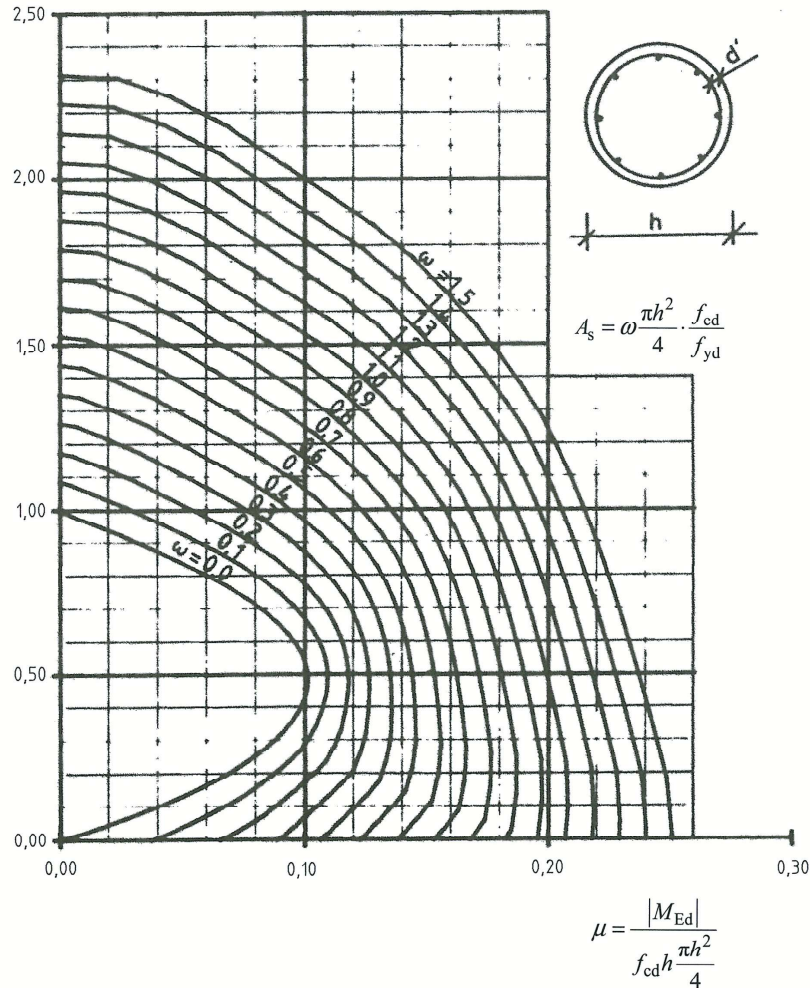


$$v = \frac{N_{Ed}}{f_{cd} \pi \frac{h^2}{4}}$$

Armatuuriteras $f_{yk} = 500$ MPa



Joonis 10.63. Ümarristlõige. $f_{yk} = 500$ MPa, $\gamma_s = 1,15$, $d'/h = 0,25$

10.13. PÕIKJÕUD

10.13.1. Arvutuse alused

Kasutatavad mõisted

$V_{Rd,c}$ – pöikarmatuurita elemendi arvutuslik pöikjõukandevõime

$V_{Rd,s}$ – pöikarmatuuriga vastuvõetav arvutuslik pöikjõud

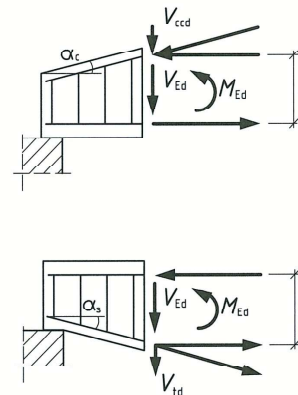
$V_{Rd,max}$ – surutud betoonkaldvardaga määratud elemendi suurim arvutuslik pöikjõukandevõime

Muutuva kõrgusega elementide korral lisanduvad (joonis 10.64):

$V_{ccd} = \frac{M_{Ed}}{z} \tan \alpha_c$ kaldse survetsooni sisejõu pöikjõusuunalise komponendi arvutusväärtus

$V_{td} = \frac{M_{Ed}}{z} \tan \alpha_s$ kaldse tõmbearmatuuri sisejõu pöikjõusuunalise komponendi arvutusväärtus

