

Kasper Pirttikoski

TERÄSBETONIPILARIN POIKITTAIS- RAUDOITUS

Kirjallisuusselvitys teräsbetonipilarin hakaraudoituksen toiminnasta

TIIVISTELMÄ

Kasper Pirttikoski: Teräsbetonipilarin poikittaisraudoitus
Kandidaatin työ
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
tammi 2020

Pilarit kantavat yleensä suuria pystysuuntaisia kuormia, minkä takia teräsbetonipilari tarvitsee pääteräksiä sitovaa ja poikkileikkausta koossa pitävää raudoitusta eli hakateräksiä. Niin hakojen halkaisijan kuin määränkin mitoitus perustuu melko pieneen määrään lähtötietoja. Tässä työssä tutkitaan hakaraidoituksen määrän ja jaon vaikutusta sen vaikutuksiin sekä vertaillaan kirjallisuudesta löytyviä tapoja ottaa poikittaisraudoitus huomioon pilarin pääsuunnan kapasiteetin laskennassa.

Työssä käydään ensiksi lyhyesti läpi pilarien toimintaa, jonka jälkeen syvennyttään hakaterästen toimintaan. Toisessa luvussa esitellään teräsbetonipilarin teoriaa ja suunnittelua koskevia standardeja. Kolmannessa luvussa on esitetty ja vertailtu teorian ja standardien mukaisen laskennan tuloksia.

Hakaraidoitusta voidaan hyödyntää pilarin pääsuunnan kapasiteetin kasvattamisessa. Tällöin hakaraidoituksen täytyy kuitenkin olla huomattavasti nykyisen Eurokoodin minimivaatimuksia tiheämpää. Koska betonin puristuslujuutta pystytään parantamaan poikittaisraudoituksella, olisi hyödyllistä toteuttaa tutkimus hakaraidojen koko-, muoto- ja jakovaikutuksesta teräsbetonipilarin kapasiteettiin Suomessa käytössä olevilla betonityypeillä.

Avainsanat: pilari, poikittaisraudoitus, hakaraidoitus, eurokoodi, teräsbetoni, confinement

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Kasper Pirttikoski: Lateral reinforcement of RC columns
Bachelor's thesis
Tampere University
Civil Engineering
January 2020

Columns typically carry great axial loads. In order to transfer these loads to substructure concrete column needs to be reinforced with longitudinal steel rods. Lateral reinforcement is needed to keep this longitudinal reinforcement from buckling. Lateral reinforcement also confines the concrete core, thus increasing columns longitudinal capacity.

In current Eurocodes dimensioning of lateral reinforcement is based on few parameters. Nowadays more attention to dimensioning of lateral reinforcement is only paid in earthquake situations. Could lateral reinforcement be used to significantly increase the longitudinal capacity of column in seismically stable conditions?

Scope of this study is to find out how amount and distribution of lateral reinforcement affects on the longitudinal capacity of column. A comparison between different calculational models on the confinement effect from the literature is also carried out.

In the second chapter behaviour of the column is presented, as well as some of the design rules regarding dimensioning of RC column. In the third chapter the theory and design rules are compared with calculations.

It turns out that lateral, or confinement, reinforcement can be used to increase the columns longitudinal capacity. To achieve this confining effect the total amount of lateral reinforcement should be significantly greater than minimal requirements of current Eurocodes. Further studies on the subject are needed.

Keywords: column, lateral reinforcement, confinement reinforcement, Eurocode, reinforced concrete, confinement

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tutkinto 1/3.

Tampereella, 28.1.2020

Kasper Pirttikoski

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO	1
2.PILARIN TOIMINTA	2
2.1 Pilarin toiminta	2
2.1.1 Yleistä	2
2.1.2 Betonin materiaaliominaisuudet	2
2.1.3 Raudoitusteräksen ominaisuudet	3
2.1.4 Jännitykset ja muodonmuutokset pilarissa	3
2.1.5 Poikittaisraudoituksen vaikutus pilarissa	4
2.2 Kirjallisuuskatsaus.....	5
2.2.1 Poikittaisraudoituksen koon ja jakovälin vaikutus	5
2.2.2 Poikittaisraudoituksen muodon vaikutus	7
2.3 Hakaraudoitus standardeissa.....	8
2.3.1 Pilarien hakaraudoituksen suunnittelu Eurokoodi 2:n mukaan.....	8
2.3.2 Poikittaisraudoituksen valinta muissa standardeissa	9
2.3.3 Poikittaisraudoituksen vaikuttavat tekijät eri standardeissa	10
2.3.4 Poikittaisraudoituksen vaikutus pääsuunnan puristuslujuuteen ...	11
3.LASKENNALLISET TARKASTELUT	14
4.YHTEENVETO.....	17
LÄHTEET	18

1. JOHDANTO

Pilarit kantavat yleensä suuria pystysuuntaisia kuormia, minkä takia teräsbetonipilari tarvitsee pääteräksiä sitovaa ja poikkileikkausta koossa pitävää raudoitusta eli hakateräksiä. Niin hakojen halkaisijan kuin määränkin mitoitus perustuu melko pieneen määrään lähtötietoja. Tässä työssä tutkitaan hakaraudoituksen määrän ja jaon vaikutusta sen vaikutuksiin sekä vertaillaan kirjallisuudesta löytyviä tapoja ottaa poikittaisraudoitus huomioon pilarin pääsuunnan kapasiteetin laskennassa.

Hakaraudoitukseksi kutsutaan terästankoja, jotka on taivutettu pilarin pääterästen ympärille poikkileikkauksen tasossa. Hakaraudoituksen tehtävänä on tukea pääteräksiä nurjahdusta vastaan, estää betonin poikittaislaajeneminen ja toimia leikkausraudoituksena. Tässä työssä keskitytään erityisesti betonin poikkileikkausta sitovaan vaikutukseen. Työn ulkopuolelle rajataan muut kuin neljästä kulmasta päärautoja sitovat, yksiosaiset neliöhaat.

Työssä käydään ensiksi lyhyesti läpi pilarien toimintaa, jonka jälkeen syvennytään hakaterästen toimintaan. Toisessa luvussa esitellään teräsbetonipilarin yleinen toiminta ja materiaaliominaisuudet, syvennytään pilarin staattiseen käyttäytymiseen, lähinnä sisäisiin jännityksiin ja niistä aiheutuviin muodonmuutoksiin, esitellään tutkimustietoa hakaraudoituksen merkityksestä pilarin pääsuunnan puristuskestävyydelle sekä käydään läpi pilarien hakaraudoitteita koskevia menneitä, nykyisiä ja tulevia ohjeita. Kolmannessa luvussa on esitetty ja vertailtu teorian ja standardien mukaisen laskennan tuloksia. Neljännen lukuun on koostettu olennaisimmat johtopäätökset.

2. PILARIN TOIMINTA

2.1 Pilarin toiminta

2.1.1 Yleistä

Pilariksi kutsutaan pystysuuntaista, pääasiallisesti aksiaalisesti kuormitettua rakenneosaa, jonka korkeus on huomattavasti sen poikkileikkauksen mittoja suurempi (Hassoun & Al-Manaseer 2008). Tässä esityksessä pilarilla tarkoitetaan teräsbetonipilaria. Eurokoodin (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 159) mukaan pilareilla suurempi poikkileikkausmitta h saa olla enintään nelinkertainen pienempään mittaan b nähden. Tätä leveämmät rakenneosat katsotaan Eurokoodissa seiniksi.

Pilarien normaalijännitykset ovat yleensä suuria, jolloin kuorman epäkeskisyys voi aiheuttaa merkittäviä momenttirasituksia. Pilarin herkkyyttä näille epäkeskisyyksille kuvataan käsitteellä hoikkuus. Hoikalla rakenteella on vaarana rakenteen nurjahtaminen. Nurjahduksessa rakenne murtuu, kun pilarin akseli käyristyy. Näitä kuorman epäkeskisyyksiä kutsutaan toisen kertaluvun vaikutuksiksi.

