypilliset tapaukset)

Halkeamaväli $s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \dfrac{\phi}{\rho_{p,eff}}$

$k_3 = 3{,}4$
$k_1 = 0{,}8$ tangolla hyvä tartunta (harjateräs)
$k_1 = 1{,}6$ tangon pinta lähes sileä (jänneteräs)
$k_4 = 0{,}425$

$$k_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2 \cdot \varepsilon_1}$$

ε_1 on eniten vedetyn reunan venymä
ε_2 on vähemmän vedetyn reunan venymä

Tasainen veto => $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ => $k_2 = 1$
Pelkkä taivutus => $\varepsilon_2 = 0$ => $k_2 = 0{,}5$

Halkeamaväli, kun raudoituksena on harjateräs ($k_1=0{,}8$) ja kyseessä on pelkkä taivutus

$$s_{r,max} = 3{,}4 \cdot c + 0{,}17 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}}$$

Teräksen keskimääräinen halkaisija $\phi = \dfrac{n_1 \cdot \phi_1^2 + n_2 \cdot \phi_2^2}{n_1 \cdot \phi_1 + n_2 \cdot \phi_2}$

Nipputeräkselle käytetään nipun nimellishalkaisijaa $\phi_n = \sqrt{n} \cdot \phi_1$

Sallittu halkeaman ominaisleveys w_k

Ympäristön rasitusluokka	**Teräsbetonirakenteet** Tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet
	Pitkäaikainen kuormitusyhdistelmä	Tavallinen kuormitusyhdistelmä
X0, XC1	**0,4 mm**	0,2 mm pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä vetojännityksetön tila
XC2,XC3,XC4 XD1,XS1	**0,3 mm**	0,2 mm
XD2,XD3 XS2,XS3	**0,2 mm**	vetojännityksetön tila

Halkeaman leveydet tarkistetaan teräsbetonirakenteissa pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä eli $M_E = M_{E,pitkä}$

Taipuman laskenta

Taipuman lauseke on muotoa $a = \delta_a \cdot \frac{M_E}{K} \cdot L^2$

δ_a on taipumakerroin, joka riippuu tuentatavasta ja käyristymäjakautumasta ja on käyristymäjakautuman integraali jännevälin L yli

Käyristymä (kaarevuus) $\psi = \frac{1}{r} = \frac{M_E}{K}$

K on poikkileikkauksen (haljenneen tai halkeamattoman) taivutusjäykkyys (EI)

Koska teräsbetonirakenne on suurimpien momenttien alueella haljennut, mutta lähellä tukia taas halkeamaton, niin taipuma lasketaan interpoloimalla suhteessa halkeamamomenttiin koko jännevälin matkalla halkeamattomana ja haljenneena laskettujen taipumien väliltä.

Halkeamattoman poikkileikkauksen taivutusjäykkyys:

$$K_I = K_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{eff}} \cdot I_c$$

Haljenneen poikkileikkauksen jäykkyys

$$K_{II} = K_r = E_s \cdot A_s \cdot z \cdot (d - x)$$

Momenttivarsi z ja puristuspinnan korkeus x lasketaan kuten edellä käyttäen betonin kimmokerrointa, jossa on otettu huomioon viruma

$$\varphi_{eff} = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{E,pitkä}}{M_E}$$

Viruman aiheuttama taipuma saadaan ottamalla huomioon betonin kimmokertoimessa virumaluku kuorman aiheuttamaa taipumaa laskettaessa.

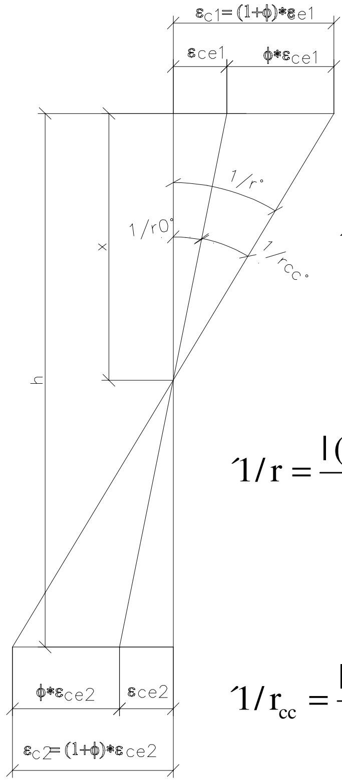
Taipuma, kun rakenne otettaan halkeamattomaksi $a_I = \delta_a \cdot \frac{M_E}{K_I} \cdot L^2$

Taipuma, kun rakenne otetaan kauttaaltaan haljenneeksi

$$a_I = \delta_a \cdot \frac{M_E}{K_{II}} \cdot L^2$$

Viruman aiheuttama taipuma

Halkeamaton poikkileikkaus



Käyristymä

Ennen virumaa :

$$'1/r0 = \frac{|\varepsilon_{ce1}| + |\varepsilon_{ce2}|}{h} = \frac{|\varepsilon_{ce1}|}{x}$$

Viruman jälkeen

$$'1/r = \frac{|(1+\phi)\varepsilon_{ce1}| + |(1+\phi)\varepsilon_{ce2}|}{h} = \frac{|(1+\phi)\varepsilon_{ce1}|}{x} = (1+\phi)1/r_0$$