Pöikarmatuuriga elemendi arvutuslik pöikjõukandevõime $V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{ccd} + V_{td}$ (10.209)



Joonis 10.64. Muutuva kõrgusega elemendi pöikjõukomponendid

Kandevõime kontrolltingimused

Arvutuslikku pöikarmatuuri ei vaja lõiked, kus on rahuldatud tugevustingimus

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (10.210)$$

Kui tingimus (10.210) on täidetud, tuleks ette näha punktile 10.5.1 vastav minimaalne pöikarmatuur. Viimane võib puududa täis- ja ribiplaatides ning õõnespaneelides ja vähetähtsates elementides (näiteks sillustes sildega kuni 2 m), mis ei mõjuta oluliselt konstruktsiooni üldist tugevust ja stabiilsust.

Piirkondades, kus $V_{Ed} > V_{Rd,c}$, tuleb ette näha pöikarmatuur, mille puhul oleks rahuldatud tugevustingimus

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (10.211)$$

Elemendi kõigis lõigetes peaks olema täidetud nõue

$$V_{Ed} - V_{ccd} - V_{td} \leq V_{Rd,max} \quad (10.212)$$

Ühtlaselt jaotatud koormusega elementidel ei ole vaja tingimustega (10.210) ja (10.211) pöikjõudu kontrollida piirkonnas toe servast kuni kauguseni d . Nõue (10.212) peab olema rahuldatud ka toelõikes.

10.13.2. Arvutusliku pöikarmatuurita elemendid

Arvutuslik pöikjõukandevõime

Kandevõime kontrollimisel tingimusega (10.210) võetakse arvutuslik pöikjõukandevõime njuutonites kujus

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_s f_{ck})^{1/3} + 0,15 \sigma_{cp}] b_w d \quad (10.213)$$

miinimumväärtusega

$$V_{Rd,c,min} = (v_{min} + 0,15 \sigma_{cp}) b_w d \quad (10.214)$$

kus

$$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c \text{ (üldjuhul } \gamma_c = 1,5 \text{ ja } C_{Rd,c} = 0,12)$$

$$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (10.215)$$

f_{ck} tühikuks on MPa

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

d ühikuks on mm

$$\rho = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0,02$$

A_{s1} tõmbearmatuuri ristlõikepindala, mis ulatub vaadeldava lõike taha vähemalt $(l_{bd} + d)$ ulatuses (joonis 10.65)

b_w ristlõike minimaalne laius tõmbetsoonis mm

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0,2f_{cd} \quad (\text{MPa})$$

N_{Ed} arvutuslik pikijõud lõikes (surve korral positiivne)

A_c betoonristlõike pindala mm²

v_{min} ja teguri k väärtuse võib võtta tabelist 10.26.

Tugevustingimus (10.212) konstantse kõrgusega põikarmatuurita elemendile on

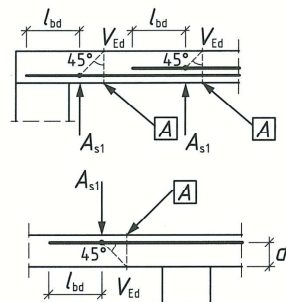
$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (10.212')$$

kus

$$V_{Rd,max} = 0,5b_w d v f_{cd} \quad (10.216)$$

$$v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (10.217)$$

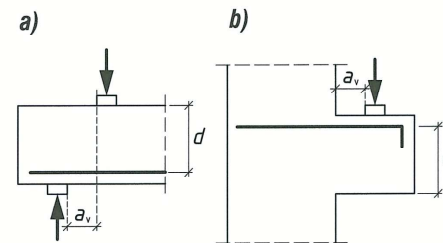
(f_{ck} MPa, v väärtused vt tabel 10.26)



Joonis 10.65. A_{s1} mõiste valemis (10.213). A on vaadeldav lõige

Põikjõud toepiirkonnas

$V_{Rd,c}$ määramisel valemiga (10.213) võib elemendi ülemisse pinda toe servast kaugusel $0,5d \leq a_v < 2d$ rakendatud koondatud koormuste (vt joonis 10.66) osa põikjõus V_{Ed} vähendada teguriga $\beta = a_v/2d$. See rakendub eeldusel, et vaadeldaval lõigul vajalik pikiarmatuur on toel täielikult ankurdatud. Piirkonnas $a_v \leq 0,5d$ tegur $\beta = 0,25$. Teguriga β vähendamata põikjõud V_{Ed} peaks alati rahuldama tingimust (10.212').



