

Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan

Osa 5. Pilarit

Johdanto

Eurokoodien käyttöönotto kantavien rakenteiden suunnittelussa on merkittävin suunnitteluohjeita koskeva muutos kautta aikojen. Koko Eurooppa on siirtymässä vuonna 2010 yhteisiin rakenteiden suunnitteluohjeisiin, jolloin lähes kaikista kansallisista suunnitteluohjeista ja standardeista luovutaan.

Tämä julkaisu on osa opassarjaa ”Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan”. Oppaiden avulla pyritään helpottamaan siirtymistä eurokoodimitoitukseen betonirakenteiden suunnittelussa. Oppaissa on koottu yhteen tyyppillisten betonirakenteiden suunnittelussa tarvittavat avaintiedot ja selitykset.

Tämä julkaisusarja on laadittu alun perin Englannissa, ja sen on julkaissut UK Concrete Centre. European Concrete Platform (www.europeanconcrete.eu/) on hankkinut julkaisu-oikeudet ja luovuttanut ne eurooppalaisten betoni- ja sementtiteollisuusjärjestöjen (BIBM, Cembureau, ERMCO, EFCA) kansallisille jäsenjärjestöille. RTT Betonitoimiala on kääntänyt oppaat suomeksi ja muuttanut ne Suomen kansallisten liitteiden mukaisiksi. Työ on rahoitettu osittain Rakennustuotteiden Laatu -säätöön tuella.



Suunnittelu eurokoodin EN 1992 mukaisesti

Tässä oppaassa on esitetty pilarien ja seinien mitoitus eurokoodin EN 1992¹ mukaisesti. Oppaassa on kuvattu mitoitusmenettely sekä selitetään eurokoodin EN 1992 sääntöjä.

Eurokoodissa EN 1992 ei ole esitetty poikkileikkauksen mitoituksessa tarvittavia kaavoja. Euroopassa on ollut käytäntönä antaa periaatesäännöt normeissa ja yksityiskohtainen soveltaminen esitetään muissa tietolähteissä kuten oppi- ja käsikirjoissa.

Tämän opassarjan ensimmäisessä osassa ”Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Eurokoodimitoituksen perusteet”² on yleiskatsaus eurokoodimitoituksen perusteista sekä lyhyt sanasto käytetyistä termeistä.

Kun tämän julkaisun tekstissä on kansallisia parametreja, käytetään Suomen kansallisia parametreja (<http://www.eurocodes.fi/>).

Mitoitusmenettely

Sivusiirtymättömien (=jäykistettyjen) pilarien yksityiskohtainen mitoitusmenettely on esitetty taulukossa 1. Taulukossa 1 oletetaan, että pilarien mitat on aiemmin määritetty luonnossuunnitteluvaiheessa likimääräisillä menetelmillä. Taulukon 1 vaiheet 1...4 on esitetty tämän opassarjan aiemmissa oppaissa, joten seuraavaksi käsitellään palonkestävyyttä.

Palonkestävyys

Eurokoodissa EN 1992-1-2 ”Rakenteiden palomitoitus”³ on pilarien palonkestävyyden määrittämisen vaihtoehtoina kehittyneet laskentamenetelmät, yksinkertaistetut laskentamenetelmät tai taulukkomitoitus. Taulukkomitoitus on yksinkertaisin menetelmä pilarien vähimmäismittojen ja -betonipeitteiden määrittämiseen. Taulukkomitoitusta koskevat rajoitukset on otettava huomioon ja lisäohjeita on tarvittaessa etsittävä alan kirjallisuudessa. Suomessa on esimerkiksi julkaistu erillinen ohje mastopilareiden palomitoituksesta. Laskentamenetelmän avulla voidaan päästä taloudellisempiin pilareihin, erityisesti kun kyseessä ovat pienet poikkileikkaukset tai pitkät palonkestävyyssajat.

Taulukkomitoitus perustuu keskiöetäisyyden a nimellisarvoihin vähimmäisbetonipeitteen sijasta (ks. kuva 1). Keskiöetäisyys on pääraudoitustangon keskikohdan ja pilarin pinnan välinen etäisyys. Se on nimellismitta (ei vähimmäismitta), ja suunnittelija varmistaa, että

$$a = c_{\text{nom}} + \phi_{\text{haka}} + \phi_{\text{päätanko}}/2 \geq a_{\text{vaad}}$$

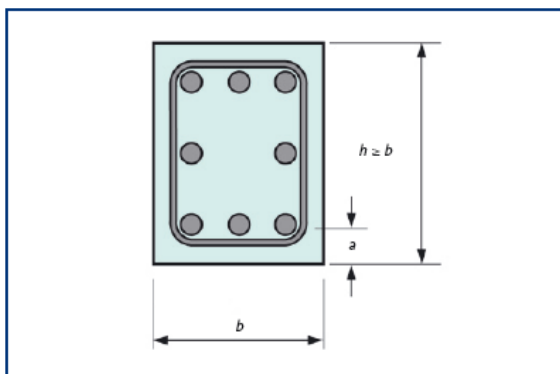
Eurokoodissa EN 1992-1-2 on pilareille kaksi taulukkoa, joissa esitetään menetelmät A ja B. Nämä menetelmät ovat yhtä käyttökelpoisia, vaikka menetelmässä A on suppeammat rajat epäkeskisyydelle kuin menetelmässä B. Menetelmään B liittyviä lisätaulukoita on eurokoodin EN 1992-1-2 liitteessä C. Menetelmän A käyttöaluetta on laajennettu eurokoodissa EN 1992-1-2 esitetyllä empiirisellä kaavalla (5.7).

Taulukko 1 Pilarin mitoitusmenettely

| Vaihe | Tehtävä | Lisäohjeita | |
|-------|---|---|--|
| | | Opasrja "Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan" | Standardi |
| 1 | Määritetään suunniteltu käyttöikä | Betonirakenteiden suunnitteluperusteet | SFS-EN 1990:n taulukko 2.1 |
| 2 | Arvioidaan pilariin kohdistuvat kuormat | Betonirakenteiden suunnitteluperusteet | SFS-EN 1991 (10 osaa) ja niiden kansalliset liitteet |
| 3 | Määritetään kuormayhdistelmät | Eurokoodimitoituksen perusteet | SFS-EN 1990:n kansallinen liite |
| 4 | Arvioidaan säilyvyysvaatimukset ja määritetään betonin lujuusluokka | Betonirakenteiden suunnitteluperusteet | SFS-EN 206-1 ja sen kansallinen liite |
| 5 | Tarkistetaan betonipeitteen vaatimukset palonkestävyyssajan perusteella | Betonirakenteiden suunnitteluperusteet ja tämän oppaan taulukko 2 | SFS-EN 1992-1-2 |
| 6 | Lasketaan vähimmäisbetonipeite säilyvyys- ja tartuntavaatimusten kannalta | Betonirakenteiden suunnitteluperusteet | SFS-EN 1992-1-1 kohta 4.4.1 |
| 7 | Tarkastellaan rakennetta kriittisten momenttien ja normaalivoimien löytämiseksi | Betonirakenteiden suunnitteluperusteet ja tämän oppaan kohta "Rakenteiden analyysi" | SFS-EN 1992-1-1 kohta 5 |
| 8 | Tarkistetaan hoikkuus | Ks. tämän oppaan kuvat 2 ja 3 | SFS-EN 1992-1-1 kohta 5.8 |
| 9 | Määritetään vaaditun raudoituksen poikkileikkauksen pinta-ala | Ks. tämän oppaan kuvat 2 ja 3 | SFS-EN 1992-1-1 kohta 6.1 |
| 10 | Tarkistetaan tankojako | Tämän oppaan kohta "Raudoituksen jakovälin säännöt" | SFS-EN 1992-1-1 kohdat 8 ja 9 |

Taulukossa 2 esitetty menetelmä A on menetelmistä hieman yksinkertaisempi. Sen soveltamisalueen rajat on annettu taulukon alahuomautuksissa. Kantavien seinien vastaavat tiedot on esitetty taulukossa 3.

