



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

EETU SALONEN

PYÖREÄN BETONI-TERÄS- LIITTOPILARIN PALOMITOITUS

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN
KOULUTUSOHJELMA

2020

Tekijä Salonen, Eetu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä: 84 Liitteitä: 3	Päivämäärä Toukokuu 2020 Julkaisun kieli suomi
Julkaisun nimi Pyöreän betoni-teräs-liittopilarin palomitoitus		
Tutkinto-ohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka		
<p>Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus perustuu Suomessa standardin EN 1994-1-1 mukaisiin ohjeisiin. Betonitäytteisten putkiliittopilarien kantavien osien palomitoitus tarkastellaan standardin EN 1994-1-2 mukaisesti. Suomen ympäristöministeriö on julkaissut kansallisen liitteen standardiin SFS-EN 1994-1-2-NA, jonka mukana on soveltamisohje (NCCI) betonilla täytettyjen putkiliittopilarien palomitoitukseen.</p> <p>Liittorakenteet ovat erittäin laaja käsite. Niiden suunnittelussa ja mitoittamisessa pitää hallita betonin, teräksen sekä kuormien ja niiden yhdistelyihin liittyvien eurokoodien eri osien tunnistaminen. Tämän työn päätavoitteena on koota kattava kokonaisuus pyöreän betoni-teräs -liittopilarin suunnittelulle ja mitoittamiselle palotilanteessa sekä antaa riittävä määrä vertailukelpoisia tuloksia eri mitoitusyökalujen ja menetelmien välillä. Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli tarkastella SFS-EN 1994-1-2 NA soveltamisohjeen NCCI:n menetelmän laajentamisen mahdollisuuksia.</p> <p>Työ toteutettiin perehtymällä erittäin laajasti aiheen kirjallisuuteen sekä erityisesti Suomen kansallisen liitteen soveltamisohjeen NCCI:n menetelmään. Työssä tutustuttiin myös yritysten kehittämiin laskentatyökaluihin.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin varmuutta laskentamenetelmien toimivuudesta sekä löydettiin espanjalaisen Ana Espinosin kehittämä uusi palomitoitusmenetelmä, joka osoittautui erittäin mielenkiintoiseksi. Lopputuloksena saatiin myös erittäin kattava määrä hyviä vertailukelpoisia tuloksia eri menetelmien välillä.</p>		
Asiasanat Liittopilari, palomitoitus, standardi, toinen kertaluku, soveltamisohje (NCCI)		

Author Salonen, Eetu	Type of Publication Bachelor's thesis Number of pages: 84 Appendices: 3	Date May 2020 Language of publication finnish
Title of publication Fire design for round concrete-steel composite column		
Degree programme Construction and civil engineering		
<p>The structural design of composite columns in Finland is based on guidelines in accordance with the standard EN 1994-1-1. Fire design of the load-bearing parts of concrete-filled tubular columns is considered in accordance with the standard EN 1994-1-2. The Ministry of the Environment of Finland has published a National Annex SFS-EN 1994-1-2-NA which is accompanied by application directive (NCCI) for fire design of concrete-filled tubular columns.</p> <p>Composite structures are a very broad concept. In their design and dimensioning, the identification of different parts of the Eurocodes related to concrete, steel and loads as well as their combinations must be mastered. The primary objective of this thesis is to compile a comprehensive set for the design and dimensioning of a round concrete-steel composite column in the event of a fire and to provide a comprehensive number of comparable results between different design tools and methods. One of the aims of the study was to examine the possibilities of extending the method of the application directive published with SFS-EN 1994-1-2 NA.</p> <p>The study was carried out by getting acquainted with the literature on the topic and, in particular, the NCCI method of the application directive published with the Finnish National Annex. The thesis also introduced the calculation tools developed by other companies.</p> <p>As a result of the study, the functionality of the calculation methods was confirmed and a new fire design method developed by a Spanish Ana Espinos was found, which proved to be very interesting.</p> <p>A comprehensive number of good comparable results between different methods was also achieved as a result.</p>		
<p><u>Key words</u></p> <p>composite column, fire design, standard, second order, application directive (NCCI)</p>		

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Sweco Rakennetekniikka Oy:lle. Työssä tehtiin vertailevaa tutkimusta liittopilarien palomitoituksen eri menetelmien välillä.

Haluan kiittää Rauman osastopäällikköä Juha Junttilaa, joka tarjosi hyvät työtilat ja laitteet koko opinnäytetyöprojektin ajaksi. Kiitokset myös DI Timo Pekkiselle, joka toimi opinnäytetyön virallisena valvojana ja ohjasi projektin alusta loppuun.

Erityiskiitokset on ansainnut DI Arto Sivill, joka vahvalla ammattitaidolla edesauttoi omaa oppimistani aihetta kohtaan ja antoi rakentavaa palautetta työni sisällöstä. Suuret kiitokset myös Satakunnan ammattikorkeakoulun puolelta ohjaajalleni Lehtori Juuso Lahdenmaalle, joka oli aina valmis avustamaan minua opinnäytetyössäni.

Kiitokset myös Ilkka Uotilalle, Erkki Hömmölle ja Jari Toijoselle, että käytitte aikaanne tämän opinnäytetyön parissa ja autoitte työni etenemisessä.

Raumalla 03.05.2020

Eetu Salonen

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	9
1.1 Tutkimuksen tausta.....	9
1.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	11
1.3 Tutkimuksen ja vertailulaskemien rajaukset	11
2 LIITTOPILARIT.....	13
2.1 Materiaaliominaisuudet	14
2.1.1 Rakenneteräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet.....	15
2.1.2 Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet	16
2.1.3 Betoniteräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet	17
2.2 Tyypillinen liittopilari Suomessa	18
2.3 Palotilanne	20
3 PALOMITOITUSMENETELMÄT.....	22
3.1 Taulukkomitoitus.....	23
3.2 Yksinkertainen menetelmä	26
3.3 Kehittyneet mitoitussmallit	36
4 LIITTOPILAREIDEN PALOMITOITUS.....	38
4.1 Rakenteiden palonaikainen käyttäytyminen.....	39
4.1.1 Pilarin jatkuvuus	41
4.2 Putkiliittopilarien teholliset ominaisuudet palomitoituksessa.....	42
4.2.1 Ekvivalentti betonilämpötila.....	43
4.2.2 Teräksen- ja raudoituksen lämpötilat.....	44
4.3 Kuorman epäkeskisyyden vaikutuksien tarkastelu.....	47
5 LASKENTATYÖKALUJEN VERTAILU	51
5.1 Vertailulaskelmat.....	55
5.1.1 Sarja 1	56
5.1.2 Sarja 2	59
5.1.3 Sarja 3	62
5.1.4 Sarja 4	64
5.2 Johtopäätökset	66
6 A.ESPINOS’N MENETELMÄ	67
6.1 Vertailulaskelmat.....	70
6.1.1 Sarja 1	71

6.1.2 Sarja 2	74
6.1.3 Sarja 3	76
6.2 Johtopäätökset	78
7 YHTEENVETO	79
7.1 Tavoitteiden saavuttaminen.....	80
7.2 Jatkotutkimustarpeet.....	81

LÄHTEET

LIITTEET

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CFT	engl. Concrete filled tubular
Comcol	Rautaruukki Oyj:n kehittämä liittopilarin mitoitusohjelma
NCCI	Soveltamisohje, Non-Contradictory Complementary Information (NCCI)
RFCS	Research Fund for Coal and Steel
SCI	The Steel Construction Institute
SFS-EN	Suomen Standardisoimisliiton hyväksymä Eurokoodi
SKOL ry	Suunnittelu- ja konsulttialan toimialajärjestö
TRY	Teräsrakenneyhdistys

A_a	teräsosan poikkipinta-ala
A_c	betoniosan poikkipinta-ala
A_s	betoniraudoituksen kokonaispoikkipinta-ala
$A_{s,1}$	yhden raudoitustangon poikkipinta-ala
B_{fi}	kerroin
D	pyöreän teräsprofiilin halkaisija
D_c	betoniosan halkaisija
D_n	neutraaliakselin etäisyys rakenteen symmetria-akselista
D_s	raudoitustankojen keskiöetäisyys
e_0	alkukäyryys
E_a	teräsosan kimmokerroin
E_d	normaalilämpötilamitoituksen voimasuureen mitoitusarvo
e_{fi}	kuorman epäkeskisyyden palotilanteessa
$E_{c,sec.\theta}$	palotilanteen sekanttikimmokerroin
$E_{fi,d,t}$	palotilanteen voimasuureen mitoitusarvo ajanhetkellä t
EI	taivutusjäykkyys
$EI_{eff,fi}$	palotilanteen tehollinen taivutusjäykkyys
$EI_{eff,II,fi}$	epälineaarisen kuorman palotilanteen tehollinen taivutusjäykkyys
E_s	raudoituksen kimmokerroin
$E_{s,\theta}$	palotilanteen raudoituksen kimmokerroin
$f_{cc,\theta}$	palonaikainen betonin suljettu lujuus
f_{ck}	betonin lujuus
f_u	teräksen vetomurtolujuus
f_{sk}	teräksen myötöraja
f_y	teräksen myötölujuus
I	neliömomentti
I_a	teräsosan neliömomentti
I_c	betoniosan neliömomentti
I_s	raudoituksen neliömomentti
k	perustusten joustoluku
$k_{c,\theta}$	betonin materiaaliominaisuuksien pienennyskerroin
k_m	suurennuskerroin
L	pilarin korkeus
$L_{c,\theta}$	nurjahduspituus
M_{Ed}	murtorajatilan mitoitusmomentti
$M_{Ed,fi}$	palotilanteen mitoitusmomentti

$M_{pl.Rd.fi}$	palotilanteen plastinen taivutuskestävyys
$M_{max.Rd.fi}$	suurin taivutuskestävyys epäkeskeisellä normaalivoimalla
$M_{n.Rd.fi}$	rakenteen taivutuskestävyys $2D_n$ alueella
$N_{cr.fi}$	kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma palotilanteessa
$N_{c.Rd.fi}$	betonipoikkileikkauksen puristuskestävyys
$N_{Ed.fi}$	palotilanteen normaalivoima
$N_{pl.Rd.fi}$	palotilanteen plastinen puristuskestävyys
$N_{Rd.fi}$	palotilanteen nurjahduskestävyys
$N_{Rd.fi,\delta}$	palotilanteen epäkeskeisesti kuormitetun pilarin puristuskestävyys
n_s	raudoitustankojen lukumäärä
R_d	normaalilämpötilamitoituksen kestävyuden mitoitusarvo
$R_{fi,d,t}$	palotilanteen kestävyuden mitoitusarvo ajanhetkellä t
t	rakenneputken seinämävahvuus
u_s	raudoituksen keskiöetäisyys teräsputken sisäpinnasta
W_p	plastinen taivutusvastus
W_{pa}	teräsosan plastinen taivutusvastus
W_{pan}	rakenneteräksen taivutusvastus $2D_n$ suhteen
W_{pc}	betoniosan plastinen taivutusvastus
W_{pcn}	betoniosan taivutusvastus $2D_n$ suhteen
W_{ps}	raudoituksen plastinen taivutusvastus
W_{psn}	raudoituksen taivutusvastus $2D_n$ suhteen
α_θ	nurjahduskäyrän c mukainen epätarkkuustekijä
β_0	terästen keskiöetäisyyttä vastaava ekvivalentin lämpötilan kerroin
β_1	terästen keskiöetäisyyttä vastaava ekvivalentin lämpötilan kerroin
β_2	terästen keskiöetäisyyttä vastaava ekvivalentin lämpötilan kerroin
β_3	terästen keskiöetäisyyttä vastaava ekvivalentin lämpötilan kerroin
$\sigma_{a,\theta}$	palotilanteen suurin teräsännitys
ε_{cu}	suurin puristuma käyrän laskevassa osassa
$\gamma_{M,fi,a}$	teräsosan palotilanteen osavarmuusluku
$\gamma_{M,fi,c}$	betonin palotilanteen osavarmuusluku
$\gamma_{M,fi,s}$	raudoituksen palotilanteen osavarmuusluku
$\eta_{fi,t}$	kuormitustaso
$\theta_{a,i}$	teräsosan mitoituslämpötila
$\theta_{c,equ}$	betonin ekvivalentti lämpötila
θ_{sc}	neliöpoikkileikkauksen nurkissa sijaitsevien terästen lämpötila
$\theta_{s,i}$	raudoituksen mitoituslämpötila
θ_{sm}	neliöpoikkileikkauksen sivujen keskellä sijaitsevien terästen lämpötila
$\bar{\lambda}$	muunnettu hoikkaus
$\bar{\lambda}_\theta$	palotilanteen muunnettu hoikkaus
ρ_s	raudoitussuhde
Φ_θ	apusuure
φ_θ	sovituskerroin
$\varphi_{a,\theta}$	sovituskerroin
$\varphi_{s,\theta}$	sovituskerroin
$\varphi_{c,\theta}$	sovituskerroin
X_θ	heikennyskerroin
χ_θ	pienennyskerroin

1 JOHDANTO

Liittopilari käsitteenä kattaa monta erilaista pilarimallia, joista eniten Suomessa käytössä ovat betonitäytteiset putkiliittopilarit. Niissä on yhdistetty eri materiaaleja toisiinsa ja näin on pyritty saavuttamaan suurempia jäykkyyksiä kuin materiaaleilla yksinään toimiessa. Liittopilarirakenteissa pyritään materiaalien yhdistämisellä hyödyntämään teräksen kohtuullisen hyvä puristus- ja vetokestävyys sekä betoniosan suurta puristuskestävyyttä. Liittopilarilla siis tarkoitetaan rakennetta, jossa teräsprofiilin ulko- tai sisäpuolelle on valettu betonia puristus- ja palonkestävyyden parantamiseksi.

Liittorakenteiden kestävyystarkastelut perustuvat Eurokoodeihin, jotka ohjaavat kantavien rakenteiden suunnittelua. Näitä standardeja on täydennetty Suomen ympäristöministeriön vahvistamalla kansallisilla liitteillä ja soveltamisohjeilla (NCCI). Lisäksi Suomen betoniyhdistys ry ja Teräsrakenneyhdistys ry ovat julkaisseet yhteistyössä liittorakenteita edustavien tutkijoiden kanssa tähän liittyvää oppimateriaalia.

