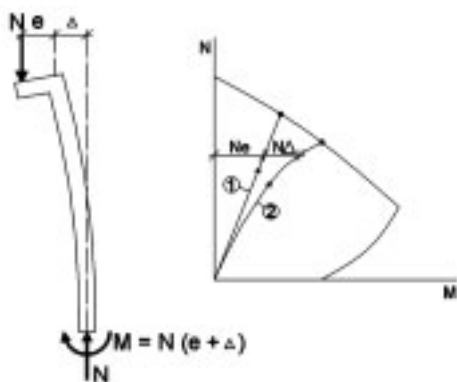
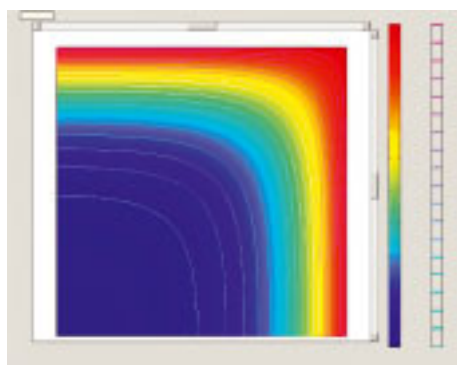


# TERÄSBETONISEN MASTOPILARIN PALOMITOITUS EUROKOODIN MUKAAN

Mikko Salminen, diplomi-insinööri,  
TTY, Rakennetekniikka



1  
Epäkeskisesti kuormitetun mastopilarin vapaakappalekuva sekä pilarin vapaan pään ja juuren momentit yhteisvaikutusdiagrammissa kun kuormitusta kasvatetaan.



2  
FEM-laskennalla määritetty poikkileikkauksen 480 x 480 mm<sup>2</sup> neljänneksen lämpötilajakauma palonkestoajalla R 120.

*Teräsbetonisen mastopilarin palomitoitus eurokoodin mukaan* - diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennetekniikan laitoksella välillä marraskuu 2006 - toukokuu 2007. Diplomityön tarkastajina toimivat professori Matti Pentti (TTY), TkL Harri Isoherranen (Parma) ja TkL Timo Inha (TTY). Työn valvojana oli DI Tauno Hietanen (Rakennusteollisuus RT) ja lisäksi työtä ohjasi DI Jari Hietala (TTY). Diplomityön rahoitti Einar Kahelinin rahasto.

## TAUSTAA

Eurokoodissa on kaksi vaihtoehtoa jäykistettyjen teräsbetonipilareiden palotilanteen taulukkomitoitukseen: menetelmät A ja B. Menetelmä A on yksinkertainen käyttää, mutta siinä rajataan pilarin nurjahduspituus niin pieneksi, että mastopilareille se ei sovellu käytännössä lainkaan. Menetelmä B soveltuu vielä pilareille, joiden hoikkuus  $\lambda=80$ , mutta tämän menetelmän käyttö on monimutkaisempaa ja vaatii iterointia. Jäykistämättömien pilareiden, kuten mastopilareiden taulukkomitoitus voidaan eurokoodin mukaan esittää kansallisessa liitteessä.

Työn tavoitteena oli kehittää tyypillisten mastopilareiden palomitoitukseen soveltuva laskentaohjelma / -taulukko, jossa käytetään eurokoodin mukaisia menetelmiä pilarin palonkestävyyden määrittämiseksi. Eurokoodithan otetaan rakennesuunnittelussa käyttöön vuosien 2007 ja 2010 välisenä siirtymäaikana.

## TEORIAA MASTOPILAREISTA

Mastopilarilla tarkoitetaan pilaria, joka on alapäästään momenttijäykästi kiinni, mutta yläpäähän sivusiirtymää ja kiertymää ei ole estetty. Tyypillisesti mastopilarit ovat suhteellisen hoikkia rakenteita ja toimivat osana kehää. Niiden sivusiirtymän suuruus riippuu näin ollen kehän kaikkien pilarien jäykkyyksistä.

Hoikan mastopilarin toimintaa on selvitetty kuvassa 1. Epäkeskinen kuormitus aiheuttaa yläpäähän taivutusmomentin  $N_e$ . Momentin seurauksena pilariin syntyy taipuma  $\Delta$ . Tasapainotilanteessa taivutusmomentin pilarin juuressa täytyy olla  $M = N(e + \Delta)$ . Kuvassa 1 on esitetty myös pilarin yhteisvaikutusdiagrammi. Viiva 1 kuvaa pilarin vapaassa päässä vaikuttavaa taivutusmomenttia kuorman  $N$  funktiona. Tässä tapauksessa taivutusmomentti on suoraan verrannollinen kuormaan. Viiva 2 puolestaan kuvaa juuren momenttia, joka riippuu myös pilarin taipumasta ollen näin epälineaarinen.

Taipumasta  $\Delta$  tulee mastopilarilla nelinkertainen verrattuna molemmista päistä nivelellisesti tuet-

tuun samanlaiseen pilariin. Mastopilareilla tämä otetaan huomioon käyttämällä toisen kertaluvun tarkasteluissa nurjahduspituutena  $1_0$  vähintään arvoa  $2l$ , missä  $l$  on pilarin todellinen pituus.

## TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

Tutkimus rajattiin käsittelemään hoikkia ( $\lambda=60-140$ ), poikkileikkaukseltaan neliön muotoisia mastopilareita, joiden poikkileikkaus oli väliltä 480 x 480 mm<sup>2</sup> – 680 x 680 mm<sup>2</sup>. Tutkittavat palonkestoajat rajattiin välille R 60 - R 120 ja eurokoodin mukaiset betonin lujuusluokat välille C30/37-C50/60. Raudoituksen keskiöetäisyyden poikkileikkauksen reunasta oletettiin olevan 50 mm. Näiden rajausten ulkopuolelta tutkittiin myös joitain pienempiä poikkileikkauksia ja palonkestoajoja siten, että laskennan toimintaa pystyttiin vertaamaan soveltuviin koetuloksiin.

Betonin lujuuden aleneminen palossa otettiin huomioon redusoimalla poikkileikkausta käyttäen EN 1992-1-2:n liitteen B mukaista vyöhykemenetelmää. Raudoituksen palotilanteen jännitys-venymäyhteys määritettiin EN 1992-1-2:n kohdan 3.2.3 mukaisesti. Tämän jälkeen pilarin kapasiteetti laskettiin kuten normaalilämpötilassa ottaen toisen kertaluvun vaikutukset huomioon EN 1992-1-1:n kohdan 5.8.5 mukaisella nimelliseen käyritysmään perustuvalla menetelmällä.

Poikkileikkausten lämpötilojen laskennassa käytettiin FEM-laskentaa ja siitä saadut tulokset syötettiin Excel-taulukkoon, jossa laskettiin ja piirrettiin redusoidulle pilariille yhteisvaikutusdiagrammi.

## KÄYTETYT MENETELMÄT

Eurokoodin mukaista vyöhykemenetelmää sovellettiin tutkimuksessa siten, että tutkitut poikkileikkaukset jaettiin 20:n samansuuntaiseen ja samanleveyteen vyöhykkeeseen, joista lämpötilat eri palonkestoajoilla määritettiin symmetrian takia vain 10:ssä. Lämpötilat määritettiin kunkin vyöhykkeen neljännespisteessä, koska tällöin saatiin hyvin koko vyöhykettä kuvaava lämpötila-arvo. Vyöhykkeiden lämpötilojen perusteella saatiin laskettua heikentyneen vyöhykkeen paksuus  $a_r$ , joka poistetaan poikkileikkauksen kaikilta sivuilta. Lisäksi poikkileikkauksen keskipisteen lämpötilan perusteella määritettiin redusoidun poikkileikkauksen lujuuden heikennyskerroin, joka oli kaikilla tutkituilla tapauksilla 1. Poikkileikkausten lämpötilajakaumat eri palonkestoajoilla määritettiin FEM-laskennalla käyttämällä COMSOL Multiphysics-ohjelmaa, johon syö-

tettiin eurokoodin mukaiset betonin ja teräksen materiaaliarvot. Symmetrian takia tutkittiin vain yhtä neljänestä poikkileikkauksesta. Kuvassa 2 on esitetty poikkileikkauksen 480 x 480 mm<sup>2</sup> neljänneksen lämpötilajakauma palonkestoajalla R 120.

Toisen kertaluvun vaikutukset otettiin huomioon eurokoodissa esitetyllä nimellisellä käyrästä perustuvalla menetelmällä. Tässä menetelmässä pilarilla arvioidaan olevan suurin mahdollinen mitoittava normaaliveikko vastava käyrästä. Siitä aiheutuu taipuma ja näin toisen kertaluvun momentti. Lasketuissa yhteisvaikutusdiagrammeissa toisen kertaluvun vaikutus otettiin huomioon vähentämällä kutakin normaaliveikkoa vastaava toisen kertaluvun momentti poikkileikkauksen kestävyttä vastaavasta yhteisvaikutusdiagrammista.

## VERTAILU POLTTOKOKEISIIN

Laskennan toimintaa verrattiin yhteensä 16 Belgiassa, Saksassa ja Kanadassa tehtyyn polttokokeeseen. Kokeissa poltetut pilarit olivat nivelellisesti tuettuja ja suurimmillaan niiden poikkileikkaus oli 300 x 300 mm<sup>2</sup>, joten vertailupohjaa todellisiin mastopilareihin ei ollut. Seitsemän verratun pilarin hoikkuus  $\lambda$  oli kuitenkin suurempi kuin 60, joten toisen kertaluvun vaikutukset tulivat ainakin niissä selkeästi esille.

Laskettuja palonkestoajoja verrattiin myös Liegen yliopistossa kehitetyn SAFIR-menetelmän antamiin tuloksiin samoista polttokokeista. Graafinen vertailu polttokokeiden todelliseen ja SAFIR-menetelmän antamaan palonkestoajaan on esitetty kuvassa 3. Tästä huomataan, että lasketut tulokset ovat pääosin konservatiivisia. Kaksi tapausta on selvästi epävarmalla puolella, mutta myös SAFIR-menetelmällä laskettaessa näille polttokokeille saadaan liian pitkät palonkestoajat.