Joonis 10.66. Toelähedane koondatud koormus. a – otsese toetusega tala, b – konsool

10.13.3. Arvutusliku põikarmatuuriga elemendid

Kui koormus on rakendatud ristlõike alumises osas, tuleks lisaks põikjõudu vastuvõtvale armatuurile ette näha vertikaalne armatuur koormuse ülekandmiseks ristlõike ülemisse pinda.

Põikarmatuuriga elemendi projekteerimisel vaadeldakse elementi sõrestikuna, mille survevööks on betooni survetsoon koos survearmatuuriga, tõmbevööks pikitõmbearmatuur, tõmmatud diagonaalideks betoonis moodustuvad tinglikud kaldvardad (joonis 10.67).

Kasutatud tähised:

α nurk põikarmatuuri ja elemendi pikitelje vahel

θ nurk betoonkaldvarda ja elemendi pikitelje vahel

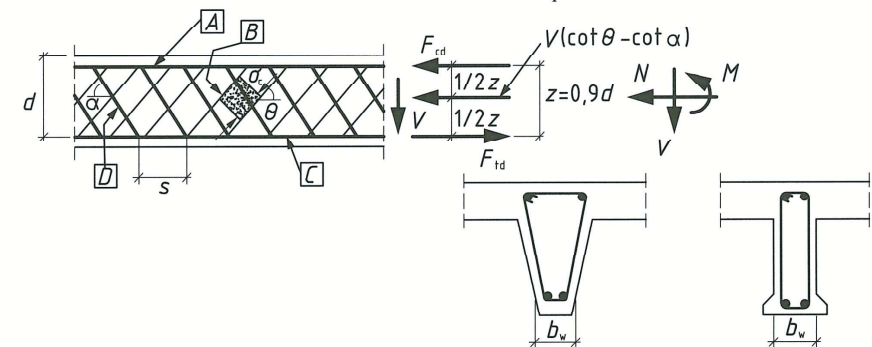
F_{td} pikiarmatuuri tõmbejõud

F_{cd} elemendi telje suunaline survejõud betoonis ristlõike minimaalne laius

b_w ühtlase kõrgusega elemendi vaadeldava osa suurimale paindemomendile vastav sisejõudude õlg. Normaaljõu puudumisel võib ligikaudselt võtta $z = 0,9d$

Surutud betoonvarda kaldenurk θ on vabalt valitav piirides $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$.

Käesolevalt vaadeldakse pikiteljega risti olevate rangidega ($\alpha = 90^\circ$) elementi. Kaldrangide korral vt /2/ p 6.2.3.



Joonis 10.67. Varrasskeem ja põikjõuarvutuses kasutatavad tähised. A – survevöö, B – survvarras, C – tõmbevöö, D – põikarmatuur

10

Tabel 10.26. Tegurid k ja v_{min} sõltuvalt d ja f_{ck} väärtustest ($\gamma_c = 1,5$)

d mm	k	v_{min}									
		f_{ck} MPa									
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	
≤ 200	2,000	0,443	0,495	0,542	0,586	0,626	0,664	0,700	0,734	0,767	
300	1,816	0,383	0,428	0,469	0,507	0,542	0,575	0,606	0,635	0,664	
400	1,707	0,349	0,390	0,428	0,462	0,494	0,524	0,552	0,579	0,605	
500	1,632	0,326	0,365	0,400	0,432	0,462	0,490	0,516	0,541	0,565	
600	1,577	0,310	0,347	0,380	0,410	0,439	0,465	0,490	0,514	0,537	
700	1,535	0,298	0,333	0,364	0,394	0,421	0,446	0,470	0,493	0,515	
800	1,500	0,288	0,321	0,352	0,380	0,407	0,431	0,455	0,477	0,498	
900	1,471	0,279	0,312	0,342	0,370	0,395	0,419	0,442	0,463	0,484	
1000	1,447	0,273	0,305	0,334	0,360	0,385	0,409	0,431	0,452	0,472	
1200	1,408	0,262	0,292	0,320	0,346	0,370	0,392	0,414	0,434	0,453	
$v = 0,6(1 - f_{ck}/250)$		0,552	0,540	0,528	0,516	0,504	0,492	0,480	0,468	0,456	

10

Tugevuskontroll

Põikjõukandevõime on tagatud, kui on rahuldatud tingimused (10.211) ja (10.212).