Opinnäytetyössä syvennyttään liittopilarien käyttäytymiseen palotilanteessa, joka on tärkeää suunnitteluprosessissa. Tarkoitus on saada lukija ymmärtämään palomitoitustarkastelussa toisen kertaluvun aiheuttamat vaikutukset. Tutkimuksessa käsitellään eri työkaluja ja menetelmiä liittopilarien mitoittamiseen. Vertailulaskelmien pohjalta kehoitetaan lukijaa tietynlaiseen kriittisyyteen valmiita laskentapohjia ja menetelmiä kohtaan.

1.1 Tutkimuksen tausta

Liittorakenteet ovat kokonaisuudessaan erittäin laaja ja ehkä hieman vieraampi aihealue perinteisten suunnittelijoiden keskuudessa. Liittorakenteet ovat siinä mielessä mielenkiintoinen ja samalla haastava rakennusmateriaali, sillä niiden käytössä pitää hallita betonirakenteiden, teräsrakenteiden ja raudoitusten sekä kuormiin ja niiden yhdistelyihin liittyvien eurokoodien eri osien tunnistaminen.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävien liittopilarien palomitoitus perustuu standardiin SFS-EN 1994-1-2 ja siihen liittyviin ohjeisiin ja oppimateriaaleihin. Muuten liitorakenteita käsittelee standardi SFS-EN 1994-1-1 sekä sen mukaiset ohjeet. Palomitoitusstandardin EN 1994-1-2 mukaan pilareiden palomitoituksen tarkastelut voidaan suorittaa käyttäen taulukkomitoitusta, yksinkertaisia laskentamalleja tai kehittyneitä laskentamalleja. Taulukkomitoitus mielletään nykyisin hieman huonoksi, sillä mitoittamisen rajoitukset tekevät rakenteesta etenkin suuremmilla poikkileikkauksilla helposti palokuorman nähden reilusti ylimitoitettun, jolloin tulokset ovat turhankin paljon varmallalla puolella. Nykyisen rakentamisen kustannukset ovat muutenkin erittäin suuria, joten rakenteet pitäisi pyrkiä mitoittamaan sopivassa suhteessa varmalle puolelle. Yksinkertaisissa laskentamalleissa palomitoituksen tarkastelut perustuvat kriittisen nurjahduskuorman laskennassa esitettäviin rajoituksiin, jolloin rakenteen muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_\theta$ ei ylitä arvoa 2. Kestävyyden laskennan tärkeimpiä tarkasteluja on taivutusjäykkyyden $EI_{eff.fi}$ määrittäminen, johon vaikuttavat rakenteessa käytettävien materiaalien, kuten rakenneteräksen, betonin ja betoniteräksen poikkileikkausarvot sekä lämpötilat. Kyseisiä poikkileikkauksen arvoja ovat pinta-alat, neliömomentit ja plastiset taivutusvastukset. Taivutusjäykkyyden määrittämisessä vaikuttavia tekijöitä ovat sovituskertoimet φ_i ja materiaalien pienennyskertoimet k . Kehittyneet laskentamallit toimivat todellisen palonkestävyydeltä tarkastelun mukaisesti ja siinä saadaan selville rakenteiden todelliset lämpötilat materiaalin eri kohdissa. Näiden lämpötilojen avulla pystytään laskemaan jokaisen lämpötilakerroksen poikkileikkausarvot, minkä jälkeen rakenne pystytään tarkkaan analysoimaan ensimmäisen- ja toisen kertaluvun teorian mukaisesti. Kyseisten laskentamallien käyttö tulee todelliseen tarpeeseen erittäin suurien kohteiden kuten Helsingin Olympiastadionin ja Tampereen teknillisen yliopiston Kampusareenan suunnittelussa. Kehittyneiden laskentamallien avulla pystytään saamaan suuriakin kustannussäästöjä, jotka tällaisissa kohteissa pitää pystyä esittämään suunnittelua kilpailutettaessa.

Standardin SFS-EN 1994-1-2 liitteessä H on esitetty yksinkertainen ja erittäin suppea laskentatapa betonitäytteisten putkiliittopilarien palomitoitukselle. Suomen kansallisen liitteen mukaan liitteen H käyttö on kuitenkin kielletty. Rakennusmääräyskokoelman rakenteiden lujuus ja vakaus -osion betoni-teräs -liittorakenteita koskevat ohjeet päivitettiin vuoden 2016 loppupuolella. Tämä ohje sisältää Suomen kansallisen liitteen

mukana julkaistun soveltamisohjeen NCCI. Kyseinen ohje pyrkii vähentämään liittopilarien palomitoituksen tarkastelujen epävarmuuksia ja antaa virallisen likimenetelmän betonitäytteisten putkiliittopilarien palomitoitukseen.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoite on koota selkeä ja kattava kokonaisuus betonitäytteisten putkiliittopilarien palomitoitukselle ja antaa sopiva määrä vertailukelpoisia tuloksia eri laskentamenetelmien avulla. Liittopilareista tai etenkin liittorakenteista on tehty monta erittäin hyvää diplomityötä, joissa käsitellään laajasti liittorakenteiden toimivuutta. Erona aikaisempiin tutkimuksiin tässä opinnäytetyössä pyritään keskittymään yhteen liittorakenneosaan ja sen kriittiseen tarkasteluun, eli palomitoitukseen. Liittorakenteen osa on tässä työssä liittopilarit, eli tarkemmin sanottuna pyöreät betonilla täytetyt rakenneputket.

Yhtenä tavoitteena on tutkia SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukana julkaistun soveltamisohjeen NCCI:n likimenetelmän laajentamista halkaisijaltaan yli 510 mm suurille poikkileikkauksille. Jos tätä laajennuksen mahdollisuutta ei ole tai sitä ei pystytä esittämään järkevästi, pyritään etsimään tutkimus tai esimerkiksi väitöskirja, jossa kyseistä asiaa olisi jo käsitelty.

Tutkimuksen laskelmissa pyritään vertailemaan rakenteiden toisesta kertaluvusta aiheutuvan taivutusmomentin vaikutuksia kestävyyteen ja näitä tuloksia on verrattu mm. Rautaruukki Oy:n kehittämän liittopilarityökalun iterointimenetelmän tuloksiin.

1.3 Tutkimuksen ja vertailulaskelmien rajaukset

Tässä tutkimuksessa aihe rajataan liittorakenteiden osalta ainoastaan Suomessa eniten käytettyihin liittopilareihin sekä niiden palomitoitukseen, ja esitetään normaalilämpötilan tarvittavat mitoitusuureet vain niiltä osin kuin on välttämätöntä. Tutkimuksessa käsitellään liittopilareista pääasiassa pyöreitä betonitäytteisiä rakenneputkia, sekä avataan neliöpoikkileikkausten suurimpia vaikuttavia tekijöitä pilarien mitoituksessa, jolloin taulukoissa pyritään esittämään myös arvot neliöprofiileille. Liittorakenteiden

palomitoitusstandardissa rajataan yksinkertaiset palomitoitusmenetelmät sivusuunnassa tuettujen kehien pilareille, joten näin ollen vertailulaskelmissa käytetyt tapaukset rajoittuvat myös samalla tavoin, vaikka sitä ei erikseen mainittaisi. Standardissa SFS-EN 1994-1-1 on rajoitettu betonin lujuusluokka välille C20/25 – C60/75, jolloin se toimii laskentamenetelmän mukaisesti. Vertailulaskelmissa betonin lujuusluokka annetaan lähtötiedoissa, mutta rajataan edellä mainitun säännön puitteissa.

Liittorakenteiden suunnittelussa eräs tärkeä huomioitava asia on rakenneputken täytövaihe betonilla. Nykyisillä pumppaustekniikoilla pystytään valamaan suuriakin pilareita yhdellä kertaa, jolloin pilariin kohdistuva valupaine voi rajoittaa poikkileikkauksen korkeutta. Tämän opinnäytetyön laskelmissa oletetaan kyseisten tapausten kestäväen niihin kohdistuvat valupaineet, eikä oteta tutkimustyön aikana kantaa valmistustapaan tai valupaineen huomioimiseen. Toinen tärkeä asia on liittopilarin yksityiskohtainen suunnittelu, joka tarkoittaa esimerkiksi pääteräkset yhteen sitovia hakoja ja niiden mitoittamista. Lisäksi putki varustellaan erillisillä asemointitangoilla, jotta saadaan betonipeitepaksuusvaatimukset sekä ylipäättään koko raudoituskokoonpano pysymään paikallaan valun aikana. Tässä opinnäytetyössä ei käydä liittopilarien yksityiskohtaista suunnittelua läpi tarkemmin, mutta tavoitteena on saada lukija ymmärtämään kestävyystarkastelujen jälkeiset suunnittelun toimenpiteet.

2 LIITTOPILARIT

Liittopilareiksi voidaan luokitella oikeastaan kaikki pilarit, joissa rakenneteräsosan lisäksi kantavana materiaalina on käytetty betonia raudoitettuna tai raudoittamattomana. Liittopilarit ovat saaneet alkunsa teräspilareista, joiden palonkestävyys on erittäin huono sellaisenaan, joten niitä peitettiin betonilla palonkeston saavuttamiseksi. Aluksi betoni ajateltiin rakenteessa ainoastaan palonsuojana, kunnes vuonna 1955 tehtiin ensimmäiset koekuormitukset epäkeskeisesti kuormitetuille pilareille. Näin todettiin betonin olevan hyödyllinen myös kantavana materiaalina. Liittopilareiden ensimmäisiä patenttihakemuksia on jo vuodelta 1898, mutta niiden käyttö alkoi kuitenkin yleistyä vasta 1900-luvun puolivälissä. (TRY/by36 1991, 71)

Liittorakenteiden suunnitteluohjeiden laatiminen aloitettiin Suomen betoniyhdistyksen ja Teräsrakenneyhdistyksen yhteistyönä vuonna 1981. Näiden ohjeiden laatiminen aloitettiin betonirakenteita koskevien rajatilamitoitukseen perustuvien normien uudistuttua sekä teräsrakenteiden normiuudistuksien käynnistyttyä. (TRY/by26 1988, 1) Liittorakenteiden sovellusohjeissa on annettu tarkempia taustatietoja sekä menetelmiä suunnitteluohjeissa by26 esitettyihin ohjeisiin. Palomitoitusta koskevat tarkemmat lisäohjeet ja julkaisut esitettiin ensimmäisen kerran liittorakenteiden sovellusohjeissa. (TRY/by36 1991, 3)

Liittopilarien palonkestävyyttä on tutkittu paljon eri puolilla maailmaa. Polttokokeiden perusteella on kehitetty erilaisia laskentamalleja paloteknistä mitoitusta varten. (Juvenen 2013, 103) Palomitoitus on yleensä hallitseva monessa liittopilarin mitoitustapauksessa ja se nousee usein määrääväksi tekijäksi, varsinkin Suomessa. Liittopilari-tyyppinä käytetään pääasiassa betonilla täytettyjä teräsputkia, joko neliö-, suorakaide- tai pyöreitä poikkileikkauksia. Tässä opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa pyöreitä pilaripoikkileikkauksia niiden suuren suosion takia.

Pilaripoikkileikkaukset ovat useimmiten kaksoissymmetrisiä ja silloin teräsprofiililla ja halkeilemattomalla betonipoikkileikkauksella on sama painopiste. Siten betoni- ja teräsosan välille ei muuttuvan momentin vaikutuksesta kehity liitoksen leikkausvuota.

Halkeilu muuttaa paikallisesti betoniosan painopisteen paikkaa pois poikkileikkauksen keskiöstä, mutta tästä kehittyvä leikkausvuo on pieni, jolloin sillä ei ole mitoituksen kannalta merkitystä. (TRY/by58 2012, 184)

2.1 Materiaaliominaisuudet

Materiaalien aineiden ominaisuuksia arvioitaessa voidaan tarkastella niiden fysikaalista rakennetta ja kemiallista koostumusta. Fysikaalisella rakenteella tarkoitetaan mm. aineen rakeisuutta, kiteisyyttä huokosten määrää ja ominaisuuksia. Sillä voidaan periaatteessa ilmaista kaikki aineeseen liittyvä informaatio molekyylitasosta ylöspäin. Kemialliset koostumukset määrittävät eri alkuaineiden määrän, niistä muodostuvien kemiallisten yhdisteiden koostumuksen sekä molekyylikokojen ja yhdisteiden suhteellisten määrien selvittämisen. Käyttöominaisuudet ohjaavat aineen soveltuvuutta tiettyyn tarkoitukseen. Käyttöominaisuuksia voidaan määritellä standardeihin perustuvilla kokeilla, mutta suuri osa perustuu pelkästään empiiriseen ja subjektiiviseen näkemykseen. (Siikanen 2009, 13)

Tässä opinnäytetyössä käsitellään betonitäyhteistä putkiliittopilaria ja sen materiaaleina toimivia betonia ja terästä yhdessä. Betonin hyvinä ominaisuuksina on suuri puristuslujuus ja hyvä palonkestävyys, kun taas teräksen hyviä ominaisuuksia ovat yhtäläinen puristus- ja vetolujuus sekä materiaalin keveys. Teräs on hyvälaatuista, koska valmistus on hyvin valvottua. Tasalaatuisuus on teräksen tunnusmerkki, jonka vuoksi suunnittelussa on pienet varmuuskertoimet. (Lahdenmaa 2019)

Mitoitettaessa putkiliittopilareita ainoastaan kestävyydellä on merkitystä ja käyttörajoitustarkastelut voi jättää kokonaan pois. Kun kuorma kasvaa oletetaan pilarin poikkileikkauksen jokaiseen osaan kehittyvän plastinen mitoituslujuus, ellei hoikkuuden aiheuttama epästabiilisuus tule rajoittamaan kestävyyttä ja jos jännitys-puristumaominaisuuksiltaan materiaalit ovat yhteensopivia. (TRY/by58 2012, 184)