Ylimmän kerroksen pilarien epäkeskisyyttä ylittää usein menetelmien A ja B soveltamisalueen rajat. Tällöin voidaan käyttää eurokoodin EN 1992-1-2 liitettä C tai vaihtoehtoisesti pilaria voidaan käsitellä kuten palkkia palonkestävyyttä määritettäessä.



Kuva 1 Rakenneosan poikkileikkaus, jossa on esitetty nimellinen keskiöetäisyys a .

Taulukko 2 Pilarien vähimmäismitat ja -keskiöetäisyydet palonkestävyyden kannalta.

| Standardipalonkestävyys | Vähimmäismitat (mm) | | | |
|-------------------------|---|--|--|----------------------------------|
| | Pilarin leveys b_{min} / pääterästen keskiöetäisyys a | | | |
| | Pilarin altistus useammalta kuin yhdeltä sivulta | | | Pilarin altistus yhdeltä sivulta |
| | $\mu_{fi} = 0,2$ | $\mu_{fi} = 0,5$ | $\mu_{fi} = 0,7$ | $\mu_{fi} = 0,7$ |
| R 30 | 200/25 | 200/25 | 200/32 300/27 | 155/25 |
| R 60 | 200/25 | 200/36 300/31 | 250/46 350/40 | 155/25 |
| R 90 | 200/31 300/25 | 300/45 400/38 | 350/53 450/40 ^a | 155/25 |
| R 120 | 250/40 350/35 | 350/45 ^a 450/40 ^a | 350/57 ^a 450/51 ^a | 175/35 |
| R 180 | 350/45 ^a | 350/63 ^a | 450/70 ^a | 230/55 |
| R 240 | 350/61 ^a | 450/75 ^a | — | 295/70 |

Huomautukset
Tämä taulukko on sama kuin eurokoodin SFS-EN 1992-1-2 taulukko 5.2a (menetelmä A) ja on voimassa seuraavilla ehdoilla:
1 Sivusiirtymättömän (=jäykistety) pilarin nurjahduspituus palotilanteessa $l_{o,fi} \leq 3$ m. Arvona $l_{o,fi}$ voidaan pitää 50 % todellisesta pituudesta välikerroksille ja 50...70 % todellisesta pituudesta ylimmän kerroksen pilarille
2 Ensimmäisen kertaluvun epäkeskisyys palotilanteessa tulisi olla $\leq 0,4b$ (tai h). Vaihtoehtoisesti käytetään menetelmää B (ks. eurokoodi EN 1992 osa 1-2, taulukko 5.2b). Epäkeskisyys palotilanteessa voidaan pitää samaa arvoa kuin mitoitusarvo normaalilämpötilassa.
3 Raudituksen poikkileikkauksen pinta-ala limityskohtien ulkopuolella on korkeintaan 4 % betonin poikkileikkauksen pinta-alasta.
4 μ_{fi} on normaalivoiman mitoitusarvo palotilanteessa jaettuna pilarin kestävyuden mitoitusarvolla normaalilämpötilassa. Varmalla puolella olevaksi $\mu_{fi,n}$ arvoksi voidaan ottaa 0,7.

Merkinnät
a Vähintään 8 tankoa

Taulukko 3 Kantavien betoniseinien vähimmäismitat ja -keskiöetäisyydet, menetelmä A

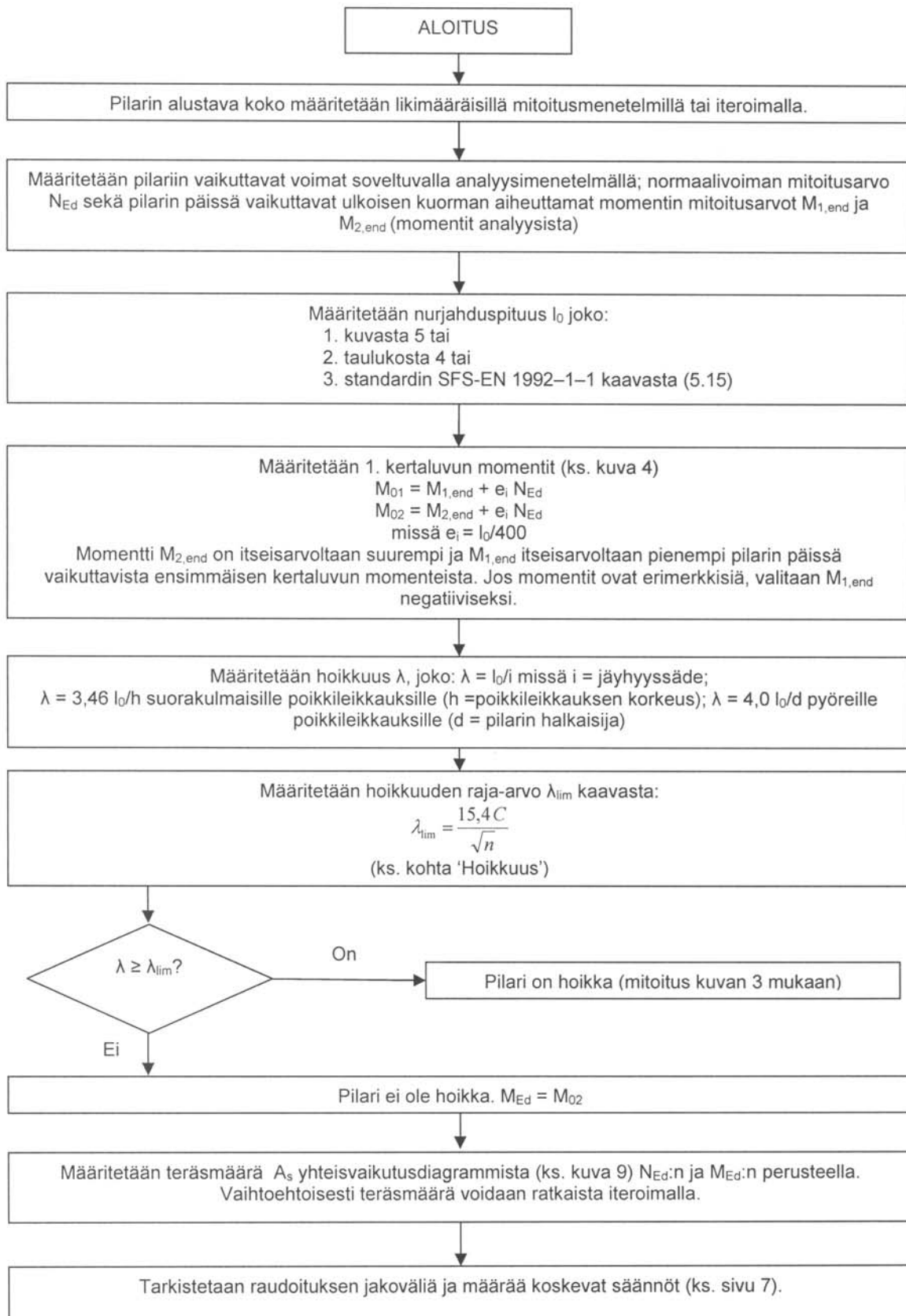
| Standardipalonkestävyys | Vähimmäismitat (mm) | | | |
|-------------------------|---|---|--|--|
| | Seinän paksuus / päätankojen keskiöetäisyys a | | | |
| | Seinän altistus toiselta puolelta ($\mu_{fi} = 0,35$) | Seinän altistus molemmilta puolilta ($\mu_{fi} = 0,35$) | Seinän altistus toiselta puolelta ($\mu_{fi} = 0,7$) | Seinän altistus molemmilta puolilta ($\mu_{fi} = 0,7$) |
| REI 60 | 110/10 ^a | 120/10 ^a | 130/10 ^a | 140/10 ^a |
| REI 90 | 120/20 ^a | 140/10 ^a | 140/25 | 170/25 |
| REI 120 | 150/25 | 160/25 | 160/35 | 220/35 |
| REI 180 | 180/40 | 200/45 | 210/50 | 270/55 |
| REI 240 | 230/55 | 250/55 | 270/60 | 350/60 |