Vertikaalse põikarmatuuri ($\alpha = 90^\circ$) korral on põikjõukandevõimeks V_{Rd} väiksem väärtustest:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (10.218)$$

ja

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (10.219)$$

kus A_{sw} on ühes tasandis paikneva põikarmatuuri (rangide) ristlõikepindala

s rangide samm

f_{ywd} põikarmatuuri arvutuslik voolavustugevus

v_1 põikjõust pragunenud betooni tugevuse vähendustegur

α_{cw} surutud vöö pingelõukorda arvesse võttev tegur

Üldiselt on v_1 võrdne teguriga v , vt valem (10.217) või tabel 10.26. Kui valemis (10.218) f_{ywd} ei võeta suuremaks kui $0,8f_{yk}$, võib v_1 suureks võtta:

$$v_1 = 0,6 \text{ kui } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa} \quad (10.220a)$$

$$v_1 = 0,9 - f_{ck} / 200 > 0,5 \text{ kui } f_{ck} \geq 60 \text{ MPa} \quad (10.220b)$$

Normaaljõu puudumisel $\alpha_{cw} = 1,0$, vastasel juhul:

$$\alpha_{cw} = (1 + \sigma_{cp} / f_{cd}) \text{ kui } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25f_{cd} \quad (10.221a)$$

$$\alpha_{cw} = 1,25 \text{ kui } 0,25f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5f_{cd} \quad (10.221b)$$

$$\alpha_{cw} = 2,5(1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \text{ kui } 0,5f_{cd} < \sigma_{cp} < 1,0f_{cd} \quad (10.221c)$$

kus σ_{cp} on arvutusliku normaaljõu põhjustatud keskmine pinge betoonis (survel positiivne).

Põikarmatuuri suurim arvesse minev ristlõikepindala $A_{sw,max}$ on $\cot \theta = 1$ jaoks määratud avaldisega

$$\frac{A_{sw,max} f_{ywd}}{b_w s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} v_1 f_{cd} \quad (10.222)$$

Antud vertikaalse põikarmatuuriga elemendi põikjõukandevõime määramisel võib $\cot \theta$ leida, lähtudes tingimusest $V_{Rd,s} = V_{Rd,max}$, millest

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{A_{sw} f_{ywd}}{s b_w \alpha_{cw} v_1 f_{cd}}} \quad (10.223)$$

Põikjõukandevõime määratakse valemiga (10.218) või (10.219).

Rangide dimensioonimine

Vertikaalsete rangide korral võib $\cot \theta$ leidmiseks võtta

$$\sin 2\theta = \frac{2V_{Ed}}{b_w z \cot \alpha_{cw} v_1 f_{cd}} \quad (10.224)$$

Vajalik põikarmatuuri intensiivsus

$$a_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{f_{ywd} z \cot \theta} \quad (10.225)$$

Kui valemist (10.223) või (10.224) tulenev $\cot \theta$ ei ole piirides 1...2,5, siis tuleks tema suuruseks võtta lähima piiri väärtus (s.o 1,0 või 2,5).

Kõigil vaadeldud juhtudel võib ülemises pinnas rakendatud ühtlaselt jaotatud koormuse korral lõigu $l = z \cot \theta$ ulatuses põikarmatuuri arvatada, lähtudes selle lõigu vähimast V_{Ed} väärtusest.