Teräsbetonirakenteen osana pilarin pääterästen ensisijainen tehtävä on ottaa vastaan aksiaalista puristusjännitystä. Elementtipilarissa ne ottavat vastaan työnaikaiset vetorasitukset. Pääteräksissä jännitys on suurempi kuin betonissa. Pilarin muihin mittoihin nähden suuren korkeuden vuoksi pienetkin kuorman epäkeskisyydet aiheuttavat suuria taivutusrasituksia. Vaikka pilarin betoni ja teräkset yleensä toimivat yhtenä rakenteena kuormitussuuntaan nähden, voivat pääteräkset nurjahtaa myös itsenäisesti taittuen näin betonin läpi akselia vastaan kohtisuoraan. Tällöin pilari ei enää toimi.

2.1.2 Betonin materiaaliominaisuudet

Betoni on heterogeeninen materiaali, joka koostuu pääasiallisesti sementistä, vedestä ja kiviaineksesta. Betonin ominaisuuksia voidaan tarvittaessa muokata erilaisilla lisäaineilla, esimerkiksi notkistimilla. Kovettuneella betonilla on hyvä puristuslujuus, mutta vetojännitystä betoni kestää huonosti.

Betonirakenteiden kansainvälisen organisaation fib:n julkaiseman Model Code 2010:n mukaan normaalilujuuksisen betonin ominaispuristuslujuus f_{ck} on korkeintaan 50 MPa ja korkealujuuksisen vastaavasti tätä suurempi. Betonin tiheys on normaalisti 2 000–2 600 kg/m³. Betonin Poissonin luku ν_c on 0,14...0,26 jännitystasoilla $-0,6f_{ck} < \sigma_c < 0,8f_{ctk}$. Murtorajatilojen lujuuksia laskettaessa $\nu_c = 0,20$ on riittävä approksimaatio. (Model Code 2010 2012)

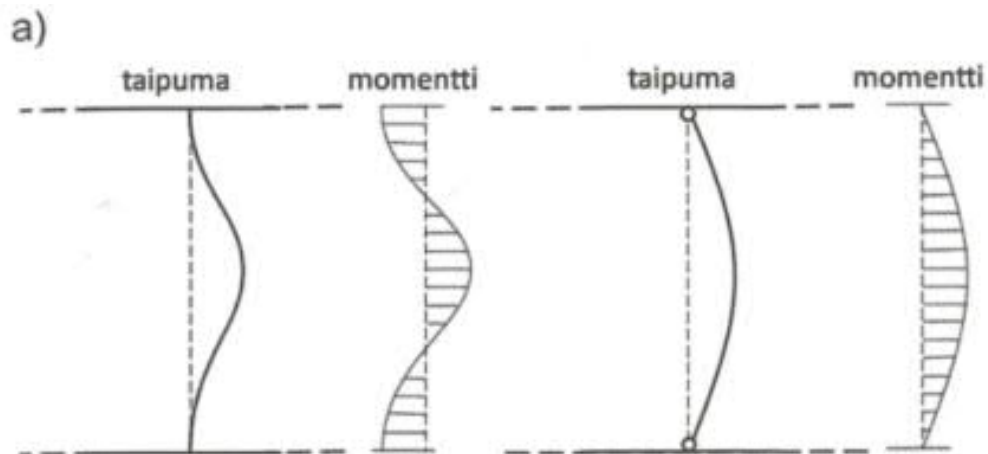
2.1.3 Raudoitusteräksen ominaisuudet

Raudoitusteräs voi olla muodoltaan tankoa, kaapelia tai harsoa. Sen oleellisia ominaisuuksia teräsbetonirakenteessa ovat lujuus, kestävyys ja työstettävyys. Rakenteita suunniteltaessa huomioon otetaan teräksen lujuus, halkaisija ja muoto. Teräsbetonirakenteen toiminnan kannalta on olennaista, että teräksellä on hyvä tartunta betoniin. Tämän vuoksi myös pinnan muoto otetaan huomioon suunnittelussa. (Model Code 2010 2012)

Raudoitusteräksen lujuus on yleensä luokkaa 400...700 MPa. Suomessa käytetään yleisesti kuumavalssattua harjaterästankoa B500B, jonka myötölujuus on 500 MPa.

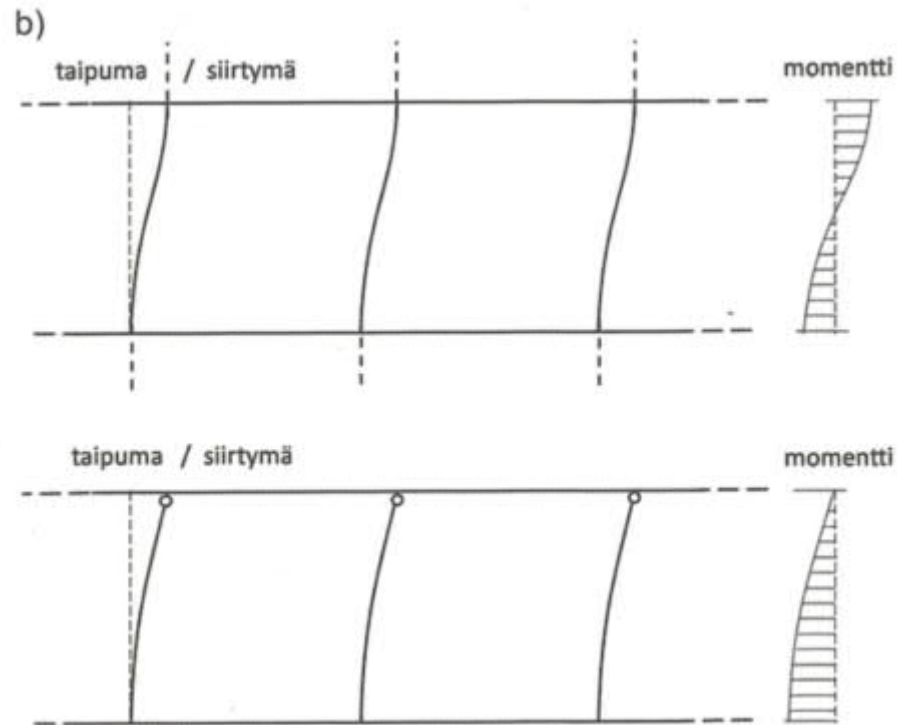
2.1.4 Jännitykset ja muodonmuutokset pilarissa

Toimiessaan osana sivusiirtymätöntä rakennetta eivät pilarin päät pääse liikkumaan suhteessa toisiinsa. Tällöin pilari voi olla tuettu molemmista päistä jäykästi tai nivelellisesti ja pilarin taivutusmomenttijakauma ja taipuma ovat kuvan 1 mukaisia. (BY 211 2014, s. 98)



Kuva 1. Sivusiirtymättömän, eli jäykistetyn rakenteen pilarien taipumiskäyttäytymisen (BY 211 2014, s. 99)

Pilarin päiden päästessä liikkumaan suhteessa toisiinsa, aiheutuu pilariin lisätaivutusmomentteja, jolloin momenttijakauma ja taipuma ovat kuvan 2 mukaisia. Pilarin kiinnityksen täytyy tällaisessa sivusiirtyvässä rakenteessa olla vähintään toisesta päästä jäykkä. (BY 211 2014, s. 98)



Kuva 2. Sivusiirtyvän, eli jäykistämättömän rakenteen pilarien taipumuskäyttäytyminen (BY 211 2014, s. 99)