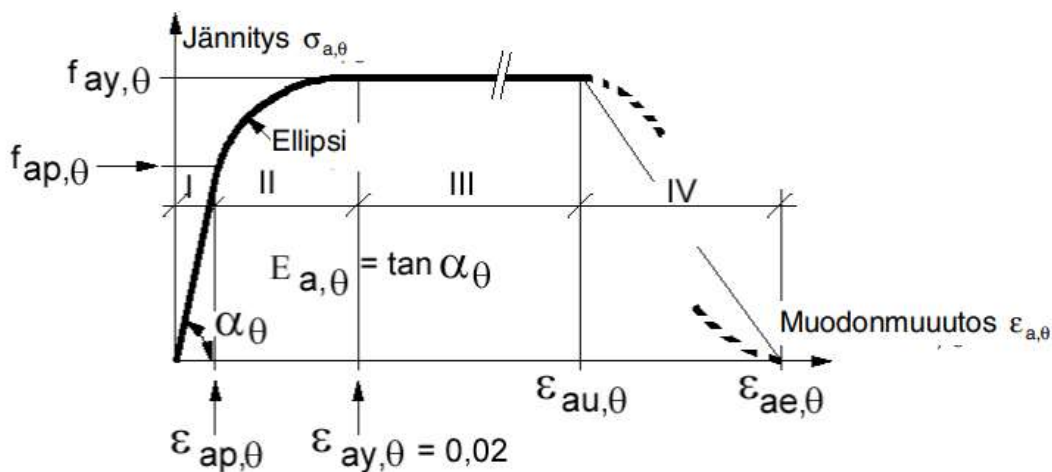
Palonkestävyyslaskelmissa huomioitavat materiaaliominaisuudet jaotellaan mekaanisiin- ja termisiin ominaisuuksiin. Rakennusaineiden termiset ominaisuudet (lämmön-

johtavuus, ominaislämpökapasiteetti, emissiokerroin) ja mekaaniset ominaisuudet kuten lujuus ja sitkeys (kimmo-ominaisuudet, lujuudet, lämpölaajeneminen) riippuvat voimakkaasti lämpötiloista. (Suomen RakMK B4 2005, 61) Kyseiset ominaisuudet määritellään standardissa EN1994-1-2 betonille ja teräkselle lämpötilan funktiona.

2.1.1 Rakenneteräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Teräs on tärkein rakennusteollisuudessa käytettävä jatkojalostustuote. Raudan ja hiilen lisäksi teräksessä on myös pieniä määriä erityyppisiä seosaineita. Teräksessä oleva hiilimäärä vaikuttaa olennaisesti teräksen lujuuteen ja kovuuteen, mutta taas suuri hiilipitoisuus poistaa teräksestä sitkeyttä ja notkeutta. Rakenneteräksen ominaisuuksista tärkeimpiä ovat suuret lujuudet puristuksessa kuin vedossakin. Rakenneteräksen edullisena ominaisuutena on myös sen kimmoisuus suhteellisen suuriin jännityksiin saakka sekä pienet ajasta riippuvat muodonmuutokset. (Siikanen 2009, 182.) Rakenneteräksen materiaaliominaisuudet määritellään standardissa SFS-EN 10025-2.

Liittorakenteissa tärkeimpiä ominaisuuksia ovat lujuus ja kimmokerroin. Yleisimmin käytetty teräslaji on S355, jonka myötölujuus on $f_y = 355 \frac{N}{mm^2}$, vetomurtolujuus $f_u = 510 \frac{N}{mm^2}$ ja kimmokerroin $E_a = 210 * 10^3 \frac{N}{mm^2}$. Rakenneteräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet kuumenemisnopeuden ollessa välillä 2 ja 50 K/min korkeissa lämpötiloissa saadaan kuvan 1 mukaisista muodonmuutosten sekä jännitysten välisistä yhteyksistä. (SFS-EN 1994-1-2, 27)



Kuva 1. Matemaattinen malli korkeissa lämpötiloissa rakenneteräksen jännityksen ja muodonmuutoksen välisistä yhteyksistä (SFS-EN 1994-1-2, 27).

Rakenneteräkset lajitellaan yleisiin ja erikoislajiin rakenneteräksiin. Lujuus osoittautuu usein liian alhaiseksi yleisten hitsattavien rakenneterästen osalta niille asetettujen vaatimusten kasvaessa. Tämän vuoksi on kehitelty lujempia hitsattavia teräksiä. Yleiset rakenneteräkset ovat kaikki kuumavalssattuja tuotteita ja niistä valmistetaan jatkojalosteina muun muassa kylmämuovattuja profiileja ja hitsattuja palkkeja. Yleisiä rakenneteräksiä kutsutaan seostamattomiksi rakenneteräksiksi. Seostamaton teräs ei sisällä lisäaineita kuin sen verran mitä valmistusvaiheessa on siihen tullut tai raaka-aineista jäänyt. (Siikanen 2009, 190.)

2.1.2 Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Betoni on maailmanlaajuisesti käytetty ja selkeästi suosituin rakennusmateriaali ja sen suosio perustuu monikäyttöisyyteen. Betoni on palamaton rakennusmateriaali ja sen hyvinä ominaisuuksina tunnetaan edullisuus, kosteuden kesto, lujuus ja jäykkyys, turvallisuus sekä sen muokattavuus. Betoni koostuu runkoaineesta, sementistä ja vedestä sekä mahdollisista lisä- ja seosaineista. Betonilla on lukemattomia käyttökohteita, pieniä ja suuria. Infrarakentamisessa betoni on paljon käytetty materiaali, esimerkiksi sillat, padot, satamat ja voimalaitokset rakennetaan betonista, mutta rakennusten perustuksissa betonia käytetään ylivoimaisesti eniten. (Betoniteollisuuden www-sivut 2020)

Betonin tärkein ominaisuus on puristuslujuus ja se riippuu vesi-sementtisuhteesta, sementtilaadusta ja betonin iästä. Betonin vesimäärän kasvaessa yli sementin hydratoitumisen tarvittavan määrän, kaikki vesi ei pääse reagoitumaan ja siitä muodostuu kapillaarihuokosia. Huokosia syntyy myös, jos betoniin jää ilmaa ja nämä alentavat lujuutta sekä säilyvyyttä. Muita kovettuneen betonin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa sementtiliimamäärän suhde runkoaineeseen, runkoaineen rakeisuus sekä kovettuneen betonin kosteuspitoisuus. Vetolujuus on selkeästi pienempi puristuslujuuteen verrattuna eli noin 1/10. Vetojännitys otetaan rakenteessa vastaan raudoituksella. (Siikanen 2009, 148.)

Kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset ovat välitön kimmainen eli elastinen muodonmuutos, joka tapahtuu heti kuormituksen alettua ja palautuu takaisin, kun kuormitus poistetaan. Viruma on plastinen muodonmuutos, joka on pysyvä. Kun rakenteeseen vaikuttaa pieni jännitys niin silloin muodonmuutoksen ja jännityksen välinen yhteys on lineaarinen. Kun taas jännitys ylittää puolet betonin puristuslujuudesta muodonmuutos ei kasva enää suoraviivaisesti, kun sen jännitys lisääntyy. Tämä aiheuttaa plastista muodonmuutosta, joka kasvaa nopeammin kuin jännityksen perusteella olisi odotettavissa. Betonia kuormitettaessa tapahtuu myös ajasta johtuva muodonmuutos. Tätä kutsutaan virumaksi, joka tarkoittaa muodonmuutoksen kasvua silloin kuin kuormitus on pitkävaikutteista. (Siikanen 2009, 149.)

Lämpötilaerot rakenteessa ja niiden osissa aiheuttavat jännityksiä, joiden ylittäessä betonin lujuuden syntyy halkeamia. Vaikka betoni on syttymätön ja palamaton aine, sen osa-aineet eivät kuitenkaan kestä pitkäaikaista kuumuutta, vaan rakenne alkaa halkeilla ja rapistua eri syistä. Betonilla on +300 °C:n lämpötilassa puristuslujuudesta jäljellä 80-90% ja +500 °C:n lämpötilassa enää 50%. Aivan tavallinen betoni heikkenee huomattavasti jo yli +250 °C:n lämpötilassa. (Siikanen 2009, 150)

2.1.3 Betoniteräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Betoniteräksellä tarkoitetaan harjakuvioista terästä, jota käytetään betonirakenteen jännittämättömään raudoitukseen. Se on valmistettu kuumavalssaamalla ja/tai kylmämuokkaamalla hiiliteräksestä, austeniittisesta eli haponkestävästä ruostumattomasta

teräksestä tai austeniittis-feriittisestä, jossa korroosio-ominaisuudet ovat yleisesti ottaen erittäin hyvät. (Kiviniemi 2019, 15) Betonirakenteiden raudoitteet koostuvat pääteräksistä, hakasista ja asennusteräksistä.

Betoniterästä käytetään parantaessa betonirakenteen heikkoja puolia kuten kykyä ottaa vastaan suurimmat vetorasitukset sekä kykyä parantaa taivutus- ja leikkauskestävyyttä. Betoniterästen tulee olla sertifioituja ja täyttää niille asetetut vaatimukset, jotka on määritelty SFS-standardeissa. Teräslaadut nimetään eurokoodin EN 10080 mukaan sen käyttötarkoituksen, myötölujuuden, sitkeyden ja lisämerkinnän perusteella. (Hietanen 2009)

Suomessa rakentamisessa yleisesti käytettävä teräslaatu on B500B, joka on eurooppalaisen standardin mukainen merkintä. Merkinnässä ensimmäinen B tarkoittaa betoniterästä ja jälkimmäinen B sitkeysluokkaa. Yleisesti kuumavalssatut teräkset ovat sitkeysluokkaa B. Samalle teräkselle on vanha Suomen kansallinen merkintätapa A500HW, jossa merkinnällä A tarkoitetaan kuumavalssattua terästä, merkinnällä H kuumavalssattua harjakuvioista terästä sekä merkinnällä W hitsattavaa teräslaatua. Kyseiset merkinnät voivat mennä sekaisin, koska Suomessa on ollut edelleenkin käytössä A500HW terästä, vaikka sitä ei eurokoodiin liittyvistä tuotestandardeista löydy. Suomessa yleisesti käytössä olevia teräsverkkoja ovat B500K, B700K ja B600KX. Merkinnällä B tarkoitetaan kylmämuokattua terästä ja merkinnällä K kylmämuokattua harjakuvioista terästä. (Kiviniemi 2019, 15)

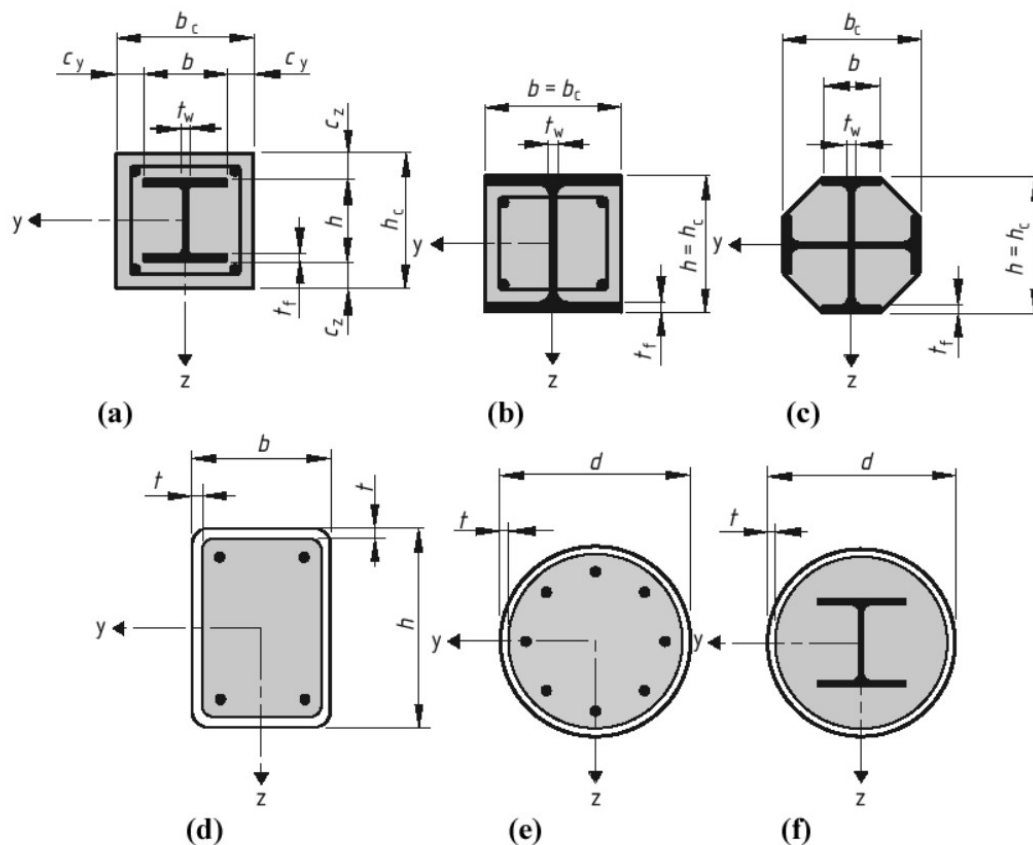
2.2 Tyypillinen liittopilari Suomessa

Kaksoissymmetristen pilaripoikkileikkausten ollessa kaikkein tavallisimpia, ei EN 1994-1-1 aseta yleisten tapausten tarkastelussa rajoituksia poikkileikkausten muodolle tai symmetrisyydelle. Yksinkertaistetun menetelmän käyttö rajoittaa kuitenkin poikkileikkauksen kaksoissymmetrisiin, joissa on yhtenäinen teräsosa. Yhtenäisyydellä tarkoitetaan, että teräsosat voidaan liittää suoraan toisiinsa ja silloin ne ovat joko valssattuja tai hitsattuja profiileja. (TRY/by58 2012, 185)