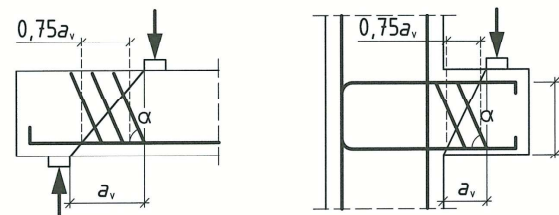
Elemendi ülemisse pinda toe servast kaugusel $0,5d \leq a_v < 2,0d$ rakendatud koormuste osa põikjõus V_{Ed} võib vähendada teguriga $\beta = a_v / 2d$. Nii arvatud põikjõud peaks rahuldama tingimust

$$V_{Ed} \leq A_{sw} f_{ywd} \sin \alpha \quad (10.226)$$

kus $A_{sw} f_{ywd}$ on koormatud pindade vahelist kaldpragu läbiva põikarmatuuri piirsisejõud (vt joonis 10.68). Arvesse tuleks võtta ainult kesklõigu $0,75a_v$ ulatuses paiknevat põikarmatuuri. Kui $a_v \leq 0,5d$, võetakse $a_v = 0,5d$. Vähendustegurit β võib kasutada ainult põikarmatuuri arvutamiseks ja eeldusel, et pikiarmatuur on toel täielikult ankurdatud. Teguriga β vähendamata põikjõud $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$, vt valem (10.219).

Põikjõu V_{Ed} põhjustatud täiendava tõmbejõu ΔF_{td} pikiarmatuuris võib arvutada valemiga (vt ka p 10.5.1)

$$\Delta F_{td} = 0,5 V_{Ed} (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (10.227)$$



Joonis 10.68. Põikarmatuur elemendi ülapiinnas rakendatud toelähedase koormuse korral

10.13.4. Nihe ribi ja plaadi vahel

Plaadi ja ribi vaheline keskmine pikisuunaline nihkepinge v_{Ed} lõigu Δx ulatuses on (joonis 10.69)

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f \Delta x} \quad (10.228)$$

kus h_f plaadi paksus ühenduskohas

Δx vaadeldava lõigu pikkus, vt joonis 10.69

ΔF_d normaaljõu muutus plaadis pikkuse Δx ulatuses

Δx maksimaalseks suuruseks võib võtta pool nende lõigete vahekaugusest, kus paindemoment on null ja kus see on maksimaalne. Koormuste esinemisel ei tohiks pikkus Δx olla

suurem koormatud koormuste vahekaugusest. Paindemomendi muutus lõigu Δx ulatuses on ΔM_{Ed} .

Sümmeetrilisel ristlõikel plaadis asuva survetsooni korral võib võtta

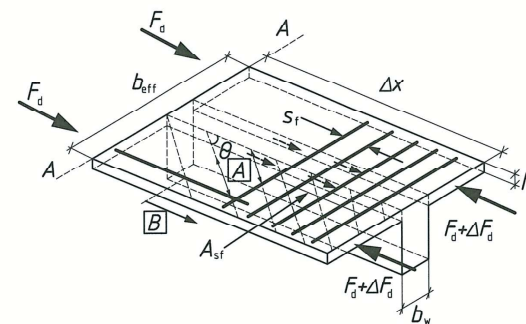
$$\Delta F_d = \frac{\Delta M_{Ed} (b_{eff} - b_w)}{2z b_{eff}} \quad (10.229)$$

Kui õhukese plaadi korral ulatub survetsoon maksimaalse paindemomendiga lõikes ribisse, siis võib võtta

$$\Delta F_d = \frac{\Delta M_{Ed} (b_{eff} - b_w) h_f}{2z A_{cc}} \quad (10.230)$$

kus A_{cc} normaallõike arvutusest saadud arvutusliku survetsooni pindala

$$z \approx d - 0,5 h_f$$



Joonis 10.69. Tähisted plaadi ja ribi ühenduse kontrollimisel. A on survetvarras, B – lõike A – A taha ankurdatud varras