Huomautukset
1 Tämä taulukko on perustuu standardin EN 1992-1-2 taulukkoon 5.4.
2 Ks. taulukon 2 huomautus 4.

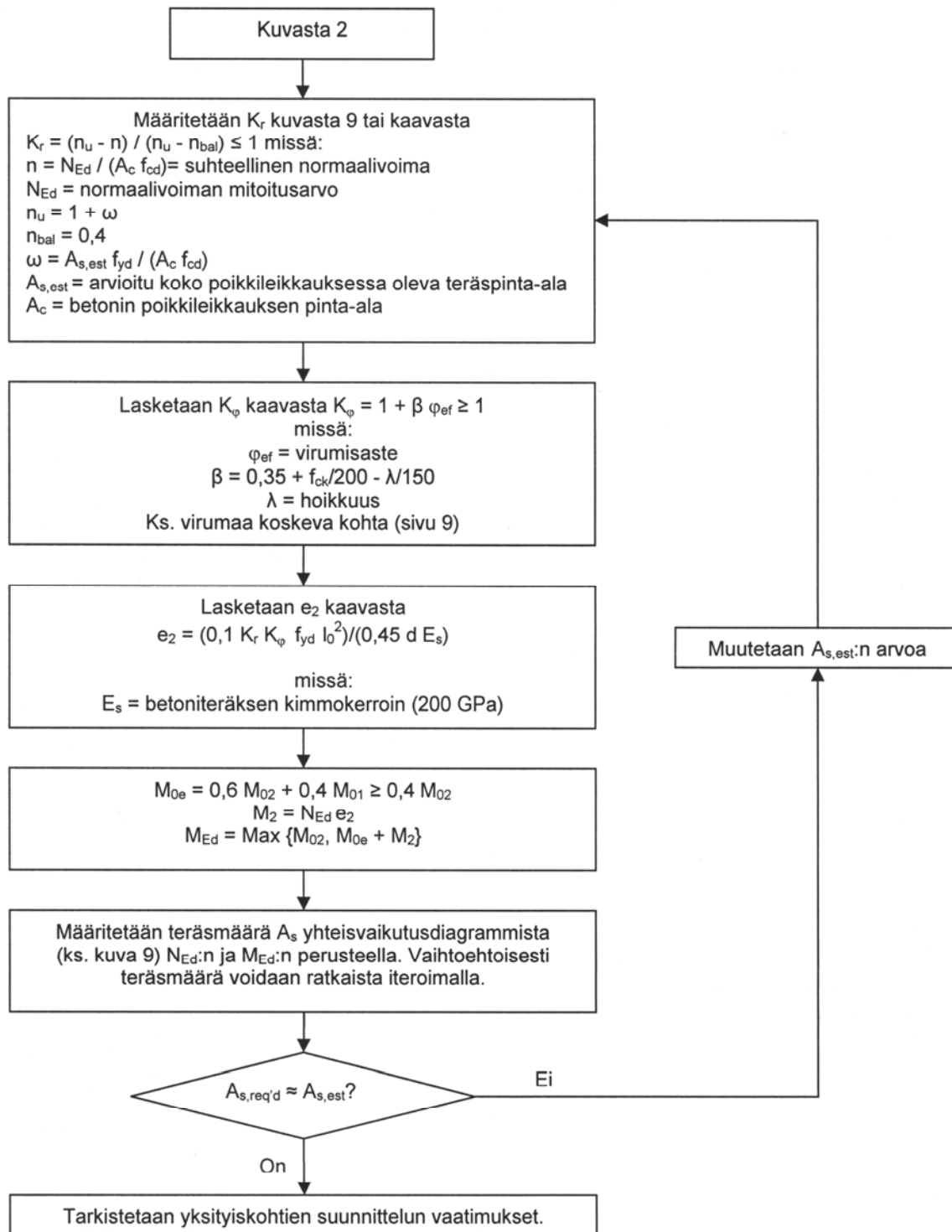
Merkintä
a Tavallisesti standardin EN 1992-1-1 edellyttämä betonipeitteen paksuus on määräävä

Pilarin mitoitus

Sivusiirtymättömän (=jäykistety) pilarin mitoituksen vuokaavio on kuvassa 2. Hoikkien pilarien mitoituksessa tarvitaan myös kuva 3.



Kuva 2 Sivusiirtymättömän (=jäykistety) pilarin mitoituksen vuokaavio



Kuva 3 Hoikkien pilareiden mitoituksen vuokaavio (nimelliseen kaarevuuteen perustuva menetelmä)

Rakenteiden analyysi

Käytetyn analyysityypin tulee soveltua tarkasteltavaan rakenteeseen. Betonirakenteiden mitoituksessa voidaan käyttää seuraavia menetelmiä: lineaarisen kimmoteorian mukainen analyysi, lineaarisen kimmoteorian mukainen analyysi rajoitetulla momenttien uudelleen jakautumisella, plastisuusteorian mukainen analyysi ja epälineaarinen analyysi.