Tyypillisin liittopilari on betonitäytteinen rakenneputki, joka määritellään palonkesto-
luokkiin R30, R60, R90 tai R120 ja siinä käytettävä teräsosan materiaalilujuus on use-
asti luokkaa S355. (Heiskanen 2008, 9) Betonitäytteisiin putkiliittopilareihin asenne-
taan poikkeuksetta betoniraudoitus, joka varustellaan standardin EN 1994-1-2 luvun 5
yksityiskohtien suunnittelun säännöt täyttävillä haoilla ja lisäraudoilla. Palonkestävyy-
den varmistamiseksi betoniraudoitus on ehdoton, sillä raudoittamaton betoni on heik-
koa ja palonkestävyyssominaisuudet putoavat alhaisiksi. Raudoittamattomia putkiliit-
topilareita voidaan käyttää ainoastaan toissijaisissa kohteissa, joissa hoikkuus ja epä-
keskisyys jäävät hyvin pieniksi. (TRY/by58 2012, 185)

Liittopilariputki raudoitetaan valmiiksi ja asennetaan varusteltuna. Tankoraudoituksen
eli päätankojen lisäksi putki varustellaan haoilla ihan vastaavasti kuin normaali beto-
nipilarikin. Lisäksi putki varustellaan erillisillä asemointitangoilla, jotta saadaan ase-
tetut betonipeitepaksuudet sekä yleisesti raudoituskokoonpano pysymään paikallaan
valun aikana. Asennuksen jälkeen valu tapahtuu pumppaamalla betonia pilarin ala-
päästä tai yläpäästä sille varatusta reiästä. Valaminen onnistuu nykyisillä pumppaus-
tekniikoilla usean kerroksen korkuisiin pilareihin kerrallaan. Ongelmaksi nousee usein
korkeita pilareita valaessa teräsputkeen kohdistuva valupaine, joka nesteytettyjä beto-
neja käytettäessä voi nousta erittäin korkeaksi. Liittopilareita mitoittaessa suunnitteli-
jan tulee myös huomioida valupaineen aiheuttamat rajoitukset. (TRY/by58 2012, 185)

Alla kuvassa 2 esitetään tyypillisimmät liittopilaripoikkileikkaukset, joista Suomessa
yleisimmin käytössä ovat vain (d)- ja (e)-kuvien mukaiset tyypit. Standardissa EN
1994-1-1 taulukon 6.5 perusteella on määritetty nurjahduskäyrät ja epätarkkuudet ku-
vassa 2 esitetyille tyypeille.



Kuva 2. Tyypillisiä liittopilaripoikkileikkauksia merkintöineen (SFS-EN 1994-1-1, 3)

2.3 Palotilanne

Kerrosten pilareissa palon alkuvaiheessa kehittyvät pieniä aksiaalivoimia estääkseen lämpölaajenemisen. Palon aikaisten lämpötilojen kehittyessä nämä vaikutukset häviävät, eikä niitä tarvitse erikseen huomioida. Momenttijakaumista aiheutuvia muutoksia voidaan tarkastella ns. suljetuin lausekkein ja niissä otetaan huomioon jatkuvien pilarien eri osissa tapahtuvien taivutusjäykkyyksien erilaisuus. Kuumentuneen sekä normaalilämpötilassa olevan pilarin taivutusjäykkyyksiä tarkastellaan suhteen $\frac{(EI)_{eff.fi}}{(EI)}$ avulla. (TRY/by58 2012, 300)

Palon alussa teräsputkiprofiili lämpölaajenee enemmän kuin betoni putken sisällä, mikä voi johtaa pilarin kuorman siirtymisen kokonaan teräsputkiprofiilille ja betoni muuttuu kuormattomaksi. Tämän seurauksena tartunta voi pettää ja teräsputkiprofiili

pääsee liukumaan betonin pintaa pitkin. Teräsprofiilin lämpötila nousee erittäin nopeasti, koska teräksellä on suuri lämmönjohtavuus ja teräsprofiili sijaitsee uloimpana. Palolle altistuksen aikana teräsputki laajenee nopeasti, ja samalla sen sisäpinnalle teräksen ja betonin liittymäkohtaan muodostuu ilmarako, jota pitkin siellä sisällä oleva kosteus muuttuu vesihöyryksi ja pääsee kulkeutumaan ilmarakoa pitkin. Tämä on toisaalta hyvä asia, koska kyseinen kerros toimii eristävänä osana. Teräspoikkileikkaus säilyy kokonaan kuormitettuna ja lämpötilan noustessa teräsprofiili menettää myötölujuuttaan ja kimmokerroin pienenee, kunnes kriittinen lämpötila saavutetaan ja lopulta profiili myöntää jo jopa omasta painostaan. Kriittinen lämpötila vastaa tilannetta, jossa kuormasta aiheutuva suurin teräsjännitys $\sigma_{a,\theta} = \frac{N_{Ed,fi}}{A_a}$ on myötörajan $f_{y,\theta}$ suuruinen. Betonisisus kuormittuu nopeasti kantaen suurimman osan kuormasta, teräksen menettäessä lujuuttaan. Kuormituksen siirtyminen betonille tapahtuu yleensä jo noin 20-30 minuutin kuluttua palon alkuhetkestä. Pilarin oletetaan murtuneen samanaikaisesti kuin betonipoikkileikkauksessa tapahtuu murtuminen. Raudoituksella on oleellinen merkitys, koska kokonaan raudoittamaton betoni murtuu paljon aikaisemmassa vaiheessa kuin raudoitettu betoni, johon kuuluu päätangot sekä välihaat. (TRY/by58 2012, 311)

Betonipoikkileikkauksessa vaikuttavien suurten lämpötilaerojen vaikutuksesta aiheutuu betoniin ja raudoitukseen pakkojännitystilaa, jossa betonin uloimmat eli lämpötilaltaan kriittisimmät osat ovat puristettuja ja sisällä lämpötilan ollessa alhaisin osat ovat vedettyjä. Betonin sisimmäiset osat pysyvät vedettyinä siihen saakka, kunnes koko pilarin kuorma $N_{Ed,fi}$ siirtyy teräspoikkileikkaukselta betoniosalle. Kuorman siirtyessä betonille, poikkileikkauksessa vaikuttavat vetojännitykset muuttuvat puristukseksi ja sen seurauksena puristus betonipoikkileikkauksen uloimmissa osissa kasvaa, kunnes betoni saavuttaa suljetun lujuuden $f_{cc,\theta} = f_{c,\theta} \left(1 + \frac{k_{lat}\sigma_2}{f_{c,\theta}}\right)$. Standardissa EN 1991-1-2 lausekkeen (3.24) tarkastelun mukaan voidaan olettaa pyöreissä pilareissa, että $k_{lat} \leq \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \leq 0,05$ ja tähän perustuen $f_{cc,\theta} \leq 1,25f_{c,\theta}$. Kyseinen sulkemisvaikutus edesauttaa hyvin betonin sitkeyttä. (Peikko 2017, 393)

Betonisisuksen kuumentuessa, betoniin sitoutunut sekä hydratoitunut vesi alkaa höyrystyä. Höyrystyessään vesi sitoo itseensä suuren määrän lämpöenergiaa. Betonitäy-teisiin teräsputkiin on järjestettävä palotilanteen varalta reiät, joista betonin kuume-tessa kyseinen vesihöyry pääsee poistumaan sekä estää paineen aiheuttaman putken muodonmuutoksen. Reikiä pitää olla joka kerroksessa yhdessä pilarissa vähintään kaksi ja halkaisijan tulee olla minimissään 20mm. Reikien väli saa olla enintään 5m, mutta ne on sijoitettava aina lähelle pilarin päitä ja vastakkaisille puolille kuitenkin niin, että myöhemmin pilariin liitettävät rakenteet eivät tuki reikiä. (Teräsrakenneyh-distys 2004, 47)

Teräsprofiili suojaa betonia suoralta liekkikontaktilta, jolloin betonin lämpeneminen tapahtuu melko tasaisesti ja tämän ansiosta se estää voimakkaan paikallisen halkeilun ja lohkeilun. (Heiskanen 2008, 11)

3 PALOMITOITUSMENETELMÄT

Palomitoitus on erittäin tärkeä mitoitustarkastelu liittopilareiden suunnittelussa ja tä-män vuoksi palonkestävyysominaisuuksia on tutkittu jo paljon ympäri maailmaa. Pa-lonkestävyyttä on simuloitu polttokokeiden avulla, joissa liittopilarin kuormituksena toimii vakiokuorma niin kauan, kunnes pilari menettää stabiilisuutensa. Niiden perus-teella on kehitelty erilaisia laskentamalleja palomitoitustarkastelua varten. Laskenta-malleihin sisältyy monia parametrejä, jotka ovat syntyneet puolikokeellisesti ja tämän vuoksi erilaiset versiot poikkeavat hieman toisistaan. (Teräsrakenneyhdistys 2004, 7)

Liittopilareiden palomitoitus voidaan suorittaa kolmea eri periaatetta noudattaen EN 1994-1-2 mukaisesti. Käyttämällä taulukkomitoitusta kohtien 4.2.3.1–4.2.3.4 puit-teissa. Taulukkomitoitus koskee ainoastaan sivusuunnassa tuettujen kehien pilareita ja ohjeissa on paljon rajoituksia ja erityyssääntöjä, jotka rajoittavat käytettävyyttä. Tau-lukkomitoitus soveltuu parhaiten pienten poikkileikkausten ja paloluokkien tarkista-miseen. Esimerkiksi pienempien kohteiden luonnossuunnitteluvaiheessa tarvittavien alustavien pilarikokojen määrittämiseen. Palomitoitus voidaan suorittaa käyttämällä

yksinkertaisia menetelmiä standardin kohdan 4.3.5 mukaisesti, jolla pystytään varmistamaan betonilla täytettyjen putkiliittopilarien palonkestävyys. Yhtenä mahdollisuutena on käyttää kehittyneitä mitoitusmalleja, jonka menetelmiä käsitellään standardin kohdassa 4.4 ja sen alakohdissa 4.4.1 olevia periaatesääntöjä noudattaen. Kehittyneissä mitoitusmalleissa ei ole poikkileikkauksen muodolle asetettu vaatimuksia ja niissä voi olla oma mallinsa poikkileikkauksen kuumentumiselle tai mekaaniselle käyttäytymiselle. EN 1994-1-2 kohdassa 4.1(1)P tarkastellaan rakenteen käyttäytymistä palossa huomioiden luvun 5 asettamat vaatimukset, koskien eri rakennetyyppejä ja palomitoitus voi näin ollen perustua yllä mainittuihin palomitoitusmenetelmiin. (TRY/by58 2012, 295–296)

Liittopilarin palomitoitus voidaan jakaa pääosin menetelmästä riippumatta kahteen osaan: lämpötilan laskentaan, joka vaikuttaa pilarin poikkileikkauksessa sekä osapoikkileikkauksen lujuuden laskentaan vallitsevan lämpötilan perusteella. (Juvonen 2013, 103) Liittopilarin mitoituksessa tärkeimpiä vaatimuksia palonkestoon on kantavuus R eikä yleensä muita vaatimuksia anneta. Betonitäytteisten putkiliittopilarien yleisiä palonkestovaatimuksia ovat: R30, R60, R90 ja R120. On kehitetty myös menetelmiä, joiden ansiosta putkiliittopilarien palonkestävyys voi olla jopa R180. Kirjain R tarkoittaa kantavuutta ja numero perässä viittaa palonkesto-aikaan minuutteina. (Kielenneva 2017, 35)

3.1 Taulukkomitoitus

Taulukkomitoituksen ohjeissa on paljon erityissääntöjä, jotka rajaavat ja vähentävät niiden käytettävyyttä. Standardin EN 1994-1-2 palomitoitustaulukoiden avulla mitoittaminen perustuu jo valmiiksi ratkaistuihin perustapauksiin, jotka ovat määritelty tiettyjen reunaehtoien suhteen eri paloluokissa. (Juvonen 2013, 103) Näitä reunaehtoja ovat esimerkiksi pilarin geometria ja dimensiot, materiaaliominaisuudet, rakennemalli sekä paloaltistus. Taulukkomitoituksen soveltaminen rajoitetaan vain sivusuunnassa tuettujen kehien pilareille sekä yksittäisiin kantaviin rakenneseisiin, jotka katsotaan altistuvan suoraan tulipalolle koko matkalta. Tästä aiheutuva lämpörasitus oletetaan standardipaloaltistuksen mukaiseksi ja oletetaan lämpöjakauman vaikuttavan kanta-

vissa rakenneosissa näiden koko pituudelta. Oletusten ulottumista ei sallita koetulosaineiston ulkopuolelle. Taulukkomitoituksen sekä myös yksinkertaisen laskentamenetelmän edellytetään antamaan varmallalla puolella olevia tuloksia, jos näitä vertailee toisiin vastaaviin menettelyihin tai esimerkiksi kehittyneisiin laskentamalleihin. Silloin kuin taulukkomitoitusta ei ole käytettävissä, joudutaan siirtymään yksinkertaisiin tai kehittyneisiin laskentamalleihin tai joudutaan käyttämään koetuloksiin perustuvaa menetelmää. (SFS-EN 1994-1-2, 41)

Alempana esitetyt mitoitustaulukot koskevat pääsääntöisesti vain jäykistettyjen kehien liittopilareita palon rajoituessa vain yhteen kerrokseen, jotka ovat valmiiksi ratkaisuja perustapauksia. Ne riippuvat kuormatasosta $\eta_{fi,t}$, joka on EN 1994-1-2 kohdan 4.1 lauseiden (7)P, (9)P ja (10) mukainen. Kuormitustasot määritetään kuormien vaikutuksen- ja kestävyuden mitoitusarvon suhteen avulla. (Teräsrakenneyhdistys 2004, 21)

$$\eta = \frac{E_d}{R_d} \leq 1,0 \text{ on kuormitustaso viitaten standardiin EN 1994-1-1.} \quad (1)$$

missä E_d on voimasuureen- ja R_d kestävyuden mitoitusarvo normaalilämpötilamitoituksessa. (SFS-EN 1994-1-2, 38) Palomitoituksen kuormatasot $\eta_{fi,t}$ perustuvat siihen, että normaalilämpötilan kestävyys R_d lasketaan oletuksena, että pilarin päät ovat yksinkertaisesti tuetut sekä kuorman epäkeskisyys otetaan huomioon. Palotilanteessa oletetaan, että pilari on molemmista päistä kiinnitetty ja siihen vaikuttaa ainoastaan aksiaalikuormitus (TRY/by58 2012, 295)