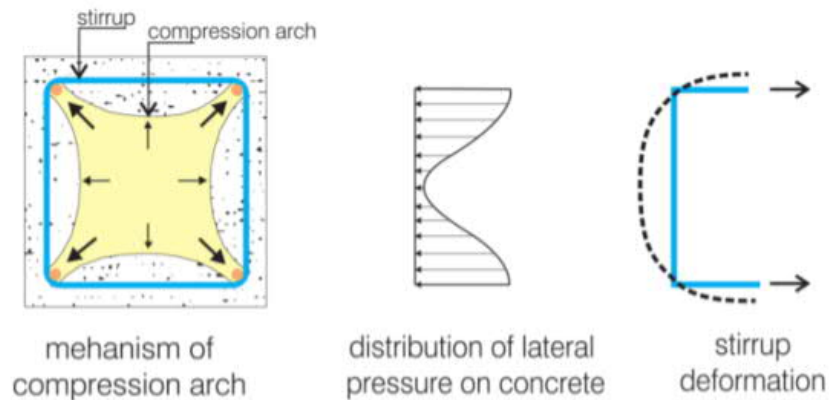
Pilarit voidaan jaotella niiden epäkeskisen kuormituksen alaisen murtotavan mukaan kolmeen luokkaan: lyhyisiin, keskipitkiin ja pitkiin pilareihin. Lyhyet tai jäykät pilarit pysyvät melko suorassa ja murtuvat, kun puristusjännitys tulee murtolujuutta suuremmaksi. Keskipitkät eli hoikat pilarit taipuvat ja murtuvat edellistä pienemmällä kuormalla. Pitkä, hyvin hoikka pilari taipuu, jolloin sen kapasiteetti alenee entisestään, ja pilari murtuu vielä edellistä pienemmällä kuormalla. (BY 211 2014, s. 100-101)

2.1.5 Poikittaisraudoituksen vaikutus pilarissa

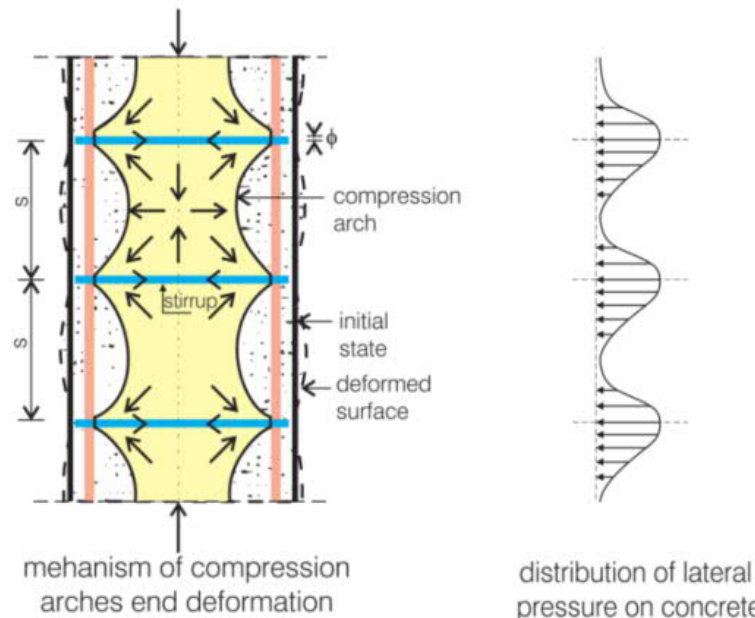
Poikittaisraudoituksen tehtävä pilarissa on ottaa vastaan leikkausjännityksiä ja estää puristettujen pääraudoitustankojen nurjahtaminen (BY 211 2014, s. 136). Hakaraudoitus myös rajoittaa betonin poikittaislaajenemista. Poikittaissuuntaiset voimasuureet ja näin ollen leikkausjännitykset tulevat merkittäväksi yleensä vain maanjäristysmitoituksessa. Tässä työssä poikittaisraudoitteita tarkastellaan Suomen tilanteen mukaisesti vain pystysuuntaisten voimien aiheuttamien reaktioiden osalta, eli nurjahtamista ja poikittaislaajenemista ehkäisevinä osina.

Kun pilari on puristettu keskisellä kuormalla, on jännitysjakautuma akselien suhteen symmetrinen. Yksinkertaisessa tapauksessa (kuva 3) poikittaisraudoitus tukee poikkileikkausta eniten nurkista, joissa pääraudat ovat. Tällöin pääraudat eivät pääse nurjahta-

maan. Poikkileikkauksen reunan keskellä hakarautoite taas vastustaa betonin laajenemista vähemmän, jolloin haka liikkuu puristuksessa laajenevan betonin mukana. Lopulta haka pyrkii pyöristymään betonin laajetessa epätasaisesti.



Kuva 3. Pilarin poikkileikkauksen jännitysjaakauma. (Radnic et al. 2013, kuva 2a)



Kuva 4. Pilarin pituussuunnan jännitysjaakauma. (Radnic et al. 2013, kuva 2b)

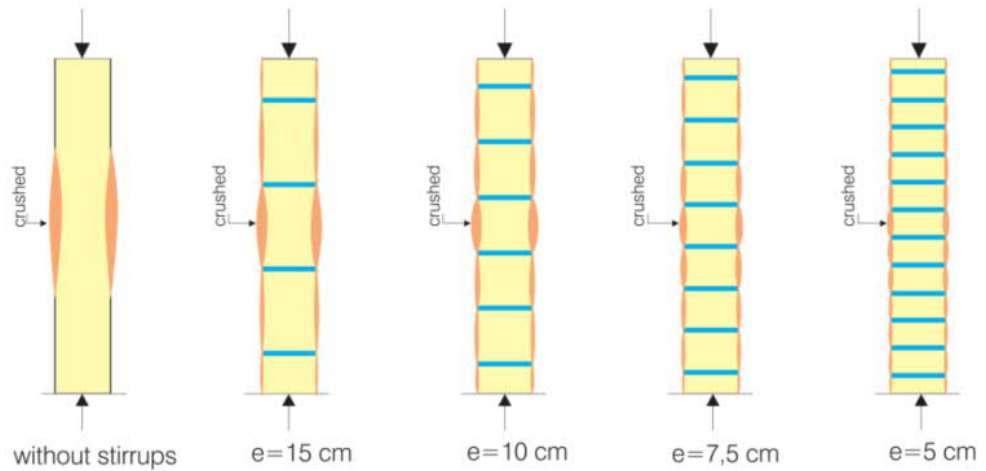
Pystysuunnassa pilarin jännitykset jakautuvat kuten poikkileikkauksessakin. Betoni siis pääsee laajenemaan eniten hakojen puoliväleissä (kuva 4), joissa sen poikittainen laajeneminen on vähiten rajoitettua.

2.2 Kirjallisuuskatsaus

2.2.1 Poikittaisraudoituksen koon ja jakovälin vaikutus

Radnic et al. (2013) mukaan keskeisesti puristetulla pilarilla murtuminen tapahtuu yleensä keskimmäisen hakavälin puolivälissä (kuva 5). Murtuminen tapahtui tällöin kohdassa, jossa betonin poikittaissuuntainen laajeneminen on suurinta, toisin sanoen kohdassa,

jossa hakarautoite sitoo poikkileikkausta vähiten. Murtumisyyinä on päärautojen nurjahtaminen (kuva 6). (Radnic et al. 2013)