Lineaarisen kimmoteorian mukaisessa analyysissä voidaan olettaa, että betonipoikkileikkaus ovat halkeilematon, jännitys-muodonmuutosyhteys on lineaarinen ja kimmokertoimenä käytetään keskimääräistä pitkäaikaiskimmokerrointa. Pilarien mitoituksessa kimmoteorian mukaisia kehävaikutuksesta aiheutuvia momentteja käytetään ilman uudelleen jakautumista. Hoikkien pilareiden mitoituksessa käytetään epälineaarista ana-

lyysiä toisen kertaluvun momenttien määrittämiseen. Vaihtoehtoisesti toisen kertaluvun vaikutukset voidaan ottaa huomioon joko nimellisyäkkyteen perustuvalla menetelmällä (eurokoodin EN 1992-1-1 kohta 5.8.7.3) tai nimelliseen kaarevuuteen perustuvalla menetelmällä (eurokoodin EN 1992-1-1 kohta 5.8.8 tai kuva 3).

Mitoitusmomentit

Taivutusmomentin mitoitusarvo on esitetty kuvassa 4 ja määritetään seuraavasti:

$$M_{Ed} = \max \{M_{02}, M_{0e} + M_2\} \geq \max(h/30, 20 \text{ mm}) N_{Ed}$$

missä:

$$M_{0e} = 0,6 M_{02} + 0,4 M_{01} \geq 0,4 M_{02}$$

$$M_{01} = M_{1,end} + e_i N_{Ed}$$

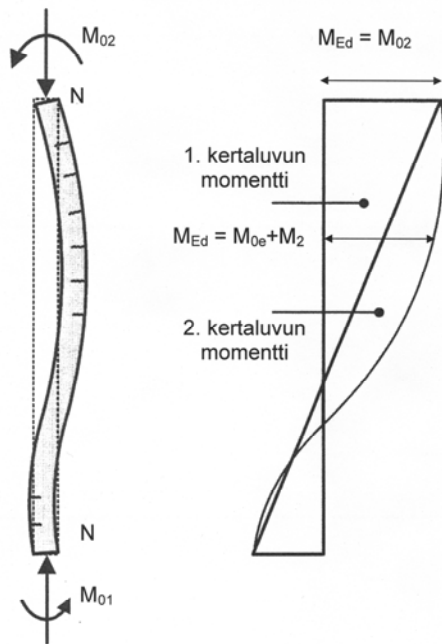
$$M_{02} = M_{2,end} + e_i N_{Ed}$$

$$e_i = l_0/400 \text{ (epätarkkuuden vaikutus)}$$

$$M_2 = N_{Ed} e_2, \text{ missä } N_{Ed} \text{ on normaalivoiman mitoitusarvo ja } e_2 \text{ on toisen kertaluvun vaikutusten aiheuttama taipuma}$$

Momentti $M_{2,end}$ on itseisarvoltaan suurempi ja $M_{1,end}$ itseisarvoltaan pienempi pilarin päissä vaikuttavista ensimmäisen kertaluvun momenteista, joissa ei ole otettu huomioon epätarkkuuden vaikutusta. Jos momentit ovat erimerkkisiä, valitaan $M_{1,end}$ negatiiviseksi.

Pilarin, jonka mitoituksessa ei tarvitse ottaa huomioon toisen kertaluvun vaikutuksia, mitoitusmomentti on $M_{Ed} = M_{02}$.



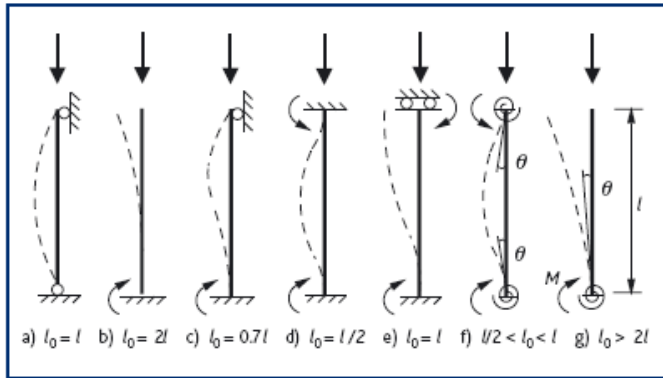
Kuva 4 Pilarin mitoitusmomentit

Epäkeskisyttä e_2 laskettaessa joudutaan pilarin rauditusmäärä arvioimaan ja laskenta johtaa tällöin yleensä iteraatioon. Ohjeita laskennasta esitetään kuvassa 3.

Nurjahduspituus

Kuvassa 5 on esitetty pilarin nurjahduspituus eri tuentatapauksissa. Todellisissa rakenteissa voidaan soveltaa yleensä ainoastaan kuvia 5f ja 5g. Eurokoodissa EN 1992-1-1 on esitetty kaksi kaavaa näiden tapausten laskentaa varten. Kaava (5.15) on sivusiirtymättömälle (=jäykistetylle) ja (5.16) sivusiirtyvälle (=jäykistämättömälle) ulokepilarille.

Kummassakin kaavassa lasketaan päiden kiertymäjoustavuuksien k_1 ja k_2 suhteelliset arvot. Eurokoodissa olevassa k :n laskennassa käytetyssä kaavassa, otetaan huomioon nurkan kiertymä kiinnitysmomentin vaikutuksesta. Sauvojen jäykkyyttä laskettaessa otetaan huomioon myös mahdollinen halkeilun vaikutus.



Kuva 5 Pilarin nurjahduspituus

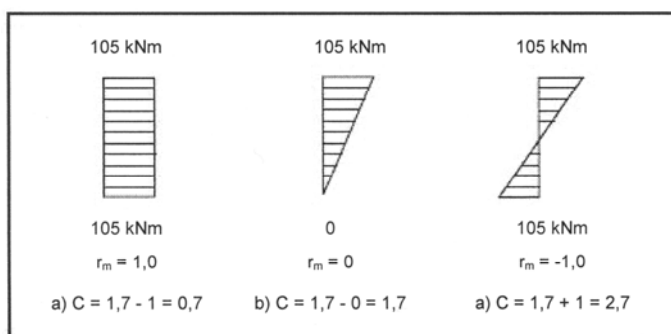
Kun k_1 ja k_2 on laskettu, sivusiirtymättömän pilarin nurjahduspituuden kerroin F saadaan taulukosta 4. Tällöin nurjahduspituus on $l_0 = F l$.

Esimerkiksi poikkileikkaukseltaan neliömäiselle 400 mm:n välipilarille, joka tukee 250 mm paksua pilari-laattaa 7,5 m:n ruudukossa, k :n arvo on 0,11 ja siten $l_0 = 0,59 \times l$. Reunapilarin k kasvaa kaksinkertaiseksi ja $l_0 = 0,67 \times l$. Jos välipilarin alapää ajatellaan nivelellisesti tuetuksi, niin tehollinen pituus on $l_0 = 0,77 \times l$.

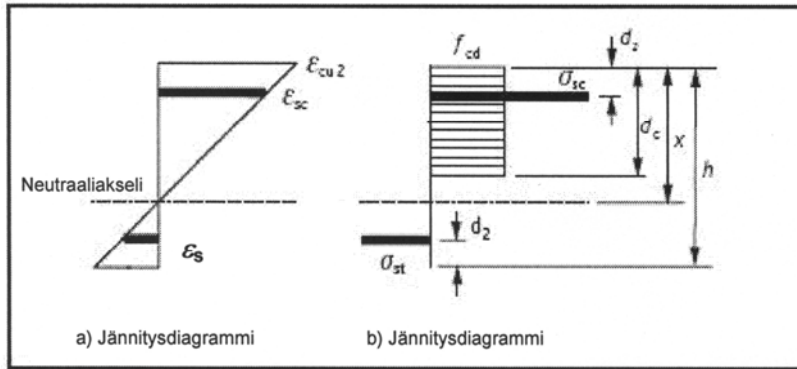
Kaavat (5.15) ja (5.16) on helppo lisätä myös mitoitusohjelmistoihin.