Kun lasketaan poikkileikkauksen kestävyyyksiä R_d ja $R_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} * R_d$ taulukon 1 mukaan, tulee täyttyä seuraavat ehdot:

- Putken myötörajana käytetään arvoa 235 N/mm^2 riippumatta teräslajista.
- Putken seinämän paksuus e on enintään $1/25 b$ tai d
- Huomioitava raudoitussuhde $\frac{A_s}{A_c + A_s}$ on vähintään 1% tai enintään 6%
- Betonin lujuutena käytetään normaalilämpötilamitoituksessa käytettävää arvoa. (Teräsrakenneyhdistys 2004, 22)

Taulukon 1 mitoittamisen yhteydessä kestävyyttä R_d laskettaessa nurjahduspituutena käytetään palomitoitustilanteessa vastaavana pituutena kaksinkertaistettua arvoa. Kyseinen taulukko on voimassa ainoastaan pilariin vaikuttavan kuorman ollessa keskeinen tai epäkeskeinen, mutta mitoitusta rajoitetaan pilarin pituuteen, joka voi olla enintään 30 kertaa kyseisen poikkileikkauksen pienin ulkomitta. (SFS-EN 1994-1-2, 38)

Betonilla täytettyjen putkiliittopilarien mitoituksessa käytettävät raudoitussuhteen $\frac{A_s}{A_c+A_s}$ vähimmäisarvot ovat huomattavan suuria, verrattavissa normaalilämpötilamitoituksen raudoitussuhteen ylärajaan. Riippumatta raudoitussuhteen todellisesta suuruudesta laskennassa huomioidaan ainoastaan yläraja 3%. (TRY/by58 2012, 295)

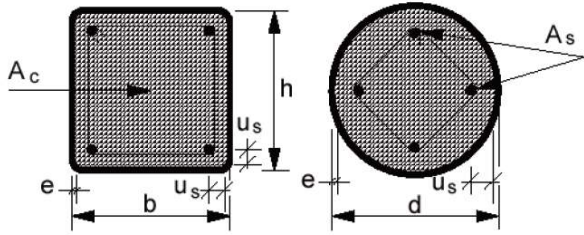
$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d,t}}{R_d} \text{ on palomitoituksen kuormitustaso.} \quad (2)$$

missä $E_{fi,d,t}$ on palotilanteen voimasuureen mitoitusarvo ajanhetkellä t .

Tämä voidaan kuitenkin olettaa ajasta riippumattomaksi, joten voidaan käyttää EN 1994-1-2 kohdan 2.4.2 lauseen (2) mukaisesti arvoja, joiden suuruus on $E_{fi,d,t} = E_{fi,d}$. Taulukkomitoitusta käytettäessä tulee osoittaa, että $E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$. Alla esitetyn taulukon 1 arvoja voidaan interpoloida lineaarisesti.

Betonitäytteisten putkiliittopilarien paloluokkien määrittäminen onnistuu taulukon 1 mukaisesti. Määrittäminen tapahtuu kuormitustason $\eta_{fi,t}$, poikkileikkausmitan b , h tai d , raudoitussuhteen $\frac{A_s}{A_c+A_s}$ sekä pilarin pinnasta mitattujen raudoitustankojen pienimmän keskiöetäisyyden u_s perusteella. (Teräsrakenneyhdistys 2004, 22)

Taulukko 1. Pienimmät poikkileikkausmitat ja raudoitussuhteet sekä raudoitustankojen minimi betonipeitepaksuus. (SFS-EN 1994-1-2, 44)

		Standardipalonkestävyys				
		R30	R60	R90	R120	R180
teräsprofiili: $(b/e) \geq 25$ tai $(d/e) \geq 25$						
1	Kuormitustasoa $\eta_{fi,t} \leq 0,28$ vastaavat pienimmät poikkileikkaus mitat					
1.1	Pienimmät sivumitat h ja b tai pienin halkaisija d [mm]	160	200	220	260	400
1.2	Pienin raudoitussuhde $A_s / (A_c + A_s)$ prosentteina	0	1,5	3,0	6,0	6,0
1.3	Betoniterästankojen pienin keskiöetäisyys u_s [mm]	–	30	40	50	60
2	Kuormitustasoa $\eta_{fi,t} \leq 0,47$ vastaavat pienimmät poikkileikkaus mitat					
2.1	Pienimmät sivumitat h ja b tai pienin halkaisija d [mm]	260	260	400	450	500
2.2	Pienin raudoitussuhde $A_s / (A_c + A_s)$ prosentteina	0	3,0	6,0	6,0	6,0
2.3	Betoniterästankojen pienin keskiöetäisyys u_s [mm]	–	30	40	50	60
3	Kuormitustasoa $\eta_{fi,t} \leq 0,66$ vastaavat pienimmät poikkileikkaus mitat					
3.1	Pienimmät sivumitat h ja b tai pienin halkaisija d [mm]	260	450	550	–	–
3.2	Pienin raudoitussuhde $A_s / (A_c + A_s)$ prosentteina	3,0	6,0	6,0	–	–
3.3	Betoniterästankojen pienin keskiöetäisyys u_s [mm]	25	30	40	–	–

Taulukon arvot riippuvat kuormitustasosta, joka voidaan laskea edellä mainitulla lausekkeella (2) ja siihen perustuvien pienimpien poikkileikkausmittojen, raudoitussuhteiden sekä raudoitustankojen keskipisteiden etäisyydet teräsputken sisäpintaan teräsluottopilarissa. Kyseinen taulukko mitoitusmenettelyineen antaa erittäin varmallalla puolella olevia tuloksia. Ongelmaksi sen käytössä voi nousta raudoituksen mahdollistaminen vähimmäispoikkileikkaukseen. Taulukon käyttö voi muodostua kannattamattomaksi sen epätaloudellisen mitoittamisen takia, jos mitoitettavia pilareita on monta. (Juvonen 2013, 105)

3.2 Yksinkertainen menetelmä

Yksinkertaisia laskentamenetelmiä tulee käyttää vain mitoittaessa sivusuunnassa tuettujen kehien pilareita standardin EN 1994-1-2 kohdan 4.3.5.1(1)P mukaan, mutta huomioiden standardin EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.1(1), joka rajoittaa kaikissa tapauksissa suhteellisen hoikkuuden $\bar{\lambda}$ palomitoituksessa enimmäisarvoon 2. Yksinkertainen laskentamenetelmä rajoittuu liittopilarien osalta vain betonitäyhteisille teräsputkiprofiileille ja menetelmä koskee joka puolelta samalla tavalla standardipalolle altistettuja

pilareita. (SFS-EN 1994-1-2, 54) Yksinkertaisten menetelmien mukaan palonkestävyyden pitää olla aina varmallalla puolella todelliseen palotilanteeseen verrattuna. Käsitteenä palonkestävyys ei ole itsestäänselvyys ja sillä voidaan tarkoittaa aikaa, minkä pilari kestää sille altistetussa standardipalossa murtumatta, mutta sillä voidaan tarkoittaa myös puristuskestävyyttä $N_{Rd.fi}$ kun standardipalo on kestänyt tietyn ajan. Palonkestoajasta riippumatta mitoitus ehdon $N_{Ed.fi} \leq N_{Rd.fi}$ pitää täytyä. (TRY/by58 2012, 297)

Tämän menetelmän hyvänä puolena on laskennan yksinkertaisuus, koska kaikkien eri rakenneosien kohdalla on pyritty laskennassa hyödyntämään mahdollisimman paljon normaalilämpötilan tuloksia. (Juvonen 2013, 106) Yksinkertaisissa laskentamalleissa palotilannetta vastaava liittopilarin puristuskestävyys arvioidaan nurjahduskestävyytenä ja lasketaan kaavasta:

$$N_{Rd.fi} = \chi N_{pl.Rd.fi} \quad (3)$$

missä χ on standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.3.1 pilarin palonaikaisesta muunnetusta hoikkuudesta $\bar{\lambda}_\theta$ riippuva pienennyskerroin, joka saadaan laskemalla aina eurooppalaisen nurjahduskäyrän c mukaisesti.

Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_\theta$ palon aikana on rajoitettu arvoon 2. $N_{pl.Rd.fi}$ on poikkileikkauksen aksiaalisen puristuskestävyyden mitoitusarvo plastisuusteorian mukaan palotilanteessa. Liittopilarin poikkileikkaus on mahdollista jakaa osiin, jotka ovat teräsosa ”a”, raudoitustangot ”s” ja betoniosa ”c”. Pilaripoikkileikkauksen puristuskestävyyttä laskettaessa kaavalla (4) materiaalit on jaettu osiin, josta tulee kyseiset lyhenteet ilmi. Plastisuusteorian mukaan liittopilaripoikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo voidaan palotilanteessa laskea kaavasta:

$$N_{pl.Rd.fi} = \sum_j \left(\frac{A_{a,\theta} F_{ay,\theta}}{\gamma_{M.fi.a}} \right) + \sum_k \left(\frac{A_{s,\theta} F_{sy,\theta}}{\gamma_{M.fi.s}} \right) + \sum_m \left(\frac{A_{c,\theta} F_{cy,\theta}}{\gamma_{M.fi.c}} \right) \quad (4)$$

missä $A_{i,\theta}$ ovat eri lämpötiloissa θ olevien materiaalien pinta-alat.

Pilaripoikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys palolle altistettuna lasketaan standardin EN 1994-1-2 kohdan 4.3.5.1 mukaan kaavasta (4.14):

$$(EI)_{eff.fi} = \sum_j(\varphi_{a,\theta} E_{a,\theta} I_{a,\theta}) + \sum_k(\varphi_{s,\theta} E_{s,\theta} I_{s,\theta}) + \sum_m(\varphi_{c,\theta} E_{c,sec,\theta} I_{c,\theta}) \quad (5)$$

missä $I_{i,\theta}$ on poikkileikkauksen tehollisen osan i jäyhyysmomentti taivutuksessa tarkasteltavan akselin suhteen. $\varphi_{i,\theta}$ ovat pienennyskertoimia, jotka voidaan kalibroida polttokokeissa saatujen nurjahduskestävyyksien avulla ja joihin vaikuttaa poikkileikkauksen termiset jännitykset, materiaaliosien lämpötilat, käytetty menetelmä sekä nurjahduskäyrä. Tämän enempää standardissa EN 1994-1-2 sekä siihen liittyvässä kansallisessa liitteessä ei anneta tietoa pienennyskertoimista.

Pienennyskertoimilla otetaan huomioon lämpötilan suuri vaihtelu poikkileikkauksen sisällä. Pienennyskertoimen suurin tarkoitus on betonipoikkileikkauksen jäykkyyden määrittämisessä, kun palotilanteessa betonin lämpötilan on huomattavasti suurempi sen reunalla kuin keskiosassa. Pienennyskertoimet $\varphi_{i,\theta}$ viittaavat yksinkertaisessa menetelmässä materiaalin osan i kokonaisjäykkyyden pienentämiseen. (Innos 2019, 10)

Käytännössä putkipilareiden mitoittaminen EN 1994-1-2 mukaisilla säännöillä ja kohdan 4.3.5.1 periaatteita noudattaen ei kuitenkaan onnistu, koska oleelliset tiedot taivutusjäykkyyden $(EI)_{eff.fi}$ laskemiseksi puuttuvat ohjeistuksesta kokonaan. EN 1994-1-2 varsinaisen standardin liitteessä H on esitetty menetelmä, joka tarkemmin tarkasteltuna on aivan erilainen kuin kohdan 4.3.5.1 perusteella voisi kuvitella ja lisäksi sitä on hankala käyttää. Liitettä H ei käytetä Suomessa, joten kirjassa TRY/by58 on esitetty menetelmä, joka vastaa kohdan 4.3.5.1 ohjeita sekä toimii NCCI-materiaalina. Putki-liittopilarissa taivutusjäykkyys muodostuu pääasiassa raudoituksen ja betonin osuksista, joiden perusteella oletuksena voidaan pitää kertoimien φ_c ja φ_s arvoja riippumattomina käytetystä menetelmästä huolimatta. (TRY/by58 2012, 312) Tämän mukaiset kertoimien arvot esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Jäykkyyden sovituskerroimet (Peikko 2017, 394)

Palonkestoluokka std. palo	PYÖREÄT PILARIT					NELIÖPILARIT	
	Halkaisija D ja sitä vastaava sovituskerroin $\varphi_{a,\theta}$					Sivumitta b ja $\varphi_{a,\theta}$	
	200	220	250	273	> 323	< 150	> 180
R30	0,60	0,70	0,70	0,70	0,70	0,45	0,60
R60	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70	0,45	0,60
R90	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	-	0,45
R120	0,30	0,30	0,30	0,35	0,40	-	0,35
Raudoituksen keskiöetäisyys ja sitä vastaava sovituskerroin							
u_s [mm]	30	40	50	≥ 60			
$\varphi_{s,\theta}$	0,8	0,9	1,0	1,0			

Kertoimen $\varphi_c = 1,2$ valinta putkiliittopilareille juontaa juurensa teräsputken aiheuttamasta sulkemisvaikutuksesta ja tällä on positiivinen vaikutus kestävyyttä parantavana tekijänä. Niin kuin edellä mainittiin, taivutusjäykkyys koostuu pääasiassa betonin ja raudoituksen osuuksista. Betonin jäykkyys $E_{c,sec,\theta}$ on lämpötilaa θ vastaava betonin sekanttikimmokerroin, joka lasketaan lämpötilan $\theta = \theta_{c,t} * p$ perusteella kaavasta:

$$E_{c,sec,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c,\theta}} \quad (6)$$

missä $k_{c,\theta}$ ja $\varepsilon_{cu,\theta}$ saadaan taulukosta 3.