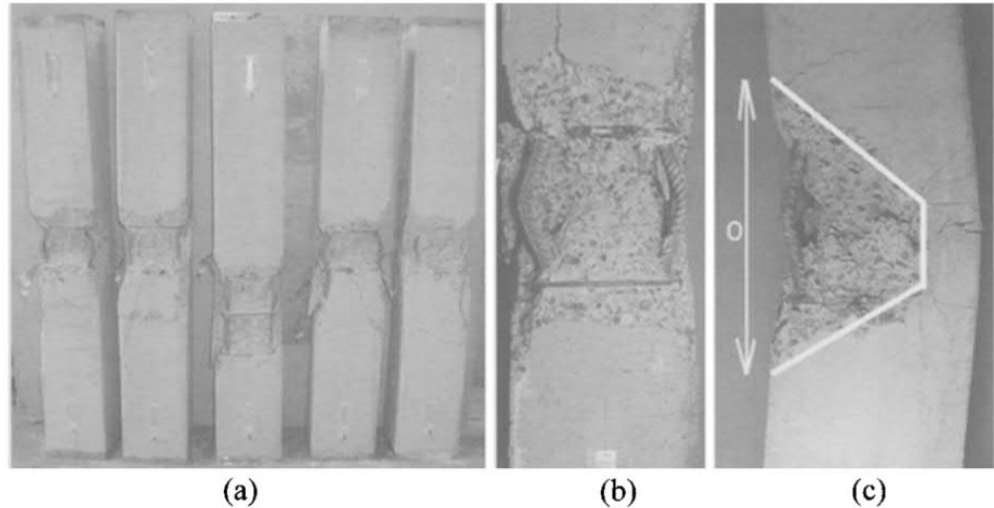
Kuva 5. Radnic et al. kokeessaan käyttämien pilarien murtokohdat. (Radnic et al. 2013, kuva 13)

Radnic et al. huomasivat kokeessaan, ettei betonin lujuudella ollut juuri merkitystä hako-
jen aiheuttamaan suhteelliseen pääsuunnan puristuslujuuden paranemiseen. Samassa
tutkimuksessa huomattiin myös, että merkittävin tekijä pilarin puristuskestävyyden kan-
nalta on hakojen jakoväli.



Kuva 6. Tyypillinen pilarin murtokohta Radnic et al. kokeessa. (Radnic et al. 2013, kuva 14)

Němeček et al. (2005) mukaan hakarautoitettu pilari murtuu hako-
jen puolivälistä betonin murtumisen aiheuttaman päärautojen nurjahtamisen seurauksena. He tutkivat haka-
raudoituksen vaikutusta normaali- ja korkealujuusbetonissa. Tutkimuksessa pilarit olivat
epäkeskisesti kuormitettuja. Murtokohta oli myös kyseisessä kokeellisessa tutkimuk-
sessa yleensä pilarin keskellä (kuva 7). (Němeček et al. 2005)



Kuva 7. Epäkeskisesti puristettujen pilarien murtotapa. (Němeček et al. 2005, kuva 3)

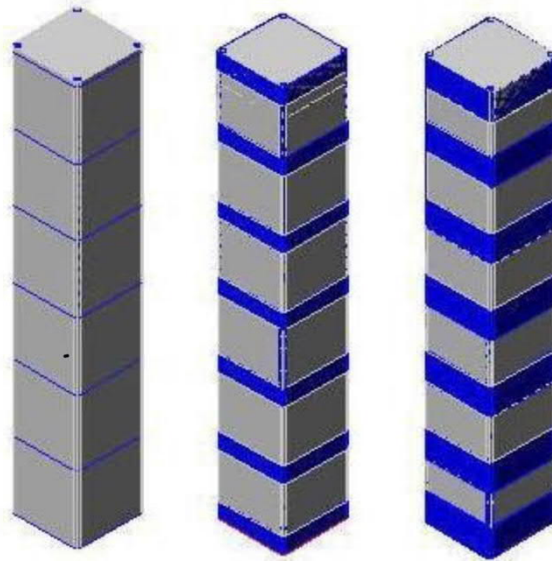
Tutkimuskappaleita valmistettiin kolmella eri hakajaolla: 50, 100 ja 150 mm. Tutkimuksessa ei huomattu eroa eri lailla raudoitettujen näytteiden käyttäytymisessä ennen rakenteen murtumista.

Useissa tutkimuksissa on todettu, että yksittäisen haan paksuutta tärkeämpää on haka-terästen tasainen jakautuminen pilarin pituussuunnassa. Esimerkiksi Radnic et al. (2013) havaitsivat kokeessaan, että samalla pyöröteräsmäärällä saavutetaan suurempi pilarin lujuus, kun jakoväli on pienempi. Tiheämmällä jaolla saavutetaan tutkimuksen mukaan samoja lujuuksia jopa kolmasosalla teräsmäärää (Radnic et al. 2013).

Toisaalta Němeček et al. (2005) eivät saaneet kokeessaan aikaan eroa murtolujuuteen eri hakajaoilla, vaikkakin murtumisen jälkeiseen käyttäytymiseen jakovälillä oli merkitystä. Radnic et al. koestivat keskisesti ja Němeček et al. epäkeskisesti puristettuja pilareita.

2.2.2 Poikittaisraudoituksen muodon vaikutus

Ali & Ahmed tutkivat 2012 pyöröterästen korvaamista teräslaatoilla. Tutkimuksessa koestettiin kolme erilaista pilaria, kutakin yksi kappale. Vertailupilarissa oli tavanomaisesta pyöröteräksestä tehty poikittaisraudoitus 32k150, kahdessa muussa 2 mm ja 1,2 mm teräslaatat. Kaikissa pilareissa oli sama määrä terästä pituusyksikköä kohden kuvan 17 mukaisesti. 1,2 mm laatala saavutettiin 16 % ja 2 mm laatala 78 % parempi pilarin pääsuunnan puristuskestävyys vertailupilariin verrattuna. (Ali & Ahmed 2012)



Kuva 8. Ali & Ahmed koestamat pilarit. (Ali & Ahmed 2012, kuva 5)

Koekappaleissa ei ollut erillistä suojabetonikerrosta, vaan rauditus oli suoraan pilarin pinnassa (Ali & Ahmed 2012). Tutkimuksen näytemäärä oli hyvin pieni, mutta tulos on kuitenkin linjassa muun tutkimustiedon kanssa (Radnic et al. 2013).

2.3 Hakarauditus standardeissa

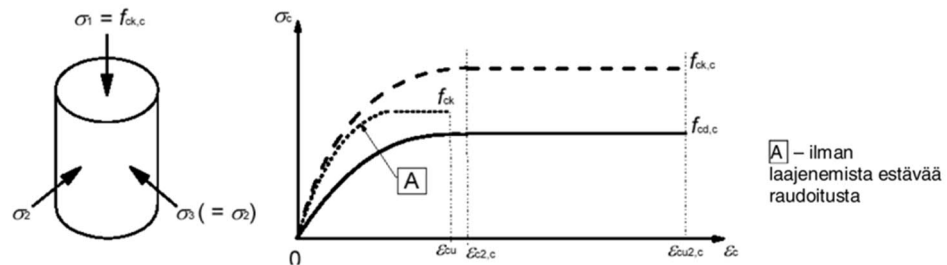
2.3.1 Pilarien hakaraudituksen suunnittelu Eurokoodi 2:n mukaan

Eurokoodin mukaan hakaraudan halkaisijan on oltava vähintään neljännes paksuimman pääraudan halkaisijasta, kuitenkin vähintään 6 mm. Haan halkaisijan osalta Eurokoodi ei anna mahdollisuutta kansalliselle valinnalle. (SFS-EN 1992-1-1 2015)

Hakaraudituksen suurimmaksi sallituksi jakoväliksi Eurokoodi suosittelee pienimmän seuraavista: 20 kertaa ohuimman päätangon halkaisija, 400 mm tai pilarin pienin sivumitta. Lisäksi hakojen jakoväliä on pienennettävä 60 prosenttiin pilarin päädyissä ja limijatkoksissa. Hakavälin kohdalla Eurokoodi antaa mahdollisuuden kansalliselle valinnalle. (SFS-EN 1992-1-1 2015)

Suomessa on päädytty talonrakennuksen osalta muuttamaan vaatimus päätangon halkaisijan suhteen 15 kertaiseksi, mikä on siis pienempi kuin Eurokoodin suositus (Ympäristöministeriö 2016). Sillanrakentamisessa enimmäisjakoväli on 250 mm, paitsi limijatkosten kohdalla, päätankojen suunnan muutoskohdissa ja pilarin päissä 150 mm (Liikennevirasto 2017, s. 89). Saksassa jakoväli saa olla korkeintaan pienin seuraavista: 12 kertaa ohuimman päätangon halkaisija, pienin sivumitta tai 300 mm (DIN EN 1992-1-1/NA 2008, s. 65). Esimerkiksi Ruotsissa, Tanskassa ja Iso-Britanniassa vastaavaan suosituksesta poikkeamiseen ei ole päädytty.