## TULOKSET

Laskentaohjelmalla laadittiin erilaisia mitoitusdiagrammeja, joilla pystytään tarkistamaan tyyppisten mastopilareiden palonkestävyys. Periaatteena on, että aluksi valitaan oikea poikkileikkaus ja palonkestoajaa vastaava diagrammi. Sitten sijoitetaan siihen eurokoodin mukaisia kuormien pienenskertoimia ja yhdistelmiä vastaavat ensimmäisen kertaluvun suhteelliset rasitukset. Tämän jälkeen valitaan mekaanisen raudoitussuhteen ja pilarin hoikkuuden mukainen käyrä, joka kuvaa pilarin kapasiteettia ja katsotaan ovatko rasituspisteet käyrän sisäpuolella.

Tuloksien perusteella ei voida tehdä yleispäteviä johtopäätöksiä siitä, voiko palomitoitus tulla mastopilarille mitoittavaksi. Nyrkkisääntönä voidaan tietyksi todeta, että tämän todennäköisyys kasvaa palonkestoajan, kuormitusasteen ja hoikkuuden kasvaessa. Kuvassa 4 on esitetty yksi ehdotus mitoitusdiagrammiksi. Diagrammeja voidaan laskentaohjelman avulla laskea lisää tai muuttaa halutulla tavalla. Suunnittelijan työkaluksi laaditaan jatkoyönä diagrammeja sisältävä suunnitteluohje.

## KIRJALLISUUTTA:

- SFS-EN 1992-1-2. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu - Osa 1-2: Yleiset säännöt - Rakenteiden palomitoitus. 2005, Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu - Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2005, Suomen Standardisoimisliitto SFS.

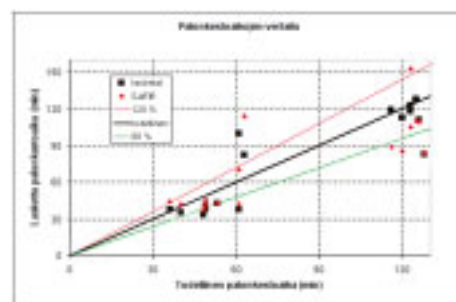
## FIRE DESIGN OF UNBRACED REINFORCED CONCRETE COLUMN ACCORDING TO THE EUROCODES

*There are two possibilities in the Eurocodes to design braced reinforced concrete columns under fire conditions with tabulated data: methods A and B. Method A is suitable exclusively for short columns whereas method B is complicated to use and cannot be applied for the most slender columns. Tabulated data for unbraced structures like cantilever columns may be found in a Country's National Annex.*

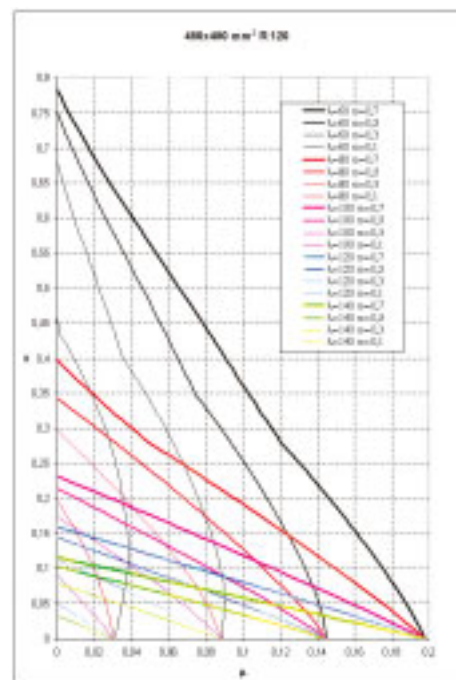
*The purpose of this study was to create a spreadsheet computation with Eurocode standards, which could be used to determine the fire resistance of the most commonly used reinforced cantilever concrete columns in Finland. The zone method, which is presented in EN 1992-1-2, was used to reduce the cross-section. Second order effects were taken into consideration with EN 1992-1-1 method based on nominal curvature.*

*The functionality of this study's spreadsheet computation was examined by comparing it to test results. The fire resistance in minutes given by the spreadsheet computation was compared with the fire resistance of 16 tested columns. Correlation with the test results and SAFIR-method proved that the spreadsheet computation is suitable for its purpose.*

*This study was also about determining the influences of different factors on the columns' fire resistance. Based on this, suggestions for designing diagrams were established. This study presents also a case where capacity of*



3 Lasketut tulosten vertailu polttokokeisiin ja SAFIR-menetelmään.



4 Esimerkki mitoitusdiagrammista.

Suhteellinen normaaliveikko  $v = \frac{N_{ed,fi}}{bh f_{cd}}$  ja suhteellinen momentti  $\mu = \frac{M_{ed,fi}}{bh^2 f_{cd}}$

unbraced and slender column is determined at normal temperature as well as in fire conditions.

The study presents two different examples of designing diagrams for fire conditions. Spreadsheet computation enables to include more designing diagrams or adjust them as needed.