Taulukko 3. Betonin materiaaliominaisuuksien pienennyskerroimet (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

θ_c	$k_{c,\theta}$	$k_{\varepsilon,\theta}$	$k_{su,\theta}$	$k_{Ec} = k_{c,\theta}/k_{\varepsilon,\theta}$
20	1	1	1	1
100	1	1,6	1,125	0,625
200	0,95	2,2	1,250	0,432
300	0,85	2,8	1,375	0,304
400	0,75	4	1,500	0,188
500	0,6	6	1,635	0,100
600	0,45	10	1,750	0,045
700	0,3	10	1,875	0,03
800	0,15	10	2,000	0,015
900	0,08	10	2,125	0,008
1000	0,04	10	2,250	0,004
1100	0,01	10	2,375	0,001
1200	0	-	-	0

$$k_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}; k_{\varepsilon,\theta} = \frac{\varepsilon_{c1,\theta}}{\varepsilon_{c1}}; E_{c,sec,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} = \frac{k_{c,\theta}}{k_{\varepsilon,\theta}} \frac{f_{ck}}{\varepsilon_{c1}} = k_{Ec,\theta} \frac{f_{ck}}{\varepsilon_{c1}}$$

$$\varepsilon_{c1} = 0,0025$$

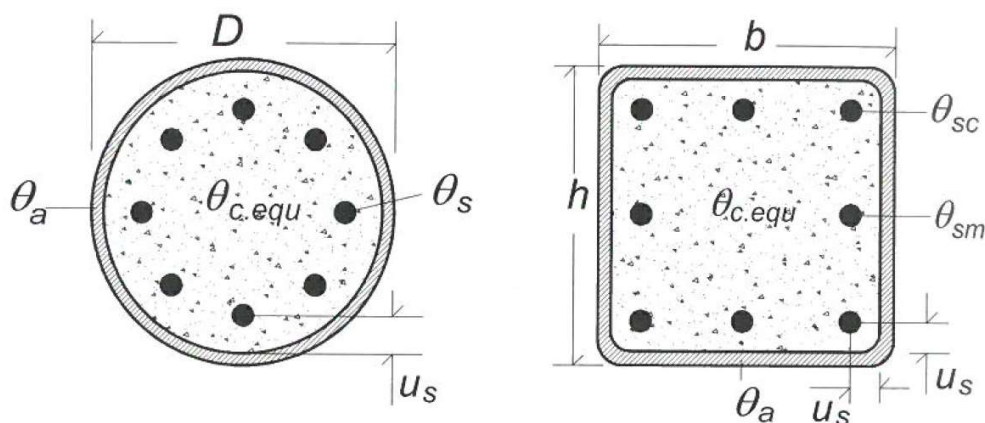
Laskennan helpottamiseksi on kehitetty kuitenkin jo valmiiksi johdettuja poikkileikkauksesta ja paloluokasta riippuvia ekvivalentteja lämpötiloja, joiden avulla saadaan poikkileikkauksen tarkka lämpötilakenttä ja sen vastaava betoniosan puristuskapasiteetti. (Juvonen 2013, 118)

Betonipoikkileikkauksen ekvivalentti lämpötila voidaan arvioida pyöreissä pilareissa putken ulkohalkaisijan D funktiona lausekkeesta (7) standardipalokäyrän mukaisille teräsprofiilien mitoituslämpötilojen palonkestoajoille: 30, 60, 90, 120.

$$\begin{cases} \theta_{c.equ.30}(D)=11000/D^{0,64} & \text{kun } 135 \leq D \leq 510 \\ \theta_{c.equ.60}(D)=16300/D^{0,66} & \text{kun } 165 \leq D \leq 510 \\ \theta_{c.equ.90}(D)=13100/D^{0,58} & \text{kun } 200 \leq D \leq 510 \\ \theta_{c.equ.120}(D)=1180-2,96D+0,0028D^2 & \text{kun } 220 \leq D \leq 510 \end{cases} \quad (7)$$

Neliöpoikkileikkauksissa voidaan arvioida sivumitan b funktiona ekvivalentti lämpötila lausekkeesta:

$$\begin{cases} \theta_{c.equ.30}(b)=779-2,6754b+0,0032b^2 & \text{kun } 120 \leq b \leq 400 \\ \theta_{c.equ.60}(b)=21572/b^{0,69} & \text{kun } 150 \leq b \leq 400 \\ \theta_{c.equ.90}(b)=1366-4,513b+0,0054b^2 & \text{kun } 200 \leq b \leq 400 \\ \theta_{c.equ.120}(b)=1496-4,643b+0,0053b^2 & \text{kun } 250 \leq b \leq 400 \end{cases} \quad (8)$$



Kuva 3. Palomitoituksessa tarvittavat mitoituslämpötilat θ_a , $\theta_{c.equ}$ ja θ_s (TRY/by58 2012, 308)

Betonissa olevan raudoituksen lämpötilat riippuvat betonipeitepaksuudesta. Palotilanteessa kuumenevat uloimmat osat betonista ja siellä vallitseva kosteus liikkuu kohti betonipoikkileikkauksen keskustaa, jossa lämpötila on alhaisin. (TRY/by58 2012, 308) Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty raudoituksen mitoituslämpötilat $\theta_{s,i}$ °C pyöreiden liittopilarien teräsputken sisäpinnan ja raudoituksen keskiön välisen etäisyyden u_s funktiona standardipalolle:

Taulukko 4. Raudoituksen lämpötilat θ_s °C pyöreissä liittopilareissa R30 ja R60 standardipalojen tapauksissa (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

	R30 standardipalo					R60 standardipalo				
	Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]					Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]				
u_s [mm]	140	200	250	350	500	140	200	250	350	500
20	370	335	320	310	310	645	570	540	520	520
30	307	260	245	232	232	592	487	455	427	427
40	245	185	170	155	155	540	405	370	335	335
50	217	142	132	120	120	515	357	312	277	270
60	190	100	95	85	85	490	310	255	220	205
80	-	80	65	55	55	-	265	185	140	130
110	-	-	35	35	35	-	-	120	85	75

Taulukko 5. Raudoituksen lämpötilat θ_s °C pyöreissä liittopilareissa R90 ja R120 standardipalojen tapauksissa (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

	R90 standardipalo					R120 standardipalo				
	Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]					Teräsprofiilin halkaisija, D [mm]				
u_s [mm]	140	200	250	350	500	140	200	250	350	500
20	815	715	680	650	635	920	820	780	745	715
30	772	645	597	560	537	890	760	705	655	622
40	730	575	515	470	440	860	700	630	565	530
50	710	537	457	407	372	845	660	580	497	462
60	690	500	400	345	305	830	620	530	430	395
80	-	100	330	250	210	-	575	460	335	295
110	-	-	250	150	115	-	-	385	235	190

Neliöputkipilareiden tangoissa vallitseva lämpötila θ_{sm} on alhaisempi niiden sijaitessa poikkileikkauksen sivujen keskellä verrattaessa nurkissa sijaitseviin tankojen lämpötiloihin θ_{sc} . Tähän yksiselitteisenä vastauksena on, että nurkkatankoihin kohdistuu lämpövuoto molemmista sivuista. Taulukoissa määritetyistä putkiprofiileista pienimmät ovat sivumitoiltaan 140mm. Näin pieneen profiiliin ongelmaksi nousee tankojen sijoittelu sen geometrian ja käytännön kannalta, mutta ratkaisuna tähän voidaan

nurkkatankojen koko määrittää heti alussa riittävän suureksi ja silloin keskellä olevia tankoja ei tarvita, mikä helpottaa huomattavasti niiden mahduttamisessa ja hakojen järjestäminen on yksinkertaista. (TRY/by58 2012, 309) Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty raudoituksen mitoituslämpötilat θ_{sc} °C neliöliittopilarien teräsputken sisäpinnan ja raudoituksen keskiön välisen etäisyyden u_s funktiona standardipalolle nurkkatangoissa.

Taulukko 6. Raudoituksen lämpötilat θ_s °C pyöreissä liittopilareissa R30 ja R60 standardipalojen tapauksissa (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

u_s [mm]	R30 standardipalo					R60 standardipalo				
	Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]					Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]				
	140	180	220	300	500	140	180	220	300	500
20	395	390	385	385	385	660	640	630	625	625
30	302	290	287	287	287	575	537	522	517	517
40	210	190	190	190	190	490	435	415	410	410
50	167	142	142	142	142	465	372	345	332	332
60	125	95	95	95	95	440	310	275	255	255
80	-	75	65	55	55	-	270	180	150	150
110	-	-	30	30	30	-	-	100	75	75

Taulukko 7. Raudoituksen lämpötilat θ_s °C pyöreissä liittopilareissa R90 ja R120 standardipalojen tapauksissa (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

u_s [mm]	R90 standardipalo					R120 standardipalo				
	Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]					Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]				
	140	180	220	300	500	140	180	220	300	500
20	820	780	765	765	765	915	875	855	855	855
30	755	690	667	662	662	872	802	767	760	760
40	690	600	570	560	560	830	730	680	665	665
50	672	547	497	472	472	810	685	610	577	577
60	655	495	425	385	385	790	640	540	490	490
80	-	445	335	270	270	-	575	475	365	365
110	-	-	230	155	145	-	-	415	250	215

Sekä taulukoissa 8 ja 9 raudoituksen mitoituslämpötilat θ_{sm} °C neliöliittopilarien teräsputken sisäpinnan ja raudoituksen keskiön välisen etäisyyden u_s funktiona standardipalolle sivujen keskellä olevissa tangoissa. Ne ovat niin sanotusti yhdestä suunnasta palolle altistettuna ja silloin niiden tankojen lämpötila on hieman pienempi kuin poikileikkauksen nurkkatangoissa.

Taulukko 8. Raudoituksen lämpötilat θ_{sm} °C neliöliittopilareiden nurkkatangoissa R30 ja R60 standardipalojen tapauksissa (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

	R30 standardipalo					R60 standardipalo				
	Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]					Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]				
u_s [mm]	140	180	220	300	500	140	180	220	300	500
20	285	250	240	235	235	560	480	445	415	410
30	230	192	180	175	175	517	412	355	337	332
40	175	135	120	115	115	475	345	265	260	255
50	155	115	97	92	90	410	320	240	210	207
60	135	95	75	70	65	450	295	215	160	160
80	-	65	50	40	40	-	215	165	105	100
110	-	-	30	30	30	-	-	130	80	60

Taulukko 9. Raudoituksen lämpötilat θ_{sm} °C neliöliittopilareiden nurkkatangoissa R90 ja R120 standardipalojen tapauksissa (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

	R90 standardipalo					R120 standardipalo				
	Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]					Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]				
u_s [mm]	140	180	220	300	500	140	180	220	300	500
20	740	650	495	535	535	870	770	715	625	615
30	710	592	475	455	450	842	722	650	550	532
40	680	535	455	375	365	815	675	585	475	450
50	667	507	412	322	305	802	647	545	420	390
60	655	480	370	270	245	790	620	505	365	330
80	-	450	330	195	170	-	600	465	300	250
110	-	-	245	135	100	-	-	395	240	160

Neliöpoikkileikkauksille määritetään raudoitustankojen lämpötilat erikseen myös poikkileikkauksen nurkkatangoille, jotka ovat kahdelta sivulta palolle altistettuna. Neliöpoikkileikkauksen nurkkatangoille määritetyt lämpötilat saadaan taulukoista 10 ja 11.

Taulukko 10. Raudoituksen lämpötilat θ_{sc} °C neliöliittopilareiden nurkkatangoissa R30 ja R60 standardipalojen tapauksissa. (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

	R30 standardipalo					R60 standardipalo				
	Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]					Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]				
u_s [mm]	140	180	220	300	500	140	180	220	300	500
20	395	390	385	385	385	660	640	630	625	625
30	302	290	287	287	287	575	537	522	517	517
40	210	190	190	190	190	490	435	415	410	410
50	167	142	142	142	142	465	372	345	332	332
60	125	95	95	95	95	440	310	275	255	255
80	-	75	65	55	55	-	270	180	150	150
110	-	-	30	30	30	-	-	100	75	75

Taulukko 11. Raudoituksen lämpötilat θ_{sc} °C neliöliittopilareiden nurkkatangoissa R90 ja R120 standardipalojen tapauksissa. (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

	R90 standardipalo					R120 standardipalo				
	Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]					Teräsprofiilin sivumitta, b [mm]				
u_s [mm]	140	180	220	300	500	140	180	220	300	500
20	820	780	765	765	765	915	875	855	855	855
30	755	690	667	662	662	872	802	767	760	760
40	690	600	570	560	560	830	730	680	665	665
50	672	547	497	472	472	810	685	610	577	577
60	655	495	425	385	385	790	640	540	490	490
80	-	445	335	270	270	-	575	475	365	365
110	-	-	230	155	145	-	-	415	250	215

Kun poikkileikkausta vastaava lämpötilakenttä tiedetään, yleisen mitoitus ehdon mukainen kestävyys voidaan laskea aksiaalisen kuormituksen suhteen kaavasta (9):

$$N_{fi.Rd} = \chi(\bar{\lambda}_\theta) N_{fi.pl.Rd} \quad (9)$$

missä $\chi(\bar{\lambda}_\theta) = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \leq 1,0$ on suhteellista hoikkuutta $\bar{\lambda}_\theta$ vastaava nurjahdus-

käyrän c mukainen pienennyskerroin ja tähän tarvittava apusuure $\Phi = 0,5[1 + 0,49(\bar{\lambda}_\theta - 0,2) + \bar{\lambda}_\theta^2]$.

EN 1994-1-2 kohdassa 4.3.5.1 esitetään yleisperiaate poikkileikkauksen kestävyuden $N_{pl.Rd.fi}$ ja muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}_\theta$ laskemiseksi. Näitä varten tarvitaan palonaikainen Eulerin nurjahduskuorma, joka saadaan kaavasta (10):

$$N_{cr.fi} = \frac{\pi^2(EI)_{eff.fi}}{l_{0,\theta}^2} \quad (10)$$

missä $l_{0,\theta}$ on palomitoituksessa käytettävä pilarin tehollinen nurjahduspituus.