Eurokoodin kohdan 3.1.9 mukaan betonin jännitys-muodonmuutosyhteyttä voidaan parantaa laajenemista estävällä raudoituksella, joka voidaan saada aikaan muun muassa hyvin ankkuroiduilla umpihaoilla. Poikittaista laajenemista estävästi raudoitettu betoni on tavanomaista betonia parempi lujuus. Yhteys on esitetty kuvassa 5, jossa f_{ck} on betonin ominaispuristuslujuus ja $f_{ck,c}$ poikittaista laajenemista estävästi raudoitettun betonin ominaispuristuslujuus Eurokoodin kaavojen 3.24 tai 3.25 mukaan. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 37-38)



Kuva 9. Laajenemista estävästi raudoitettun betonin parantunut jännitys-muodonmuutosyhteys (SFS-EN 1992-1-1 2015)

Lisäksi Eurokoodissa määrätään terästen sijoittelusta kohdassa 8.2. Terästen väliin pitää jättää tarpeeksi tilaa, jotta betoni saadaan valettua tartunnan kannalta tarpeellisen tiiviiksi. Yksittäisten tankojen ja tankokerrosten välin suositellaan olevan pienimmillään suurin arvoista: k_1 kertaa tangon halkaisija, $d_g + k_2$ tai 20 mm, missä d_g on kiviaineksen suurin raekoko. Arvoille k_1 ja k_2 voidaan tehdä kansallinen valinta. Eurokoodi suosittelee arvoja $k_1 = 1$ ja $k_2 = 5$ mm. (SFS-EN 1992-1-1 2015)

Suomessa käytetään talonrakennuksessa arvoja $k_1 = 1$ ja $k_2 = 3$ mm (Ympäristöministeriö 2016). Sillanrakennuksessa käytetään pienintä arvoista: terästangon tai -tankonipun ekvivalenttihalkaisija, $d_g + 3$ mm ja 25 mm (Liikennevirasto 2017). Saksassa on valittu $k_1 = 1$ ja $k_2 = 0$ mm maksimissaan 16 mm raekoolla, suuremmilla $k_2 = 5$ mm (DIN EN 1992-1-1/NA 2008, s. 51).

Eurokoodien seuraavalla päivityskierroksella poikittaisraudoituksen murtokapasiteettia kasvattavaa vaikutusta tullaan selkeyttämään standardissa EN-1992-1-1. Nykyisin hyvin yksinäisenä oleva kohta 3.1.9 tullaan siirtämään raudoitusta käsittelevään lukuun 8. Samaan yhteyteen tullaan yhdistämään myös poikittaisraudoitusta käsitteleviä kohtia maanjäristyksiä käsittelevästä Eurokoodista EN-1992-1. (prEN 1992-1-1 luonnos 2018)

2.3.2 Poikittaisraudoituksen valinta muissa standardeissa

Ennen Eurokoodin käyttöönottoa 2014 Suomessa noudatettiin betonirakenteiden suunnittelussa Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa B4. Irtohakoja käytettäessä tankojen halkaisijan oli oltava vähintään neljännes päärautojen halkaisijasta. Tankojen väli oli oltava vähintään 15-kertainen pääraudan halkaisijaan verrattuna. (RakMK B4 2005,

s. 38) Vastaava ohjeistus oli ollut voimassa jo ainakin 80-luvulta alkaen (RakMK B4 1981, s. 28).

Yhdysvalloissa betonirakenteista määrätään standardissa ACI 318-14. Hakarautojen halkaisijasta on määrätty vain päätankojen halkaisijan mukaisesti minimiarvo 3/8 tuumaa 32 mm ja pienemmille tangoilla ja 1/2 tuumaa isommille. Hakarautojen pienin jakoväli saa olla korkeintaan pienin arvoista: 48 kertaa haan halkaisija, 16 kertaa pääteräksen halkaisija tai pilarin pienin mitta. Lisäksi hakojen välin täytyy olla vähintään neljä kolmasosaa kiviaineksen maksimiraekoosta. (Hassoun & Al-Manaseer 2015, s. 346)

2.3.3 Poikittaisraudoituksen vaikuttavat tekijät eri standardeissa

Eurokoodissa pilarin poikittaisraudoituksen valinnassa vaikuttavina tekijöinä ovat siis poikkileikkauksen mitat ja pääterästen halkaisijat. Suomen kansallisissa valinnoissa on haettu yhteensopivuutta aiemmin käytössä olleisiin määräyksiin. Hakojen halkaisijaan vaikuttavat tekijät eri standardeissa on koottu taulukkoon 1 ja hakaväliin vaikuttavat tekijät taulukkoon 2.

Taulukko 1. *Pilarin poikittaisraudoituksen halkaisijaan vaikuttavat tekijät eri standardeissa.*

Standardi	Vaikuttavat tekijät
Eurokoodi	$\min(\varnothing_{\text{päärauta}}/4, 6 \text{ mm})$
ACI 318-4	10 mm, kun $\varnothing_{\text{päärauta}} < 32 \text{ mm}$, muuten 12 mm
RakMK B4	$\varnothing_{\text{päärauta}}/4$

Taulukko 2. *Pilarin keskialueen poikittaisraudoituksen jakoväliin vaikuttavat tekijät eri standardeissa.*

Standardi	Vaikuttavat tekijät
Eurokoodi	$\min(20\varnothing_{\text{päärauta}}, 400 \text{ mm}, \text{pilarin pienin sivumitta})$
Eurokoodi (FI-YM)	$\min(15\varnothing_{\text{päärauta}}, 400 \text{ mm}, \text{pilarin pienin sivumitta})$
Eurokoodi (FI-LVM)	$\min(250 \text{ mm})$
Eurokoodi (DE)	$\min(12\varnothing_{\text{päärauta}}, 300 \text{ mm}, \text{pilarin pienin sivumitta})$
ACI 318-4	$\min(16\varnothing_{\text{päärauta}}, 48\varnothing_{\text{haka}}, \text{pilarin pienin sivumitta})$
RakMK B4	$15\varnothing_{\text{päärauta}}$

Hakaraudoituksen halkaisijan valinta perustuu siis yleensä joko pääterästen halkaisijaan tai vakioarvoon. Tällöin päästäänkin varman puolelle päärautojen nurjahdusten sidonnassa, mutta hakaraudoitusten poikkileikkauksen laajenemista estävistä jännityksistä johtuvaa pilarin parantunutta lujuutta ei päästä hyödyntämään. Raudoitustankojen välisen minimietäisyyden määräytyminen eri standardeissa

Standardi	Vaikuttavat tekijät
Eurokoodi	$\min(\varnothing, d_g + 5 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$
Eurokoodi (FI-YM)	$\min(\varnothing, d_g + 3 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$
Eurokoodi (FI-LVM)	$\min(\varnothing, d_g + 3 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$
Eurokoodi (DE)	$\min(\varnothing, d_g, 20 \text{ mm})$ jos $d_g \leq 16 \text{ mm}$, muutoin $\min(\varnothing, d_g + 5 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$
ACI 318-4	$4/3 d_g$

Taulukkoon 3 on koottu kohdissa 2.3.1 ja 2.3.2 esitetyt raudoitustankojen keskinäisiin minimietäisyyksiin vaikuttavat tekijät eri standardeissa. Betonimateriaalin toiminnan ja valuteknisten seikkojen huomioimiseksi kaikissa standardeissa vaikuttavana tekijänä on betonissa käytetty suurin kiviainekoko.