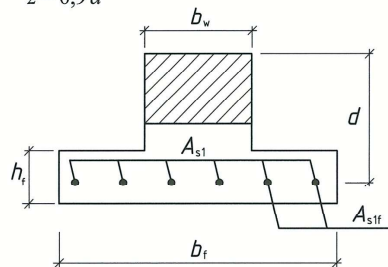
Kui plaat on ristlõike tõmbetsoonis (joonis 10.70), siis

$$\Delta F_d = \frac{\Delta M_{Ed} A_{s1f}}{2z A_{s1}} \quad (10.231)$$

kus A_{s1} pikitõmbearmatuuri ristlõike kogupindala

A_{s1f} pikitõmbearmatuuri ristlõikepindala ühes plaadikonsoolis

$$z = 0,9 d$$



Joonis 10.70. Ristlõige plaadiga tõmbetsoonis

Ühikpikkusel nõutav põikarmatuuri ristlõikepindala

$$\frac{A_{sf}}{s_f} \geq \frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta} \quad (10.232)$$

Betoonurvevarraste purunemise vältimiseks plaadis peaks olema rahuldatud tingimus

$$v_{Ed} \leq v_{cd}^f \sin \theta_f \cos \theta_f \quad (10.233)$$

$1,0 < \cot \theta_f < 2,0$ surutud plaadile ($45^\circ > \theta_f > 26,5^\circ$)
 $1,0 \leq \cot \theta_f \leq 1,25$ tõmmatud plaadile ($45^\circ \geq \theta_f \geq 38,6^\circ$)
 Plaadi ja ribi vahelise nihke ning plaadi põiksuunalise painemomendi üheaegsel mõjumisel tuleks armatuuri ristlõikepindalaks võtta suurem väärtustest, mis saadakse avaldisest (10.232) või pool avaldisest (10.232) saadud pinnast pluss põiksuunalise painde vastuvõtmiseks nõutav armatuuri pindala. Kui v_{Ed} ei ole suurem väärtusest $0,4f_{ctd}^b$ siis piisab paindemomendi vastuvõtmiseks nõutavast armatuurist.

Pikitõmbearmatuur plaadis peaks olema ankurdatud jõudu ribile tagasikandva survevarda taga lõikes, kus see armatuur on nõutav (vt lõige A-A joonisel 10.69).

10.14. VÄÄNE

Elemendi väändevastupanu määramisel võetakse aluseks õhukeseseinaline suletud ristlõige. Täisristlõige asendatakse õhukeseseinalise ekvivalentristlõikega, mille seinapaksus on t (joonised 10.71 ja 10.72). Ekvivalentristlõike parameetrid:

A ristlõike kogupindala koos ava pinnaga

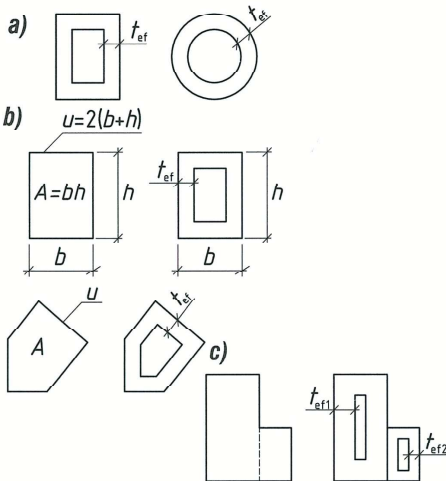
A_k õhukeseseinalise ristlõike keskjoonega piiratud pindala (koos ristlõike sees oleva avaga)

u ristlõike välisümberrõõm

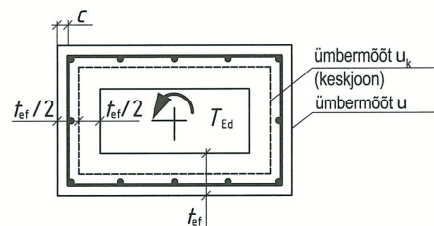
u_k õhukeseseinalise ristlõike keskjoone pikkus

$t_{ef} = A/u$ sein arvutuspaksus, mida ei võeta väiksemaks pikiarmatuuri raskuskeskme ja sein välispinna kahekordsest vahekaugusest. Õõnesristlõikel on t_{ef} ülemiseks piiriks sein tegelik paksus.

Liitristlõige jaotatakse ristkülikulisteks osadeks, kusjuures iga osa vaadeldakse eraldi õhukeseseinalise suletud ekvivalentristlõikena (joonis 10.71c). Üldine väändekandevõime leitakse osaristlõigete kandevõimete summana.