Taulukko 4 Sivusiirtymättömän (=jäykistety) pilarin nurjahduspituuden kerroin F

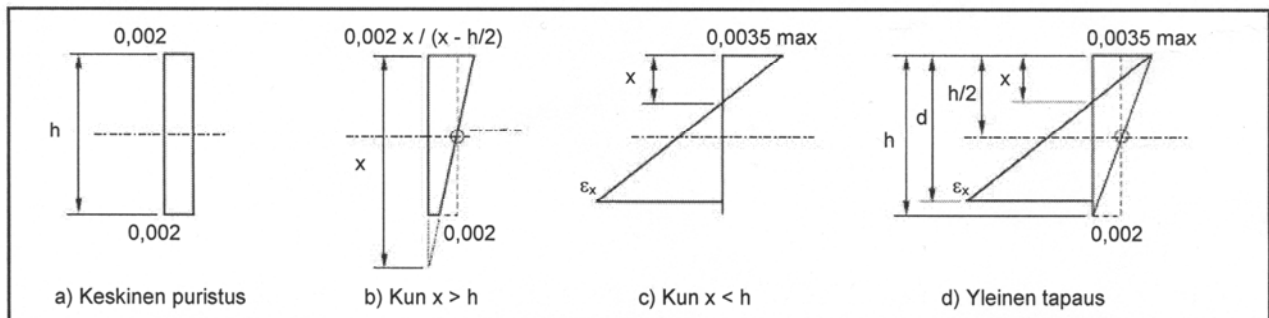
| k2 | k1 | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,70 | 1,00 | 2,00 | 5,00 | 9,00 | nivel |
| 0,10 | 0,59 | 0,62 | 0,64 | 0,66 | 0,67 | 0,69 | 0,71 | 0,73 | 0,75 | 0,76 | 0,77 |
| 0,20 | 0,62 | 0,65 | 0,68 | 0,69 | 0,71 | 0,73 | 0,74 | 0,77 | 0,79 | 0,80 | 0,81 |
| 0,30 | 0,64 | 0,68 | 0,70 | 0,72 | 0,73 | 0,75 | 0,77 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,84 |
| 0,40 | 0,66 | 0,69 | 0,72 | 0,74 | 0,75 | 0,77 | 0,79 | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,86 |
| 0,50 | 0,67 | 0,71 | 0,73 | 0,75 | 0,76 | 0,78 | 0,80 | 0,83 | 0,86 | 0,86 | 0,87 |
| 0,70 | 0,69 | 0,73 | 0,75 | 0,77 | 0,78 | 0,80 | 0,82 | 0,85 | 0,88 | 0,89 | 0,90 |
| 1,00 | 0,71 | 0,74 | 0,77 | 0,79 | 0,80 | 0,82 | 0,84 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 0,92 |
| 2,00 | 0,73 | 0,77 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,85 | 0,88 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,95 |
| 5,00 | 0,75 | 0,79 | 0,82 | 0,84 | 0,86 | 0,88 | 0,90 | 0,93 | 0,96 | 0,97 | 0,98 |
| 9,00 | 0,76 | 0,80 | 0,83 | 0,85 | 0,86 | 0,89 | 0,91 | 0,94 | 0,97 | 0,98 | 0,99 |
| nivel | 0,77 | 0,81 | 0,84 | 0,86 | 0,87 | 0,90 | 0,92 | 0,95 | 0,98 | 0,99 | 1,00 |



Kuva 6 Esimerkki kertoimen C määrittämisestä erilaisilla momenttipinnan muodoilla



Kuva 7 Pilarin yksinkertaistettu jännitys jakauma



Kuva 8 Pilaripoikkileikkauksen suhteelliset muodonmuutokset

Hoikkuus

Eurokoodissa EN 1992-1-1 todetaan, että toisen kertaluvun vaikutuksia ei tarvitse ottaa huomioon, jos ne ovat alle 10 % ensimmäisen kertaluvun vaikutuksista. Vaihtoehtoisesti jos hoikkuus λ on pienempi kuin hoikkouden raja-arvo λ_{lim} , toisen kertaluvun vaikutukset voidaan jättää huomiotta.

Hoikkuus määritetään kaavasta $\lambda = l_0/i$, missä i on jäyhyyssäde. Hoikkouden raja-arvo saadaan kaavasta

$$\lambda_{lim} = \frac{20ABC}{\sqrt{n}} \leq \frac{15,4C}{\sqrt{n}}$$

missä

$A = 1/(1+0,2 \varphi_{ef})$ (jos virumisastetta φ_{ef} ei tunneta, voidaan käyttää arvoa $A = 0,7$)

$B = \sqrt{1+2\omega}$ (jos mekaanista raudoitussuhdetta ω ei tunneta, voidaan käyttää arvoa $B = 1,1$)

$C = 1,7 - r_m$ (jos päätemomenttien suhdetta r_m ei tunneta, voidaan käyttää arvoa $C = 0,7$)

$n = N_{Ed} / (A_c f_{cd})$

$r_m = M_{01}/M_{02}$

Jos momentit M_{01} ja M_{02} aiheuttavat venymän rakenteen samalle puolelle, suhde r_m on positiivinen.

Kolmesta kertoimesta A, B ja C, C:llä on suurin vaikutus hoikkouden raja-arvoon λ_{lim} . Kerroin C on myös helppoin laskettava. Tästä syystä alustava λ_{lim} :n arviointi tehdä voidaan A:n ja B:n oletusarvoilla, mutta laske-malla C (ks. kuva 6). C:n määrittämisessä on oltava huolellinen, koska momenttien etumerkeillä on suuri vaikutus. Sivusiirtyville (=jäykistämättömille) rakenneosille käytetään aina arvoa $C = 0,7$.

Pilarin kestävyuden mitoitusarvo

Palkkien mitoituksessa (ks. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan: Palkit⁴) käytettyä suorakai-teen muotoista jännitys jakaumaa voidaan käyttää myös pilarien mitoituksessa (ks. kuva 7). Betonin lujuus-luokalle C50/60 ja sitä pienemmille luokille suurin kokoonpuristuma on 2 ‰, kun koko poikkileikkaus on kes-kisesti puristettuna (ks. kuva 8a). Kun piste, jossa suhteellinen muodonmuutos on nolla, on poikki-leikkauksen ulkopuolella (ks. kuva 8b), suurimman sallitun kokoonpuristuman oletetaan olevan välillä 2 ‰ – 3,5 ‰. Muodonmuutoskuvio määritetään piirtämällä viiva suhteellisen muodonmuutoksen nollapisteestä poikkileikkauksen painopisteessä sallitun kokoonpuristuma-arvon 2 ‰ kautta. Kun suhteellisen muodonmuu-toksen nollapiste on poikkileikkauksen **sisällä**, suurin kokoonpuristuma poikkileikkauksen reunalla on 3,5 ‰

(ks. kuva 8c).