2.3.4 Poikittaisraudoituksen vaikutus pääsuunnan puristuslujuuteen

Poikittaissuuntaisen raudoituksen poikkileikkausta sitovaa vaikutusta kutsutaan englanninkielessä termillä *confinement*.

Sitovan raudoituksen kapasiteettia parantavaa vaikutusta suunnittelussa hyödynnettäessä ei raudoituksen ulkopuolista betonikuorta pitäisi ottaa laskelmissa huomioon. Lisäksi vaaditaan riittävän tiheä hakajako, etteivät pääraudat nurjahda ennen aikaisesti. (Model Code 2010 2012)

Poikittaisen raudoituksen vaikutus pilarin aksiaalisessa kestävyudessa ilmenee parantuneena pääsuunnan puristuskestävyytenä. Nykyisessä Eurokoodissa puristuskestävyyttä voidaan kasvattaa kertoimella

$$\frac{f_{ck}^*}{f_{ck}} = \begin{cases} 1 + 5,0 * \frac{\sigma_2}{f_{ck}}, & \text{kun } \frac{\sigma_2}{f_{ck}} < 0,05 \\ 1,125 + 2,5 * \frac{\sigma_2}{f_{ck}}, & \text{kun } \frac{\sigma_2}{f_{ck}} > 0,05 \end{cases} \quad (1)$$

jossa f_{ck} on betonin ominaispuristuslujuus, f_{ck}^* poikittaisraudoituksella parannettu pääsuunnan ominaispuristuslujuus ja σ_2 laajenemista estävän raudoituksen aiheuttama tehollinen poikittainen puristusjännitys murtorajatilassa. (SFS-EN 1992-1-1 2015)

Vuoden 2010 fibin Model Codessa vastaavaksi pääsuunnan parantuneeksi puristuskestävyydeksi on saatu

$$\frac{f_{ck}^*}{f_{ck}} = 1 + 3,5 \left(\frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right)^{3/4}, \quad (2)$$

missä muuttujat on lähteestä poiketen muutettu vastaamaan nykyisen Eurokoodin merkintöjä.

Toisen sukupolven Eurokoodeissa on pyritty mahdollisimman suurille poikittaisjännityksen tasoille asti pitämään kaava mahdollisimman yksinkertaisena, ja kaava (3) muistuttaakin enemmän fibin Model Code 2010 vastaavaa.

$$\Delta f_{cd} = \begin{cases} 4,0 * \sigma_{c2d}, & \text{kun } \sigma_{c2d} \leq 0,6f_{cd} \\ 3,5 * \sigma_{c2d}^{\frac{3}{4}} f_{cd}^{\frac{1}{4}}, & \text{kun } \sigma_{c2d} > 0,6f_{cd} \end{cases} \quad (3)$$

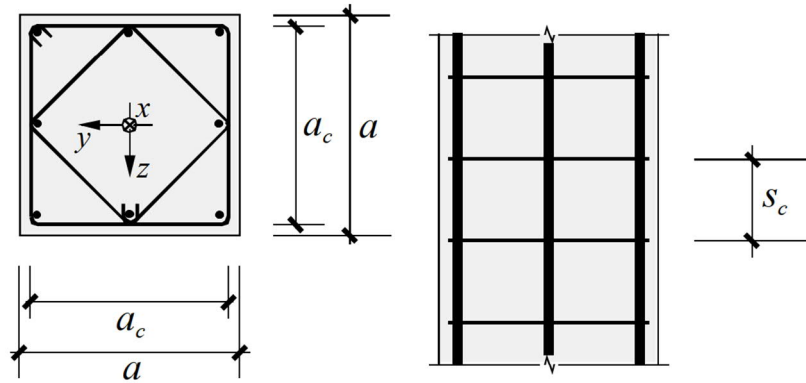
Laskennassa käytettävän pääsuuntaa vastaan kohtisuoran suunnan jännityksen $\sigma_2 (= \sigma_3)$ laskentaan ei ole nykyisessä Eurokoodissa annettu valmista kaavaa. Model Code 2010 antaa suorakaidepoikkileikkauksen sidontajännityksen laskentaa varten kaavan (4)

$$\sigma_2 = \omega_c f_{cd} \left(1 - \frac{s_c}{a_c}\right) \left(1 - \frac{s_c}{b_c}\right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2 / 6}{a_c b_c}\right), \quad (4)$$

jossa mekaaninen raudoitussuhde neliöpoikkileikkauksen tapauksessa

$$\omega_c = \frac{A_{sc} f_{yd}}{a_c s_c f_{cd}}, \quad (5)$$

ja a_c sekä b_c haan keskilinjojen väli kummankin sivun suunnassa, A_{sc} yhden hakaleikkeen poikkileikkausala, s_c hakojen pystysuuntainen k/k-jakoväli ja b_i hakojen nurkissa olevien päärautojen k/k-etäisyys. Kaavojen parametrejä on esitetty kuvassa 7.

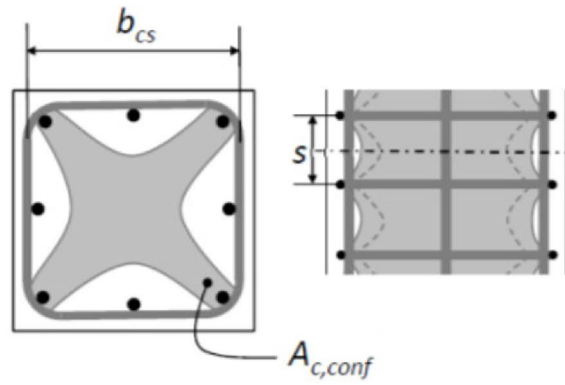


Kuva 10. Confinement-vaikutuksen laskennassa käytettäviä parametrejä. (Model Code 2010 2012)

Tulevan Eurokoodin luonnos antaa yhdellä leikkeellä raudoitettun neliöpoikkileikkauksen sidontajännityksen laskentaa varten kaavan (6)

$$\sigma_2 = \frac{2A_{s.conf} f_{yd}}{b_{cs} s} \quad (6)$$

jossa b_{cs} haan keskilinjojen väli, $A_{s.conf}$ yhden hakaleikkeen poikkileikkausala ja s hakojen pystysuuntainen k/k-jakoväli. Kaavan parametrit on esitetty kuvassa 8.



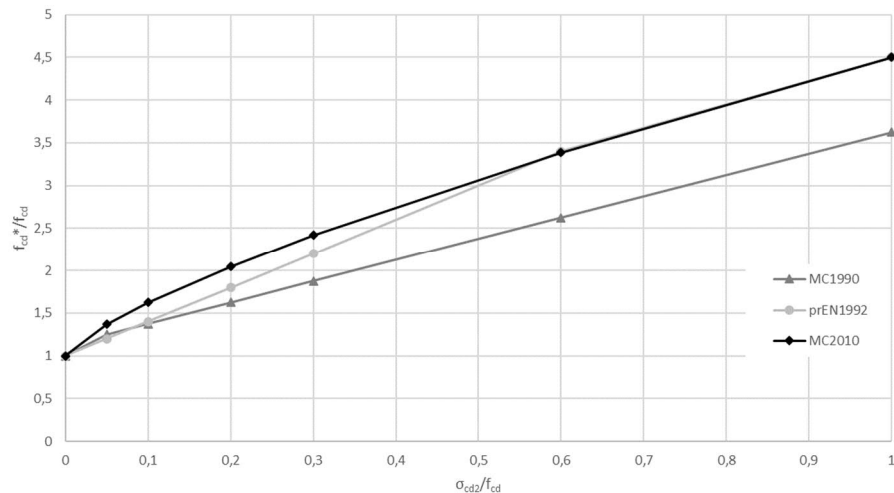
Kuva 11. Parannetun puristuslujuuden vaikutusalue seuraavan sukupolven Eurokoodin luonnoksen mukaan (prEN 1992-1-1 luonnos 2018)