Liittopilarin nurjahduspituus rajataan yleisesti toimitilarakentamisessa käytettävästä 3,6 metrin kerroskorkeudesta. (Heiskanen 2008, 16) Kun rakennuskehän kutakin kerrosta voidaan pitää omana palo-osastonaan, palon katsotaan vaikuttavan ainoastaan sen palo-osastoon kuuluviin pilareihin. Näin ollen pilarin molemmat päät voidaan olettaa palotilanteessa jäykäksi, jossa nurjahduspituus määräytyy kaavasta (11): (TRY/by58 2012, 297)

$$l_0 = 0,5 * l \quad (11)$$

Nurjahduspituuden määrittäminen muuttuu esimerkiksi ylimmän kerroksen pilareiden kohdalla, jossa voidaan olettaa ainoastaan alapää jäykästi tuetuksi. Tällainen tilanne saadaan kaavasta (12):

$$l_0 = 0,7 * l \quad (12)$$

Jos taas palo-osastointi on toteutettu niin, että palo pääsee leviämään kerroksesta toiseen, tällöin lähenee molempien pilarien päiden kiinnitys niveltä. Tällainen tilanne saadaan kaavasta (13):

$$l_0 = 1,0 * l = l \quad (13)$$

Eulerin mukaisen nurjahduskuorman määrittämisen jälkeen voidaan laskea dimensioton hoikkuus kaavasta (14):

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{N_{pl.Rd.fi}}{N_{cr.fi}}} \quad (14)$$

missä $N_{pl.Rd.fi}$ on lauseen (4) mukainen kestävyysarvo, kun osavarmuusluvut $\gamma_{M.fi.a}$, $\gamma_{M.fi.s}$ ja $\gamma_{M.fi.c}$ ovat 1.

Epäkeskeinen kuormitus

Palotilanteessa pilarille syntyy epäkeskeisiä kuormia, jos:

- pilari on ylimmässä kerroksessa, pilarin alapää on ainoastaan jäykästi tuettu ja silloin yläpäähän muodostuu epäkeskeinen kuormitus
- palotila on useammassa kerroksessa ja välipohjasta johtuu pilarille epäkeskeinen kuormitus
- pilariin kohdistuu päiden välille ulkoinen kuormitus (esim. tuuli) tai mahdollista momenttia

Standardin EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukana julkaistussa sovellusohjeessa NCCI on esitetty menetelmä yhdistetyn puristuksen- ja taivutuskestävyyden määrittämiseen, joka on erittäin selkeä ja suoraviivainen ohjeistus. Palonaikaisen momentin ja normaalivoiman yhteisvaikutusta huomioidaan epäkeskisyyden avulla. Taivutusmomentti muutetaan epäkeskisyydeksi, jolloin pilarin puristuskestävyyttä tarkastellaan osana liittopilarin palonkestävyyssajan nurjahduskestävyydestä $N_{Rd,fi}$ käyttäen lauseketta (15):

$$N_{Rd,fi,\delta} = XN_{Rd,fi} \quad (15)$$

missä X on palotilanteen nurjahduskestävyyden heikennyskerroin. Tätä kyseistä menetelmää käsitellään tarkemmin kohdassa 4.3.

Rakennejärjestelmässä palotilassa oleva pilari voidaan mitoittaa keskeiselle kuormalle, koska pilarin päiden momentit siirtyvät jäykkyyden menetyksen myötä normaalilämpötilassa oleville pilareille. Palo-osaston ylä- ja alapuoliset pilarit ottavat epäkeskisyydestä aiheutuvat kuormitukset. Tällaisessa tapauksessa pilaria ei saa kuormittaa vaakasuuntaisilla ulkoisilla voimilla.

3.3 Kehittyneet mitoitusmallit

Kehittyneitä mitoitusmalleja käsitellään standardin EN 1994-1-2 kohdassa 4.4 ja sen alakohdissa. Kehittyneet laskentamallit perustuvat palolle alttiiden rakenteiden toden-

mukaisille toimintaperiaatteille. Tarkemmin sanottuna ne perustuvat rakenteiden fysikaaliseen toimintaan ja näin pitäisi saada luotettava arvio kunkin rakenneosan palon-aikaisesta käyttäytymisestä. Kehittyneet laskentamallit ovat käyttöominaisuuksiltaan erittäin kattavat. (Peikko 2017, 376) Niitä voidaan käyttää yksittäisiin rakenneosiin, osarakenteisiin tai vaikka koko rakenteeseen tai siihen voi sisältyä erilliset mallit, joilla analysoidaan:

- lämpötilan kehittymistä ja jakautumista rakenneosassa (termisen vasteen malli)
- rakenteen tai siihen liittyvien osien mekaanista toimintaa (mekaanisen vasteen malli)

Termisen vasteen mallia koskevat kehittyneet mitoitusmallit tulee perustua hyväksytyihin lämmönsiirtymisen teorian oletuksiin ja periaatteisiin. Tässä tulee ottaa huomioon standardissa EN 1991-1-2 ilmoitetut lämpörasitukset sekä ottaa huomioon materiaalien termisten ominaisuuksien vaihtelu standardissa mainittujen kohtien 3.1 ja 3.3 mukaisesti. Mekaanista vastetta koskevat mallit tulee perustua rakenteiden mekaniikan pääperiaatteisiin ja niissä tulee ottaa huomioon geometrisesti epälineaariset vaikutukset, mekaanisten lämpörasitusten, kuormien ja mittaepätarkkuuksien yhteisvaikutukset sekä materiaalin lämpötilasta riippuvat mekaaniset ominaisuudet. (SFS-EN 1994-1-2, 56-57)

Kehittyneitä laskentamalleja on käytettävä etenkin silloin kun halutaan yksityiskohtaista tietoa jännitysten ja muodonmuutosten kehittymisestä tai mahdollisista lämpöjakaumista. Se soveltuu myös kaikkien aika-lämpötilakäyrien kanssa, silloin kun materiaaliominaisuudet tunnetaan käytetyllä lämpötila-alueella. (Teräsrakenneyhdistys 2004, 24)

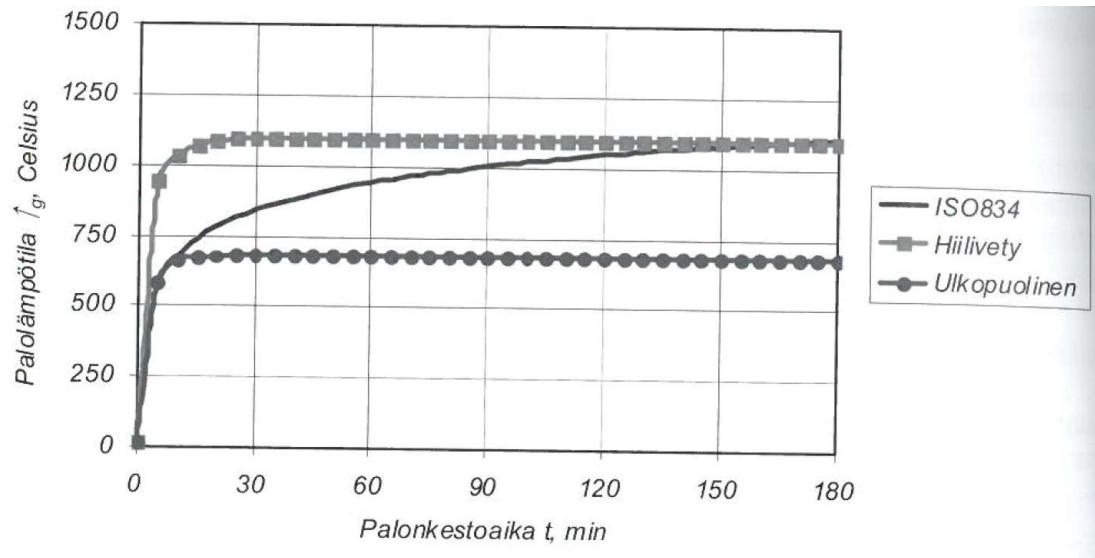
Eurokoodit eivät selitä muiden laskentatapojen tavoin yksityiskohtaisesti, miten mitoitusmenettely etenee vaan antaa peruseriaatteet menetelmän käyttöä varten. Kyseisen laskentamallin tuottamat tulokset tulee olla perusteltuja ja ne tulee osoittaa oikeiksi asianmukaisten koetulosten esimerkiksi polttokokeiden perusteella. Niistä saadaan oikeellista tietoa palonkestoajoista, muodonmuutoksista ja lämpötiloista. (Peikko 2017, 377)

4 LIITTOPILAREIDEN PALOMITOITUS

Palomitoitus on erittäin läheinen mitoitusmenettely liittorakenteiden suunnittelussa, ja se on kehittynyt teräsrakenteiden palonsuojaustarpeesta. Palomitoitustarkastelut ovat tärkeä osa liittopilarin mitoittamista, koska se nousee yleensä aina määrääväksi tekijäksi. Liittorakenteiden palomitoituksessa on paljon yhteneviä piirteitä erityisesti teräsrakenteiden palomitoituksen kanssa ja siihen tarjolla olevien standardien ja ohjeiden sisäistäminen on erittäin tärkeää. Myös betonin ominaisuudet ja käyttäytymistavat palotilanteessa tarvitsee tuntea hyvin.

Suurimmalla osalla liittorakenteista on todettu luontainen palonkestävyys ja se voi perustua betonin teräspoikkileikkausta suojaavaan vaikutukseen. Betoni sitoo itseensä palon aiheuttamaa lämpöenergiaa ja näin ollen hidastaa teräspoikkileikkauksen lämpötilan nousua. (TRY/by58 2012, 270) Liittopilareiden palomitoitus rajautuu pääosin aiemmin esitettyjen menettelyiden mukaan kahteen osa-alueeseen: Liittopilaripoikkileikkauksessa vaikuttavaan lämpötilan laskentaan sekä sen osapoikkileikkauksen kestävään lujuuteen lämpötilan perusteella.

Tavallisesti liittorakenteiden palomitoitus perustuu nimellispalooaltistukseen, mutta se voidaan myös osoittaa tapauskohtaisesti oletettuun palonkehitykseen perustuvalla suunnittelulla, jota kutsutaan parametriseksi palomalliksi. Nimellisiin palomalleihin kuuluvat standardipalomalli, ulkopuolisen palon malli ja hiilivetypalon malli. (Peikko 2017, 349)



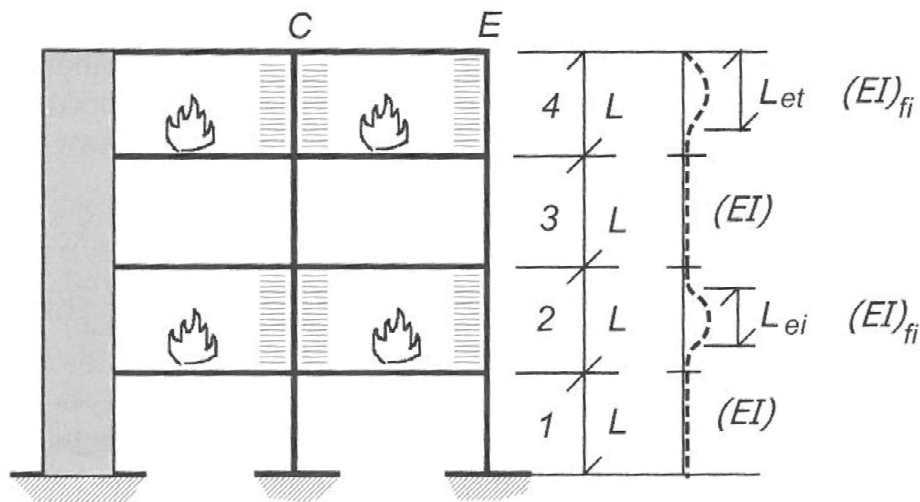
Kuva 4. Standardipalon, hiilivetypalon ja ulkopuolisen palon lämpötila-aikakäyrä. (TRY/by58 2012, 272)

Standardipalon muodostama lämpötila-aikakäyrä on kaikista edellä mainituista tavallisin ja se perustuu selluloosapaloon. Tämä palokäyrä tunnetaan suunnittelijoiden keskuudessa paremmin ISO 834 palokäyränä. Kyseisessä kuvaajassa lämpötila nousee jatkuvasti sille määritetyn palonkestävyysajan ja kun rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset standardipalolle altistettuna katsotaan sillä olevan riittävä palonkestävyys. Standardipalo ei ota huomioon palotilan mittoja eikä myöskään mahdollista palavaa materiaalia ja silloin jää huomioimatta materiaalin loppuun palaminen jossain kohtaa, jolloin lämpötilan nousu pysähtyy. Parametrisissa palomalleissa huomioidaan yleisesti palamisen tehokkuus, eli ns. palotilan hapen saanti. Samassa yhteydessä huomioidaan palokuorman suuruus ja palo-osaston ympärillä sijaitsevien seinien ominaisuudet ja silloin palo-osaston lämpötila voi nousta ainoastaan niin kauan kuin palavaa materiaalia riittää. (TRY/by58 2012, 271)

4.1 Rakenteiden palonaikainen käyttäytyminen

Palolle alttiina olevien pilareiden teholliset pituudet määritetään yleisesti EN 1994-1-1 käsiteltyjen periaatteiden mukaisesti. Tehollisten pituuksien määrittämisessä voidaan käyttää myös EN 1994-1-2 kuvan 6.4 periaatteita, jos siinä asetetut vaatimukset täyttyvät. Rakennuskehä toteutetaan yleisellä periaatteella aina niin, että jokainen kerros toimii omana palo-osastonaan. Tällöin osaston sisällä vaikuttavan palon katsotaan

kuumentavan ainoastaan kyseiseen palo-osastoon kuuluvia pilareita. Palolle alttiin pilarin taivutusjäykkyys on paljon pienempi kuin normaalitilanteessa ja jos palolle altistettu pilari on päistään täysin kiinnitetty ylä- sekä alapuoliseen pilariin, muuttuu tuentatapa suhteessa muihin kerroksiin jäykäksi. (Peikko 2017, 377)