Yleinen tapaus esitetään kuvassa 8d. Betonin lujuusluokkaa C50/60 suurempien luokkien periaate ovat sama, mutta maksimikoonpuristuman arvot ovat erilaisia.

Normaalivoiman ja momentin rasittaman poikkileikkauksen yhdessä pinnassa olevien terästen poikkipinta-alan laskentaa varten voidaan johtaa seuraavat kaavat (oletetaan suorakaiteen muotoinen jännitysjaakauma, ks. kuva 8):

$$A_{sN}/2 = (N_{Ed} - f_{cd} b d_c) / (\sigma_{sc} - \sigma_{st})$$

missä:

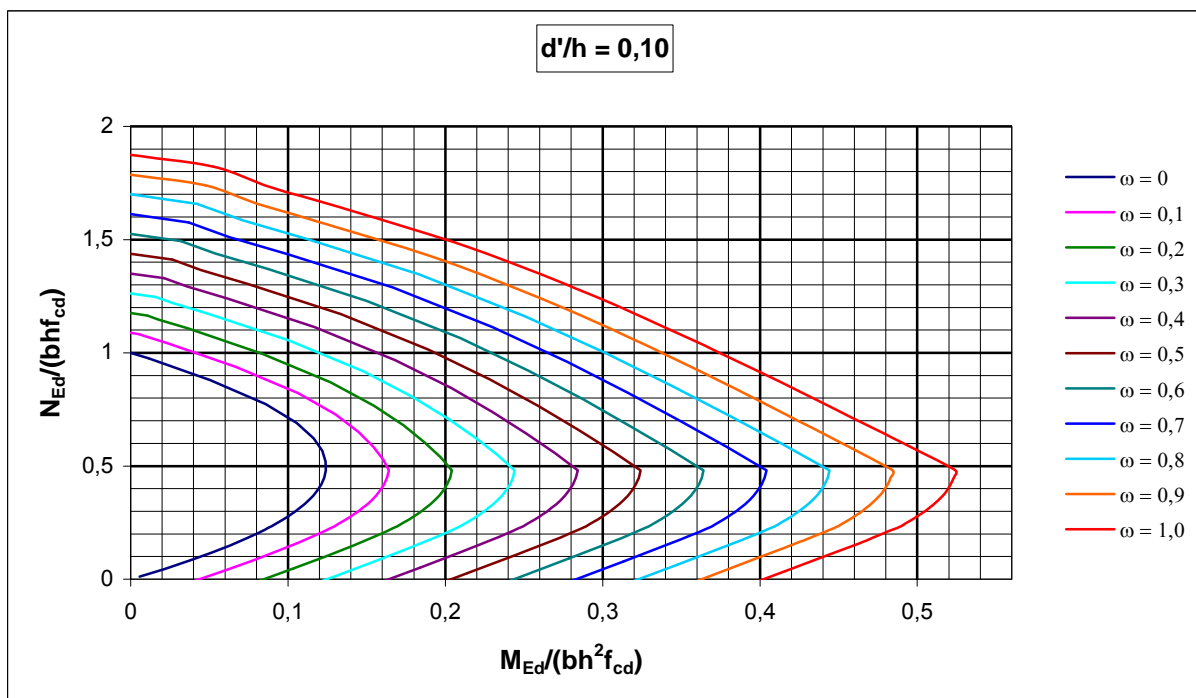
- A_{sN} = normaalivoimakestävyyden edellyttämä raudoituksen poikkileikkauksen kokonaispinta-ala
- N_{Ed} = normaalivoiman mitoitusarvo
- f_{cd} = betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
- $\sigma_{sc} (\sigma_{st})$ = puristusraudoituksen (vetoraudoituksen) jännitys
- b = poikkileikkauksen leveys
- d_c = puristuspinnan tehollinen korkeus = $\lambda x \leq h$
- λ = 0,8 betonin lujuusluokille $\leq C50/60$
- x = puristuspinnan korkeus
- h = poikkileikkauksen korkeus

$$A_{sM}/2 = [M - f_{cd} b d_c (h/2 - d_c/2)] / [(h/2 - d_c/2) (\sigma_{sc} + \sigma_{st})]$$

missä:

A_{sM} = momenttikestävyyden edellyttämä raudoituksen kokonaispinta-ala

Käytännössä nämä yhtälöt voidaan ratkaista vain iteroimalla, jolloin tarvitaan joko tietokoneohjelmia tai yhteisvaikutusdiagrammeja teräsmäärän laskentaa varten (ks. kuva 9 ja liite 1). Yhteisvaikutusdiagrammista saadaan koko pilarin teräsmäärä suhteellisen normaalivoiman ja momentin avulla kaavasta $A_s = \omega b h f_{cd} / f_{yd}$.



Kuva 9 Pilarin yhteisvaikutusdiagrammi

Viruma

Hoikan pilarin mitoituksessa joudutaan määrittämään virumisaste ϕ_{ef} (eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 kohdat 3.1.4 ja 5.8.4). Kuvassa 10 olevaa nomogrammia käytettäessä täytyy tietää betonin valmistuksessa käytetty sementtityyppi. Suunnitteluvaiheessa voidaan yleensä olettaa sementtityypiksi N.

Virumisaste lasketaan kaavalla:

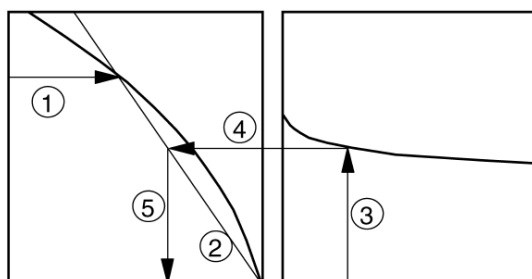
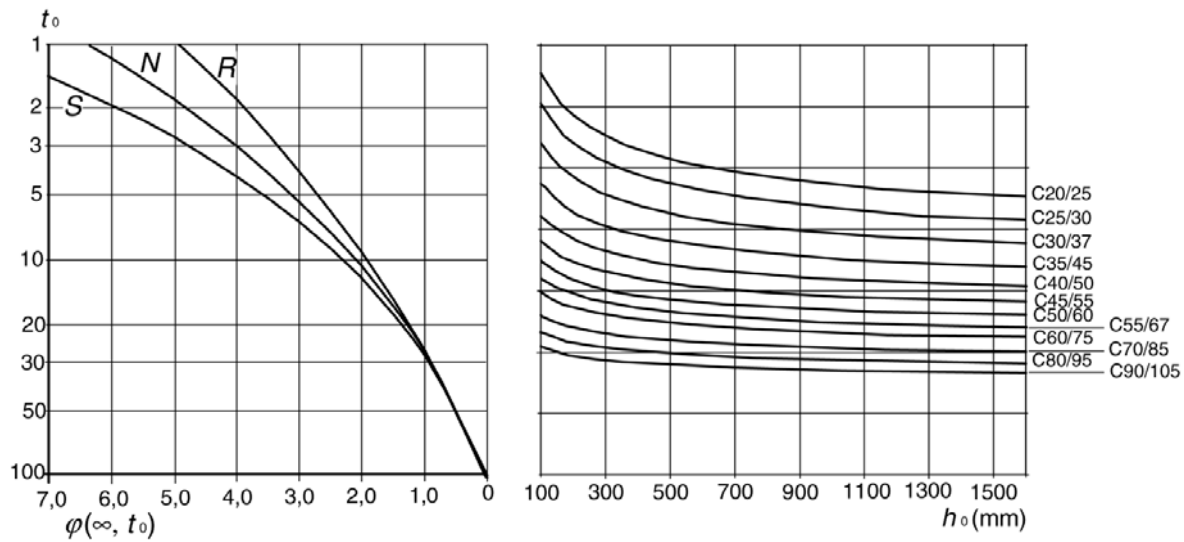
$$\varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}}$$