Viruman aiheuttama käyristymän lisäys

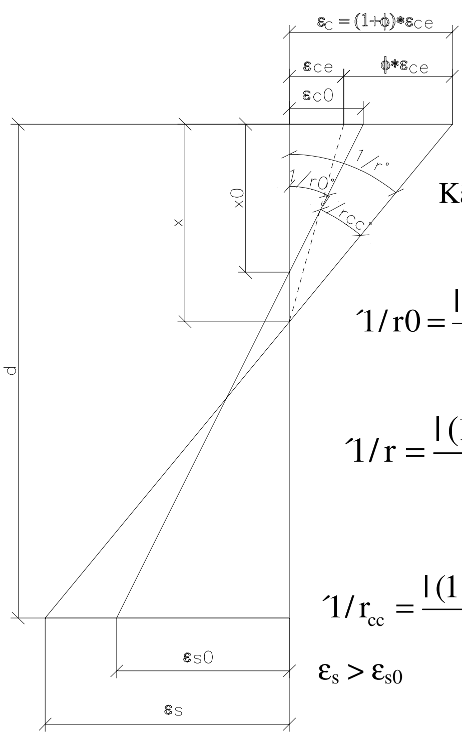
$$'1/r_{cc} = \frac{|\phi\varepsilon_{ce1}| + |\phi\varepsilon_{ce2}|}{h} = \frac{|\phi\varepsilon_{ce1}|}{x} = \phi 1/r_0$$

Halkeillut poikkileikkaus

$\varepsilon_c < (1+\phi)\,\varepsilon_{c0}$

$\varepsilon_{ce} < \varepsilon_{c0}$

$x < x_0$



Käyristymä

Ennen virumaa :

$$'1/r0 = \frac{|\varepsilon_{c0}| + |\varepsilon_{s0}|}{h} = \frac{|\varepsilon_{ce0}|}{x_0}$$

Viruman jälkeen

$$'1/r = \frac{|(1+\phi)\varepsilon_{ce}| + |\varepsilon_s|}{d} = \frac{|(1+\phi)\varepsilon_{ce}|}{x} \quad < (1+\phi)1/r_0$$

Viruman aiheuttama käyristymän lisäys

$$'1/r_{cc} = \frac{|(1+\phi)\varepsilon_{ce} - \varepsilon_{c0}| + |\varepsilon_s - \varepsilon_{s0}|}{d} = \frac{|(1+\phi)\varepsilon_{ce} - \varepsilon_{c0}|}{x} \quad < \phi 1/r_0$$

$\varepsilon_s > \varepsilon_{s0}$

Kutistuman aiheuttama taipuma

Yleensä halkeamattomassa poikkileikkauksessa kutistuman aiheuttama käyristymä on vähäistä. Haljenneessa poikkileikkauksessa puristuspuoli kutistuma, mutta vetoteräkset eivät, jolloin syntyy käyristymää ja edelleen taipumaa.

Kutistuman aiheuttama taipuma $a_{cs} = \delta_a \cdot \frac{1}{r_{cs}} \cdot L^2 = \delta_a \cdot \varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot \frac{S}{I}$

$\alpha_e = E_s/E_{c,eff}$ (tehollinen virumaluku otettuna huomioon)
S on raudoituksen staattinen momentti poikkileikkauksen painopisteen suhteen
I on poikkileikkauksen hitausmomentti

S ja I lasketaan erikseen halkeamattomalle ja haljenneelle poikkileikkaukselle ja näin saadut taipumat interpoloidaan suhteessa halkeamamomenttin.

Halkeamaton poikkileikkaus: $S_I \approx A_s \cdot (d - \frac{h}{2})$

Haljennut poikkileikkaus: $$\begin{aligned} S_{II} &= A_s \cdot (d - x) \\ I_{II} &= \alpha_e \cdot A_s \cdot z \cdot (d - x) \end{aligned}$$

Haljenneessa poikkileikkauksessa kutistuman aiheuttamaksi taipumaksi saadaan $a_{cs,II} = \delta_a \cdot \frac{\varepsilon_{cs}}{z}$

Lopullinen taipuma on

$$a = \zeta \cdot (a_{II} + a_{cs,II}) + (1-\zeta) \cdot (a_I + a_{cs,I})$$

Interpolointiparametri $\zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}\right)^2 \approx 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_r}{M_E}\right)^2$

β=1,0 ensimmäiselle halkeaman aiheuttamalle kuormitukselle
β=0,5 toistuvalle kuormitukselle (normaali tapaus)

Halkeamamomentti $M_r = W_{ce} \cdot f_{ctm}$

Halkeamamomenttia vastaava teräsjännitys $\sigma_{sr} = \frac{M_r}{z \cdot A_s}$

M_E on kokonaiskuormaa vastaava käyttötilan momentti, vaikka taipuma laskettaisiinkin pienemmälle kuormitusyhdistelmälle (tavallinen tai pitkäaikainen kuormitus).

Sallittu taipuma:

Tavallisella kuormitusyhdistelmällä a_{sall} = L/250

Jos rakenne kantaa tai siihen liittyy helposti halkeilevia seiniä tai helposti vaurioituvia rakenneosia, niin sallittu taipuma kokonaiskuormalla on a_{sall} =L/500.