Lisäksi tulevan Eurokoodin luonnoksessa on esitelty laskentatapa sen poikkileikkauksen osuuden määrittämiseen, johon laskennassa voidaan soveltaa korotettua pääsuunnan puristuslujuutta. Kuvan 8 mukaiselle neliöpoikkileikkaukselle tämä ala lasketaan kaavalla

$$A_{c,conf} = \frac{(b_{cs} - s/2)^2}{3}. \quad (7)$$

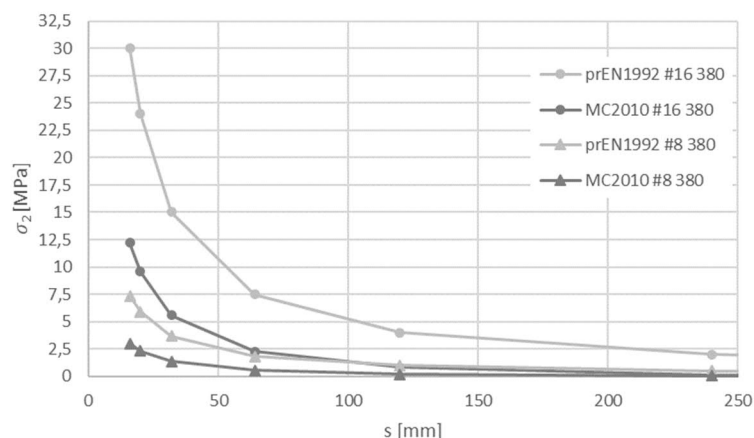
3. LASKENNALLISET TARKASTELOT

Kappaleen 2.3.4 kaavoilla 1-3 lasketut parannukset pääsuunnan puristuslujuuteen on esitetty kuvassa 12. Vertailukelpoisuuden vuoksi nykyisen Eurokoodin sijasta on käytetty vuoden 1990 Model Coden kaavoja, joissa on käytetty jännitysten mitoitusarvoja ominaisarvojen sijasta.



Kuva 12. Confinement-vaikutus eri laskentatavoilla.

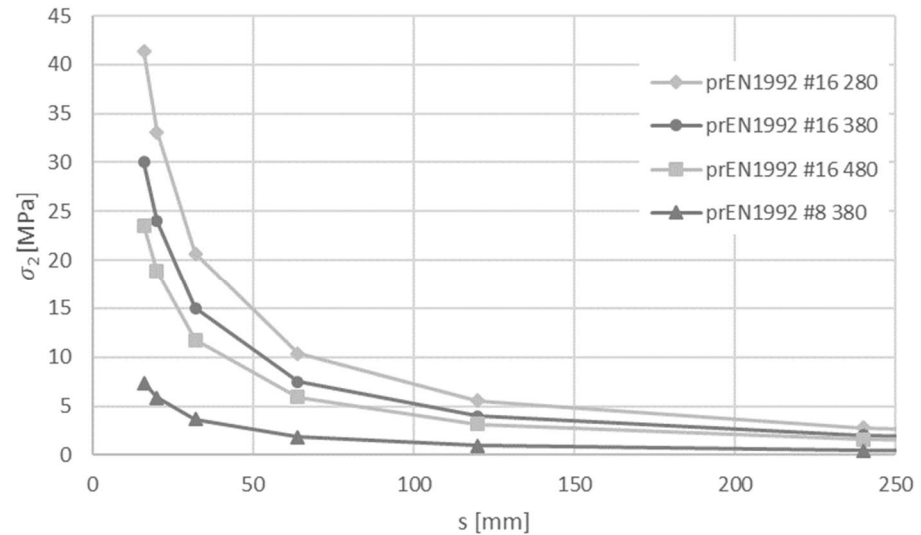
Kuviin 13-15 on koottu kaavojen (4) ja (6) vertailukäyrät erilaisilla pilareilla hakajaon s suhteen. Kaavan (4) viimeistä tekijää varten on poikkileikkaukseen oletettu 32 mm pääraudat haan sisänurkkiin. Kuvassa 13 on esitetty esimerkin omainen 380 mm neliöpilari, jonka hakaraidoitus on joko 8 tai 16 mm.



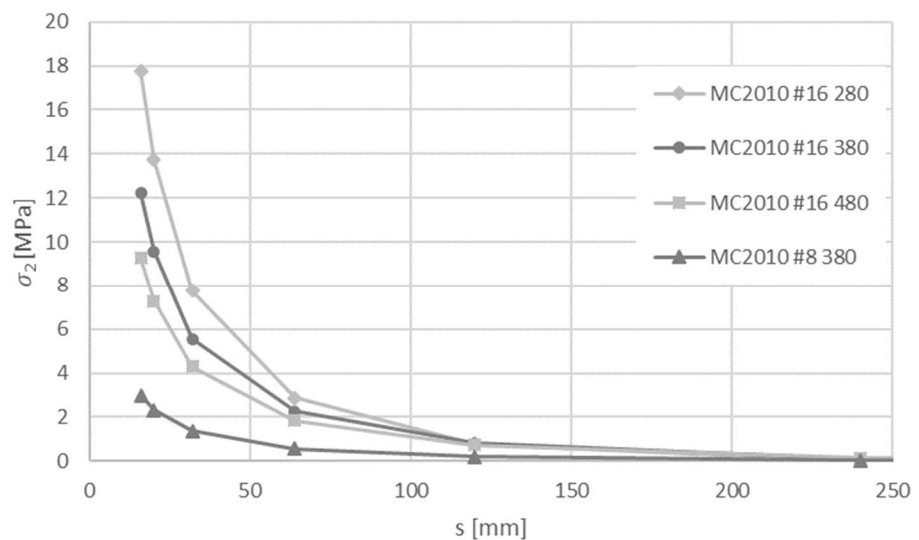
Kuva 13. Sitova jännitys σ_2 380 mm neliöpilarilla laskettuna kaavojen (4) ja (6) mukaisesti.

Ensinnäkin voidaan huomata, että Model Code 2010 kaava on konservatiivisempi kuin seuraavan sukupolven Eurokoodiin kaavailtu. Lisäksi merkittävän sitovan vaikutuksen

aikaan saaminen vaatii huomattavaa hakarautoituksen määrää pituusmetriä kohden. Käytännössä tämä tarkoittaa siis joko paksuja tankoja tai hyvin tiheää hakajakoa. Kuvissa 14 ja 15 on verrattu pilarin sivumitan vaikutusta sitovaan jännitykseen σ_2 .



Kuva 14. Seuraavan sukupolven Eurokoodin mukaisesti kaavoilla (4) ja (6) laskettuja sitovan jännityksen σ_2 arvoja erikokoisilla pilareilla.



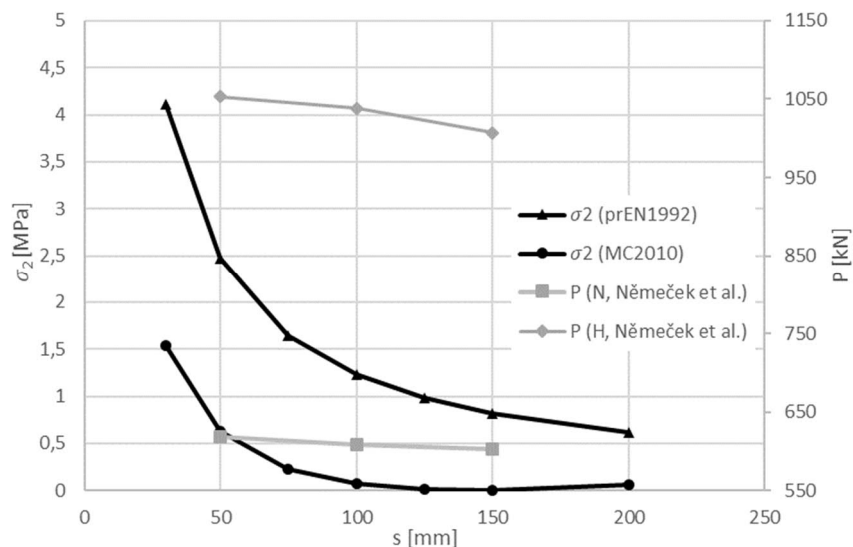
Kuva 15. Model Code 2010 mukaisesti kaavoilla (4) ja (6) laskettuja sitovan jännityksen σ_2 arvoja erikokoisilla pilareilla.