jossa

$\varphi(\infty, t_0)$ = virumaluku

M_{0Eqp} = lineaarisen laskennan mukainen momentti käyttörajatilassa pitkäaikaisyhdistelmällä

M_{0Ed} = lineaarisen laskennan mukainen taivutusmomentti murtorajatilassa



HUOM.

- Käyrien 4 ja 5 välinen leikkauspiste voi olla myös pisteen 1 yläpuolella.
- Kun $t_0 > 100$, saavutetaan riittävä tarkkuus, kun oletetaan $t_0 = 100$ (ja käytetään tangenttiviivaa).

Kuva 10 Virumaluku normaalissa ympäristöolosuhteessa sisätiloissa (RH=50%)¹

Vino taivutus

Jos vino taivutus joudutaan tarkistamaan, niin se tehdään eurokoodin EN 1992-1-1 kaavalla (5.39)

$$\left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}} \right)^a + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}} \right)^a \leq 1,0$$

missä

$M_{edz,y}$ = hoikan pilarin toisen kertaluvun vaikutuksesta aiheutuvan lisän sisältävä mitoitusmomentti asianomaisen akselin suhteen

$M_{Rdz,y}$ = taivutuskestävyys vastaavan suunnan momentin suhteen

a = 2 ympyrän- ja ellipsinmuotoisille poikkileikkauksille. Suorakaiteenmuotoisten poikkileikkausten osalta viitataan taulukkoon 5.

N_{Rd} = $A_c f_{cd} + A_s f_{yd}$

Taulukko 5 Eksponentin a arvot suorakaidepoikkileikkauksille

| | | | |
|---|-----|-----|-----|
| N_{Ed}/N_{Rd} | 0,1 | 0,7 | 1,0 |
| a | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| Huomautus | | | |
| Lineaarista interpolointia voidaan käyttää. | | | |

Sivusiirtyvät (=jäykistämättömät) pilarit

Eurokoodissa EN 1992-1-1 ei ole käsitelty sivusiirtyvän kehän mitoitus. Jäykistämättömien rakenneosien tehollisesta pituudesta on ohjeita Eurokoodin EN 1992 kaavassa (5.16). Kaavassa (5.13N) käytetään arvoa $C = 0,7$. Mitoitusmomentit määritetään siten, että niihin sisältyy toisen kertaluvun vaikutukset.

Eurokoodissa EN 1992-1-2 esitetystä palonkestävyyden taulukkomitoituksessa ei käsitellä ulokepilareita. Mitoitus voidaan tehdä Suomessa laaditun erillisen ohjeen mukaan (Teräsbetonisen mastopilarin palo- mitoitusohje). Ohjeen voi ladata ilmaiseksi osoitteesta www.betoni.com.

Seinät

Kun pystysuoran rakenneosan poikkileikkauksen pituus on neljä kertaa suurempi kuin paksuus, se määritellään seinäksi. Seinien mitoitus ei poikkea merkittävästi pilarista seuraavia seikkoja lukuun ottamatta:

- palonkestävyys (ks. taulukko 3)
- taivutus on kriittinen vain heikomman akselin suhteen
- raudoituksen jakovälin ja määrän säännöt ovat erilaiset (ks. alla oleva teksti)

Taivutuksesta vahvemman akselin vakavuuden osalta ei ole erityissuosituksia. Eurokoodin EN 1992-1-1 kohdan 6.5 mukaista ristikkomenetelmää voidaan käyttää.

Raudoituksen jakovälin ja määrän säännöt

Raudoituksen enimmäispinta-alat

Suomessa pilareissa ja seinissä olevan raudoituksen pinta-alan nimellinen enimmäismäärä limityskohtien ulkopuolella on 6 % poikkileikkauksen pinta-alasta. Ahtaissa paikoissa voidaan tarvittaessa käyttää itse-tiivistyvää betonia, jolloin varmistetaan se, että betoni peittää raudoitustangot joka puolelta.

Raudoituksen vähimmäispinta-ala ja minimitankokoko

Pilareissa pääraudoituksen suositeltava vähimmäishalkaisija on 8 mm. Pääraudoituksen poikkileikkauksen vähimmäispinta-ala saadaan Eurokoodin EN 1992-1-1 kaavasta (9.12N): $A_{s,min} = 0,10 N_{Ed}/f_{yd}$ tai $0,002A_c$ sen mukaan, kumpi on suurempi. Poikittaisraudoituksen halkaisijan tulee olla vähintään 6 mm tai neljäsosa pitkittäisterästen suurimmasta halkaisijasta.

Pilarien raudoituksen jakovälin säännöt

Pilarien hakaraudoituksen enimmäisväli eurokoodin EN 1992-1-1 kohdan 9.5.3(3) mukaisesti saa olla korkeintaan:

- $15 \times$ päätangon pienin halkaisija
- pilarin pienin sivumitta
- 400 mm

Pilarin poikkileikkauksen suuremman sivumitan etäisyydellä palkin tai laatan ylä- tai alapuolella näitä jakovälejä pienennetään käyttämällä kerrointa 0,6.

Raudoitustankojen vapaan välin tulee olla suurempi kuin raudoitustangon halkaisija, kiviaineksen suurin rae-koko + 3 mm tai 20 mm.

Seinien erityisvaatimukset

Seinien pääraudoitustankojen poikkileikkauksen vähimmäispinta-ala lasketaan kaavasta $A_{s,min} = 0,002A_c$.

Kahden vierekkäisen pystytangon välisen etäisyyden tulee olla korkeintaan pienempi seuraavista arvoista: kolme kertaa seinän paksuus tai 400 mm.

Seinien vaakaraudoituksen vähimmäisala on suurempi seuraavista arvoista: 25 % pystyraudoituksesta tai $0,001 A_c$. Kun halkeilun rajoittaminen on tärkeää, varhaiset lämpötila- ja kutistumavaikutukset tulee ottaa erityisesti huomioon.