Joonis 10.71. Väänatud elemendi arvutuslik ristlõige. a – õhukeseseinaline täisnurkne ja ümar, b – ristkülikuline ja hulknurkne täisristlõige ja nende ekvivalentristlõiked, c – kahest osast koosnev liitristlõige ja selle ekvivalentristlõige



Joonis 10.72. Ekvivalentristlõige

10.14.1. Puhasvääne

Arvutuslik väändemoment T_{Ed} peab rahuldama järgmisi tingimusi:

$$T_{Ed} \leq T_{Rd,max} \quad (10.234)$$

$$T_{Ed} \leq T_{Rd,s} \quad (10.235)$$

$$T_{Ed} \leq T_{Rd,sl} \quad (10.236)$$

kus $T_{Rd,max}$ on surutud betoonkaldvarda kandevõimega määratud väändemoment

$T_{Rd,s}$ rangide kandevõimega määratud väändemoment

$T_{Rd,sl}$ pikiarmatuuri kandevõimega määratud väändemoment

Väändekandevõime

$$T_{Rd,max} = \frac{2\alpha_{cw} v_{fd}^t t_{ef} A_k}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (10.237)$$

Surutud betoonkaldvarraste ja elemendi piki-suuna vahelise nurga θ väärtus valitakse piirides $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$.

α_{cw} normaalkõõru puudumisel $\alpha_{cw} = 1,0$, vastasel juhul vt valemid (10.221):

v vt valem (10.217) või tabel 10.26.

$$T_{Rd,s} = \frac{2A_k f_{ywd} A_{sw}}{s} \cot \theta \quad (10.238)$$

$$T_{Rd,sl} = \frac{2A_k f_{yd} \Sigma A_{sl}}{u_k \cot \theta} \quad (10.239)$$

Tugevustingimuse (10.236) kontrollimise asemel võib määrata väändekandevõime $T_{Rd,sl}$ tagamiseks vajaliku täiendava pikiarmatuuri ristlõikepindala

$$\Sigma A_{sl} \geq \frac{T_{Rd,sl} u_k \cot \theta}{2A_k f_{yd}} \quad (10.240)$$

Valemites (10.237)...(10.240)

A_{sw} ühe rangi ristlõikepindala

ΣA_{sl} väände vastuvõtmiseks vajalik täiendava pikiarmatuuri kogu ristlõikepindala

s rangide samm

f_{ywd} rangide arvutustugevus

f_{yd} pikiarmatuuri A_{sl} arvutustugevus

θ ja $T_{Rd,s} = T_{Rd,sl}$ suuruse antud armeerimise korral võib määrata valemitega

$$\tan^2 \theta = \frac{A_{sw} f_{ywd} u_k}{\Sigma A_{sl} f_{yd} s} \quad (10.241)$$

$$T_{Rd,s} = T_{Rd,sl} = 2A_k \sqrt{\frac{A_{sw} f_{ywd} \Sigma A_{sl} f_{yd}}{s u_k}} \quad (10.242)$$

Lõplikuks väändekandevõimeks T_{Rd} võetakse väiksem valemitega (10.237) ja (10.242) arvutatud kandevõimetest. Kui avaldisest (10.241) saadud $\cot \theta$ ei ole piirides 1...2,5, siis tuleks tema suuruseks võtta lähima piiri väärtus (s.o 1,0 või 2,5) ja väändekandevõime määrata valemitega (10.238)...(10.240).

Väändearmatuuri dimensioonimine

Esmalt kontrollitakse tingimust (10.234), leides $T_{Rd,max}$ valemiga (10.237).

Vajalik väänderangide intensiivsus

$$a_{sw,T} = \frac{A_{sw}}{s} = \frac{T_{Ed}}{2A_k f_{ywd} \cot \theta} \quad (10.243)$$

ja pikiarmatuuri ristlõike kogupindala

$$\Sigma A_{sl} = \frac{T_{Ed} u_k \cot \theta}{2A_k f_{yd}} \quad (10.244)$$

Tõmbejõu resultandi $F_s = \Sigma A_{sl} f_{yd}$ rakenduskohtaks võetakse õõnsa ekvivalentristlõike raskuskese. Tegelik ristlõike igas nurgas peab olema vähemalt üks pikivarras.