Kuvia 14-15 vertailemalla huomataan, että sitovan vaikutuksen kertaluokka tiheälläkin hakajaolla pienenee huomattavasti pilarin sivumitan kasvaessa. Kuvasta 13 huomataan hakaterästen määrän vaikuttavan sidontajännityksen suuruusluokkaan merkittävästi.

Nykyisen Eurokoodin ja Suomen kansallisten valintojen perusteella kuvan 13 tapaus voisi esittää tyypillistä pilaria, jossa olisi 32 mm pääraudoitus, ja näin ollen 8 mm hakaraudoitus täyttäisi minimivaatimuksen. Hakajako saisi olla korkeintaan pilarin sivumitta 380 mm, ja toisaalta kiviaineesta riippuen vähintään 36...51 mm. Suurin sidontajännitys saavutettaisiin minimijaolla, jolloin σ_2 olisi luokkaa 1...2,5 MPa. Hakajaon ollessa 100 mm tai suurempi, sen hyödynnettävissä oleva poikkileikkausta sitova vaikutus häviää.

Hakaraudoituksen betonin pääsuunnan puristuskestävyyttä parantavaa vaikutusta laskettaessa ei oteta huomioon pilarin stabiiliusilmiöitä. Mitä hoikempi rakenne on, sitä pienempi osuus puhtaasta puristuskapasiteetista päästään hyödyntämään ennen pilarin murtoa (BY 211 2014, s. 101). Parantunutta puristuskestävyyttä päästäänkin hyödyntämään täysimääräisesti vain jäykillä tai lyhyillä pilareilla.

Kuvaan 16 on laskettu Němeček et al. koestamien pilarien hakaraudoituksesta aiheutuva teoreettinen poikittaisjännitys σ_2 laskettuna Model Code 2010:n ja seuraavan sukupolven Eurokoodin luonnoksen mukaisesti (kaavat 4 ja 6). Lisäksi on esitetty Němeček et al. (2005) tutkimuksen keskimääräiset murtokuormat eri hakajaoilla s betoneilla N ja H, joiden koestettujen keskimääräiset lieriölujuudet olivat 30,0 ja 67,2 MPa.



Kuva 16. Hakaraudoituksen sitova vaikutus σ_2 Němeček et al. (2005) koestamissa pilareissa laskettuna kaavoilla (4) ja (6), sekä koestettujen pilarien keskimääräiset murtokuormat P .

Kaavoilla (4) ja (6) laskettuna poikittaisjännitys σ_2 jää siis 0...2,5 MPa välille, mikä tarkoittaa tutkimuksessa käytetyillä betoneilla yleensä pääsuunnan puristuskestävyyden pysyvän muuttumattomana. Pienimmällä 50 mm hakajaoilla päästäisiin kaavasta riippuen kuitenkin 10...30 prosenttia mitoitusarvoa korkeampaan betonin puristuslujuuteen.

4. YHTEENVETO

Hakaraudoituksen vaikutus pilarin pääsuunnan lujuuteen on aihe, josta varsinkin suomenkielistä tietoa on hyvin vähän. Pilarien hakaraudoitusta on yleensä tutkittu maanjäristysten kannalta, jolloin niiden toiminta leikkausraudoituksena korostuu. Hakaraudoituksella on kuitenkin myös Eurokoodin puitteissa huomioon otettavissa oleva merkitys poikkileikkauksen laajenemista estävänä raudoituksena. Seuraavan sukupolven Eurokoodi tulee tarjoamaan yksinkertaistetut kaavat mitoitus varten.

Erytisen tärkeitä pilarin jännitysten tasaisen sitomisen kannalta on poikittaisraudoituksen tasainen jakautuminen pilarin pituudelle. Hyviä tuloksia saavutetaan jo pienentämällä hakojen halkaisijaa ja jakamalla sama teräsmäärä lyhyemmille jakoväleille. Poikkileikkauksista voidaan sitoa hyvin käyttämällä pyöröteräksen sijasta lattalevyjä. Teräksen tasaisempi jakaminen aiheuttaa toisaalta työmaalla tai elementtitehtaassa lisää kuluja, joten kustannussäästöjä ei välttämättä saavuteta.

Nykystandardeissa hakaraudoituksen mitoitus perustuu lähinnä vakiolukuarvoihin sekä pääraudoituksen ja poikkileikkauksen mittoihin. Nykyisten määräysten mukaisilla minimihakaraudoituksilla ei laskennallisten mitoitusmallien mukaan saavuteta lainkaan parannusta pilarin pääsuunnan puristuskapasiteettiin.

Nykyisen Eurokoodin poikkileikkauksista sitovan raudoituksen betonin pääsuunnan lujuutta kasvattavan vaikutuksen huomioimiseen käytetty menetelmä perustuu suoraan Model Code 1990:n vastaavaan. Seuraavan sukupolven Eurokoodin luonnoksessa esitetty mitoitusmalli on merkittävästi nykyistä yksinkertaisempi. Se pohjautuu Model Code 2010:n, mutta ei-pääsuunnan jännityksen σ_2 laskennassa on näiden kahden välillä huomattava ero. Tulevan Eurokoodin luonnos antaa noin kolminkertaisia arvoja jännitykselle σ_2 Model Code 2010:n verrattuna.

Koska betonin puristuslujuutta pystytään parantamaan poikittaisraudoituksella, olisi hyödyllistä toteuttaa tutkimus hakarautojen koko-, muoto- ja jakovaikutuksesta teräsbetoni-pilarin kapasiteettiin Suomessa käytössä olevilla betonityypeillä.

LÄHTEET

B4 2005. Suomen rakentamismääräyskokoelma B4. Betonirakenteet. Ympäristöministeriö.

B4 1981. Suomen rakentamismääräyskokoelma B4. Betonirakenteet. Sisäasiainministeriö.

BFS 2019:1 (2019). Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder). Boverket.

BS (2005). UK National Annex to Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules. Structural fire design

BY 211 (2014). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja - osa 2. Suomen Betoniyhdistys ry.

CEN/TC 250/SC 2. N 1358. Final Version of PT1-draft prEn 1992-1-1 2018 D3.

DIN EN 1992-1-1/NA (2008). Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. DIN.

Hassoun, M. N. & Al-Manaseer, A. (2008). Structural concrete: theory and design, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

Hassoun, M. N. & Al-Manaseer, A. (2015). Structural concrete: theory and design, 6th ed. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

Liikenneviraston ohjeita 31/2017 (2017). Eurokoodin soveltamisohje. Betonirakenteiden suunnittelu. NCCI 2.

Model Code 1990 (1993). Committee Euro-International du Beton, Lausanne.

Model Code 2010 - Final draft, Volume 1 (2012). International Federation for Structural Concrete (fib). Lausanne.

Model Code 2010 - Final draft, Volume 2 (2012). International Federation for Structural Concrete (fib). Lausanne.

Němeček, J., Padevět, P., Patzak, B. & Bittnar, Z. (2005). Effect of transversal reinforcement in normal and high strength concrete columns. *Materials and Structures*, 38(7), pp. 665.

Radnic, J., Markic, R., Harapin, A., Matesan, D. & Baloevic, G. (2013). Stirrup effects on compressive strength and ductility of confined concrete columns. *World Journal of Engineering*, 10(6), pp. 497–506.

SFS-EN 1992-1-1 (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardoimisliitto.

Ympäristöministeriö (2016). Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.