Merkintöjä

| Tunnus | Määritelmä | Arvo |
|------------------|--|---|
| $1/r_0$ | Referenssikaarevuus | $\varepsilon_{yd}/(0,45 d)$ |
| $1/r$ | Kaarevuus | $K_r K_\varphi 1/r_0$ |
| a | Keskiöetäisyys palonkestävyyden kannalta | |
| A | Hoikkuuden raja-arvon määrittämisessä käytettävä kerroin | $1 / (1+0,2 \varphi_{ef})$ |
| A_c | Betonin poikkileikkausala | bh |
| A_s | Pilarin raudoituksen kokonaispoikkileikkausala | |
| B | Hoikkuuden raja-arvon määrittämisessä käytettävä kerroin | |
| c | Kokonaiskaarevuuden jakautumasta riippuva kerroin | 10 (vakiopoikkileikkaukselle) |
| C | Hoikkuuden raja-arvon määrittämisessä käytettävä kerroin | $1,7 - r_m$ |
| d | Tehollinen korkeus | |
| e_2 | Toisen kertaluvun epäkeskisyys | $(1/r)l_0/c$ |
| e_i | Geometristen epätarkkuuksien aiheuttama epäkeskisyys | |
| E_s | Betoniteräksen kimmokerroin | 200 GPa |
| f_{cd} | Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo | $\alpha_{cc} f_{ck}/\gamma_c$ |
| f_{ck} | Betonin lieriölujuuden ominaisarvo | |
| l | Puristussauvan vapaa pituus kiinnityskohtien välillä | |
| l_0 | Nurjahduspituus | |
| K_r | Korjauskerroin, joka riippuu normaalivoimasta | |
| K_φ | Viruman huomioon ottava kerroin | |
| M_{01}, M_{02} | Ensimmäisen kertaluvun päätementit, joihin sisältyy geometristen epätarkkuuksien vaikutus $ M_{02} \geq M_{01} $ | |
| M_2 | Toisen kertaluvun aiheuttama nimellinen lisämomentti | $N_{Ed} e_2$ |
| M_{0e} | Ensimmäisen kertaluvun ekvivalentti momentti | $0,6 M_{02} + 0,4 M_{01} \geq 0,4 M_{02}$ |
| M_{Ed} | Mitoitusmomentti | |

| Tunnus | Määritelmä | Arvo |
|------------------------|---|--|
| M_{0Eqp} | Ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti käyttörajatilassa pitkäaikaisyhdistelmällä | |
| n | Suhteellinen normaalivoima | $N_{Ed}/(A_c f_{cd})$ |
| n_{bal} | Suhteellisen normaalivoiman n arvo, kun taivutuskestävyydellä on maksimiarvo | 0,4 |
| n_u | Pilarin raudoituksen huomioiva kerroin | $1 + \omega$ |
| N_{Ed} | Normaalivoiman mitoitusarvo | |
| r_m | Momenttien suhde | M_{01}/M_{02} |
| x | Puristuspuunnan korkeus | $(d - z)/0,4$ |
| z | Momenttivarsi | |
| α_{cc} | Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät | 0,85 |
| β | Kerroin | $0,35 + f_{ck}/200 - \lambda/150$ |
| ε_{yd} | Raudoituksen myötövenymän mitoitusarvo | f_{yd}/E_s |
| γ_M | Materiaaliominaisuuksien osavarmuusluku | 1,15 raudoitukselle (γ_S) 1,5 betonille (γ_C) |
| λ | Hoikkuus | l_0/i |
| λ_{lim} | Hoikkuuden raja-arvo | |
| μ_{fi} | Hyväksikäyttöaste palotilanteessa | $N_{Ed,fi}/N_{Rd}$ |
| φ_{ef} | Virumisaste | $\varphi(\infty, t_0) M_{Eqp}/M_{Ed}$ |
| $\varphi(\infty, t_0)$ | Eurokoodin EN 1992-1-1 kohdan 3.1.4 mukainen virumaluvun loppuarvo | |
| ω | Mekaaninen raudoitussuhde | $A_s f_{yd}/(A_c f_{cd})$ |
| $ x $ | x :n itseisarvo | |
| Max. $\{x, y+z\}$ | Maksimiarvo x tai $y + z$ | |

Lisäoppaita ja -ohjeita

- Tähän sarjaan sisältyy oppaat: *Eurokoodimitoituksen perusteet, Betonirakenteiden suunnitteluperusteet, Laatat, Palkit, Pilarit, Perustukset, Pilarilaatat ja Taipuma*. Nämä oppaat, muiden julkaisujen yksityiskohtia ja lisätietoja voi ladata vapaasti kotisivuilta <http://www.betoni.com/> tai <http://www.eurocodes.fi/>
- Tietoja kaikista uusista eurokoodeista on kotisivuilla <http://www.eurocodes.fi/>

Viitteet

- 1 SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
- 2 RTT/betoni, Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan, Eurokoodimitoituksen perusteet
- 3 SFS-EN 1992-1-2 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus.
- 4 RTT/betoni, Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan, Palkit

Alkuperäisen oppaan ovat julkaisseet BCA ja The Concrete Centre in the UK. Julkaisun ovat kirjoittaneet R Moss BSc, PhD, DIC, CEng, MICE, MStructE ja O Brooker BEng, CEng, MICE, MStructE. Julkaisun ovat kääntäneet ja sovittaneet suomalaiseen käytäntöön Kari Silvennoinen, Tauno Hietanen ja Timo Tikanoja.

Julkaisija ja copyright: Rakennustuoteteollisuus RTT ry, betoniteollisuus -jaosto (seuraavassa RTT/betoni), 3.11.2009.

Kaikki oikeudet pidätetään. Tämän julkaisun sisällön tai sen osan kopioiminen, siirtäminen, jakelu tai tallentaminen missä muodossa tahansa on kiellettyä ilman RTT/betonin etukäteistä kirjallista suostumusta.

RTT/betoni katsoo tässä julkaisussa esitettyjen ohjeiden ja tietojen pitävän paikkansa julkaisuajankohtana.

Vaikka RTT/betonin tarkoitus on, että tässä julkaisussa esitetyt ohjeet ja tiedot ovat virheettömiä ja ajan tasalla, kumpaakaan ei voida taata. Jos RTT/betonille ilmoitetaan julkaisussa olevista virheistä, ne korjataan tarkoituksenmukaisella menetelmällä.

Julkaisussa esitetyt mielipiteet ovat osittain alkuperäisen englanninkielisen version kirjoittaneiden esittämiä, eikä RTT/betoni ota vastuuta niistä.

Ohjeet ja tiedot on tarkoitettu päteville henkilöille, jotka pystyvät soveltamaan tässä julkaisussa annettuja ohjeita ja tietoja ja ymmärtämään niihin liittyvät rajoitukset sekä ottamaan vastuun niiden soveltamisesta omassa työssään. RTT/betoni ei ole vastuussa mistään ohjeiden tai tietojen käytön aiheuttamasta suorasta tai epäsuorasta vahingosta.

Lukijoiden tulee ottaa huomioon, että RTT/betonin julkaisuja päivitetään ja varmistaa, että käytetään tämän julkaisun uusinta versiota.

Muutoshistoria:

| Versio | Muutos |
|-----------|---|
| 20.3.2009 | Kuva 2: $\lambda \leq \lambda_{lim} ? \rightarrow \lambda \geq \lambda_{lim} ?$ |

Liite 1. Suorakaidepilareiden yhteisvaikutusdiagrammit