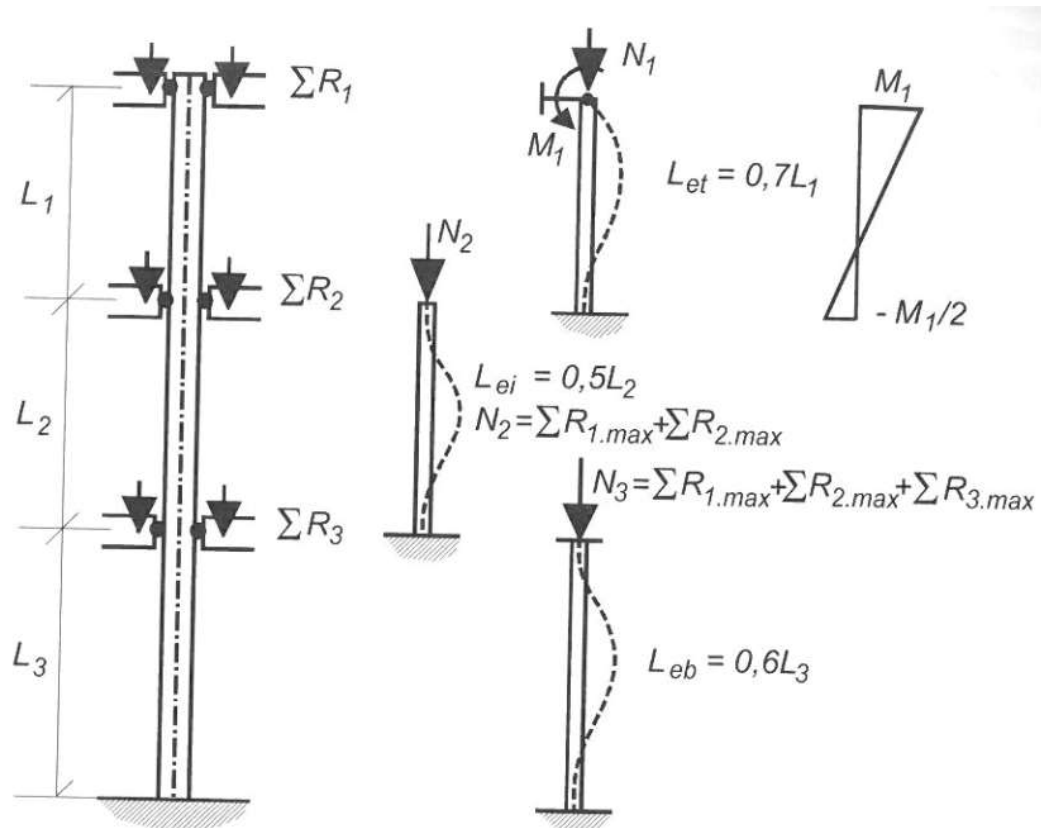
Kuva 5. Palolle altistettujen pilarien taipumamallin muuttuminen sivusuunnassa jäykistetyillä kehillä. (TRY/by58 2012, 297)

Kuvassa 5 esitetään periaatteellinen taipumamalli, jossa tarkastellaan pilarilinjojen C ja E toimintaa kun 2. ja 4. kerroksessa on palolle altistetut pilarit. Normaalilämpötilan tarkastelussa taivutusjäykkyys on pilareille joka kerroksessa likimain samansuuruinen, kun taas palon aikana kerroksien 2 ja/tai 4 pilarien taivutusjäykkyys on paljon pienempi. Kuvassa 5, 4. kerroksen pilarien alapäävät ovat ainoastaan jäykästi tuetut ja pilarien yläpäiden voidaan olettaa vapaasti kiertyviksi, ja sen mukaan määräytyy pilarien tehollinen pituus aikaisemman kaavan (12) mukaisesti. Kerroksen 2 pilareissa ylä- ja alapäävät ovat jäykästi kiinnitettyjä ja näin ollen pilarien päät ovat myös kiertymättömiä. Tämän tilanteen palonaikainen tehollinen pituus määräytyy kaavasta (11). (TRY/by58 2012, 298)

Jos kuvan 5 runko on säännöllinen, pilarilinjalla C voidaan pilaria tarkastella palotilanteessa aksiaalikuormitettuna, kun taas linjan E pilarin mitoituksessa tulee huomioida epäkeskisyyden vaikutus, ellei vaakarakenteista johtuvaa tukireaktiota saada tuottaa pilariin keskeisesti. Myös linjan C ylimmän kerroksen pilarin tarkastelussa täytyy huomioida eri puolilta tulevien kuormitusten aiheuttamat epäkeskisyydet. (TRY/by58 2012, 298)

4.1.1 Pilarin jatkuvuus

Standardissa EN 1994-1-2 kohdassa 4.3.5.1(10) käydään läpi alimman kerroksen liittopilarin tehollinen pituus. Kohdan mukaan tehollinen pituus voi vaihdella kuvan 6 esittämien nurjahduspituuksien L_{ei} ja L_{et} välillä perustusten kiertymäjäykkyyden ja joustoluvun perusteella. Perustusten kiertymäjäykkyyden tarkastelujen sijasta on keskityttävä alapään kokonaiskiertymäjäykkyyteen, johon vaikuttaa myös perustusten liitos ja sen määritelty kiertymäjäykkyys. EN 1994-1-2 mukaan arvioituna alimman kerroksen tehollisena pituutena voidaan käyttää kuvan 6 mukaista nurjahduspituutta $L_{eb} = 0,6L$, joka voidaan olettaa jäävän varmalle puolelle. Tämä vastaa perustusten joustolukua $k = 0,35$. (TRY/by58 2012, 298)



Kuva 6. Sivusuunnassa tuetun kehän eri kerroksien pilarien palomitoituksessa tarvittavat voimasuureet, kun palo rajoittuu yhteen kerrokseen. Kuvassa esitetyt teholliset pituudet $L_{e,\theta} = L_{et}, L_{ei}$ ja L_{eb} koskevat jatkuvia pilareita. (TRY/by58 2012, 299)

Useiden selvitysten perusteella on todettu pilarien voimasuureiden jakautuminen palotilanteessa, jos pilarin taivutusjäykkyys pienenee merkittävästi verrattuna pilariin erikseen liittyvien osien taivutusjäykkyyteen. Ensimmäisenä Japanissa on pystytty

osoittamaan jatkuvien putkiliittopilareiden taivutusmomenttien suhteellisen pienet arvot, jonka ansiosta pilareita pystyttiin tarkastelemaan ainoastaan aksiaalikuormitettuna. (TRY/by58 2012, 299)

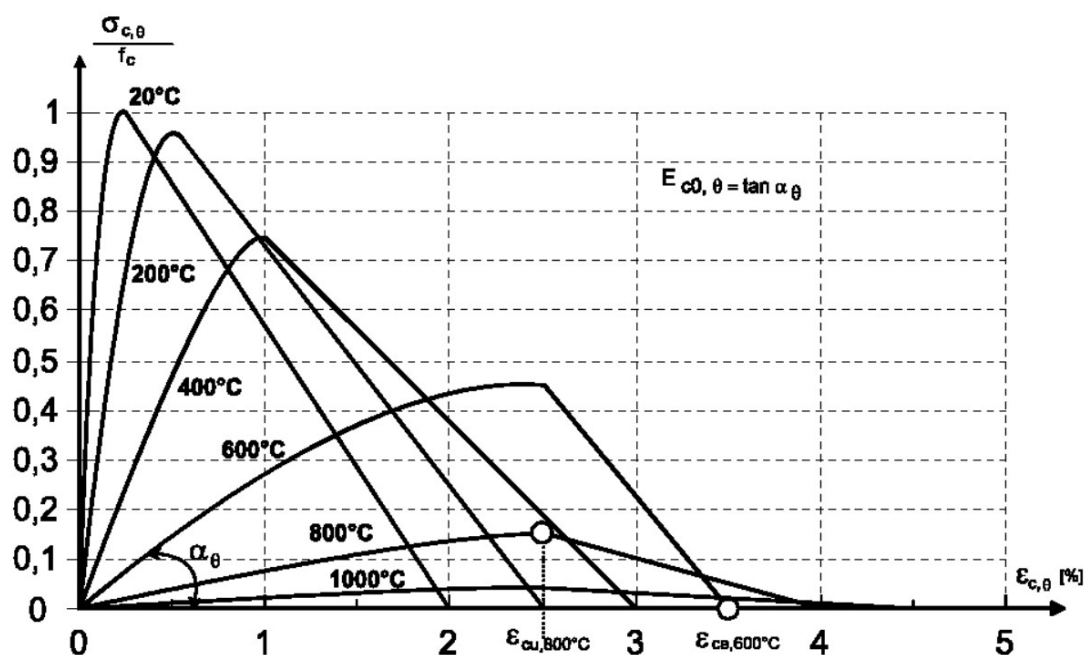
Palokäyttäytymiseen kehitetyllä ohjelmalla tutkittiin kehäpilareita standardipalolle altistettuina ja kuormat pidettiin vakioina tutkittavan analyysin ajan. Tarkastelut tehtiin pilarin tehollisille pituuksille suorittamalla ensin laskelmat murtumiseen tarvittavalle ajalle, minkä jälkeen pilarin murtumisaikaa analysoitiin tarkastelemalla pilaria erillisinä poikkileikkauksena sekä päistään yksinkertaisesti tuetulla menetelmällä normaaliveikotuksen alaisena. Tarkastelussa käytettiin paljon eri pituuksia, jotta saatiin selville yksinkertaisesti tuetun pilarin pituus niin, että murtumisaika oli sama kuin kehäpilarilla. Tutkimusten lopputuloksena pystyttiin todentamaan standardin EN 1994-1-2 ohjeet pilareiden tehollisista pituuksista palomitoituksen rajatilassa oikeelliseksi. (Peikko 2017, 380)

Toisen kertaluvun tarkastelussa kehärakenteissa aiheutui momentista kuitenkin erittäin vaikeasti mallinnettava kaksoiskaarevuus, jonka vaikutuksella ei ollut osuutta palonkesto-aikaan. Tämän perusteella saatiin esitettyä teoria, jonka mukaan myös hoikkien pilareiden mitoitus onnistuu aksiaalikuormitettuna palotilanteessa. (TRY/by58 2012, 300)

4.2 Putkiliittopilarien teholliset ominaisuudet palomitoituksessa

Liittopilari puristettuna sauvana palomitoitustarkastelussa edellyttää pilaripoikkileikkauksen tehollisen taivutusjäykkyyden $(EI)_{eff.fi}$ arvioimista. Tämä on esitetty kapaleessa 3 kaavassa (5), joka pohjautuu standardin EN 1994-1-2 kohtaan 4.3.5.1(5). Kun lämpötilajakauma tiedetään pilaripoikkileikkauksessa, pystytään suorittamaan laskutoimenpiteet taivutusjäykkyydelle $(EI)_{eff.fi}$ sekä pilaripoikkileikkauksen puristuskestävyydelle $N_{pl.Rd.fi}$. Betonipoikkileikkauksien ominaisuuksien $(EI)_{c,\theta}$ ja $N_{c.Rd.fi}$ laskeminen tarkasti on erittäin hankalaa, koska betonipoikkileikkauksen lämpötilat ovat voimakkaasti muuttuvia keskipisteen ja ulkopinnan välillä. (TRY/by58 2012, 305)

Alla kuvaaja, jossa esitetään graafisesti betonin jännityksen ja puristuman väliset yhteydet eri lämpötiloissa.



Kuva 7. Silikaattipitoisia kiviaineksisä sisältävän betonin jännitysten ja puristuman väliset yhteydet. (SFS-EN 1994-1-2, 66)

4.2.2 Teräksen- ja raudituksen lämpötilat

Betoniraudituksen lämpötilat oletetaan samoiksi kuin betonissa vallitseva lämpötila rauditustankojen keskiöiden sijaintikohdassa. (TRY/by58.s.308) Kuumavalssatuille betoniteräksille voidaan käyttää samaa materiaalien pienennyskertoimien taulukkomallia sekä lujuuden- ja muodonmuutosten ominaisuuksia. Kylmämuokatulle betoniteräkselle on omat arvonsa. Alla esitetyssä taulukossa on koottu rakenneteräkselle, kuumavalssatulle- sekä kylmämuokatulle betoniteräkselle materiaaliominaisuuksien pienennyskertoimet. Väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti, jotta päästään tarkempiin tuloksiin. (Peltomaa 2009, 146)

Taulukko 13. Teräksen materiaaliominaisuuksien pienennyskertoimet. (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

Lämpötila	Rakenneteräs ja kuumavalssatut raudoitustangot		Kylmämuokatut raudoitustangot	
θ_a, θ_s	$k_{Ea,\theta}$	$k_{Es,\theta}$	$k_{Es,\theta}$	$k_{s,\theta}$
20	1	1	1	1
100	1	1	1	1
200	0,9	1	0,87	1
300	0,8	1	0,72	1
400	0,7	1	0,56	0,94
500	0,6	0,78	0,4	0,67
600	0,31	0,47	0,24	0,4
700	0,13	0,23	0,08	0,12
800	0,09	0,11	0,06	0,11
900	0,0675	0,06	0,05	0,08
1000	0,045	0,04	0,03	0,05
1100	0,0225	0,02	0,02	0,03
1200	0	0	0	0
	$k_{Ea,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}, k_{Es,\theta} = \frac{E_{s,\theta}}{E_s}$ $k_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_y}, k_{s,\theta} = \frac{f_{sy,\theta}}{f_{sk}}$		$k_{Es,\theta} = \frac{E_{s,\theta}}{E_s}, k_{s,\theta} = \frac{f_{sy,\theta}}{f_{sk}}$	

Teräspoikkileikkauksen lämpötilan vaihtelu on vähäistä, minkä vuoksi sen ominaisuudet voidaan määrittää taulukoiden 12 ja 13 avulla keskimääräistä lämpötilaa käyttäen eri palonkestoluokissa tietyin reunaehdoin määriteltynä.

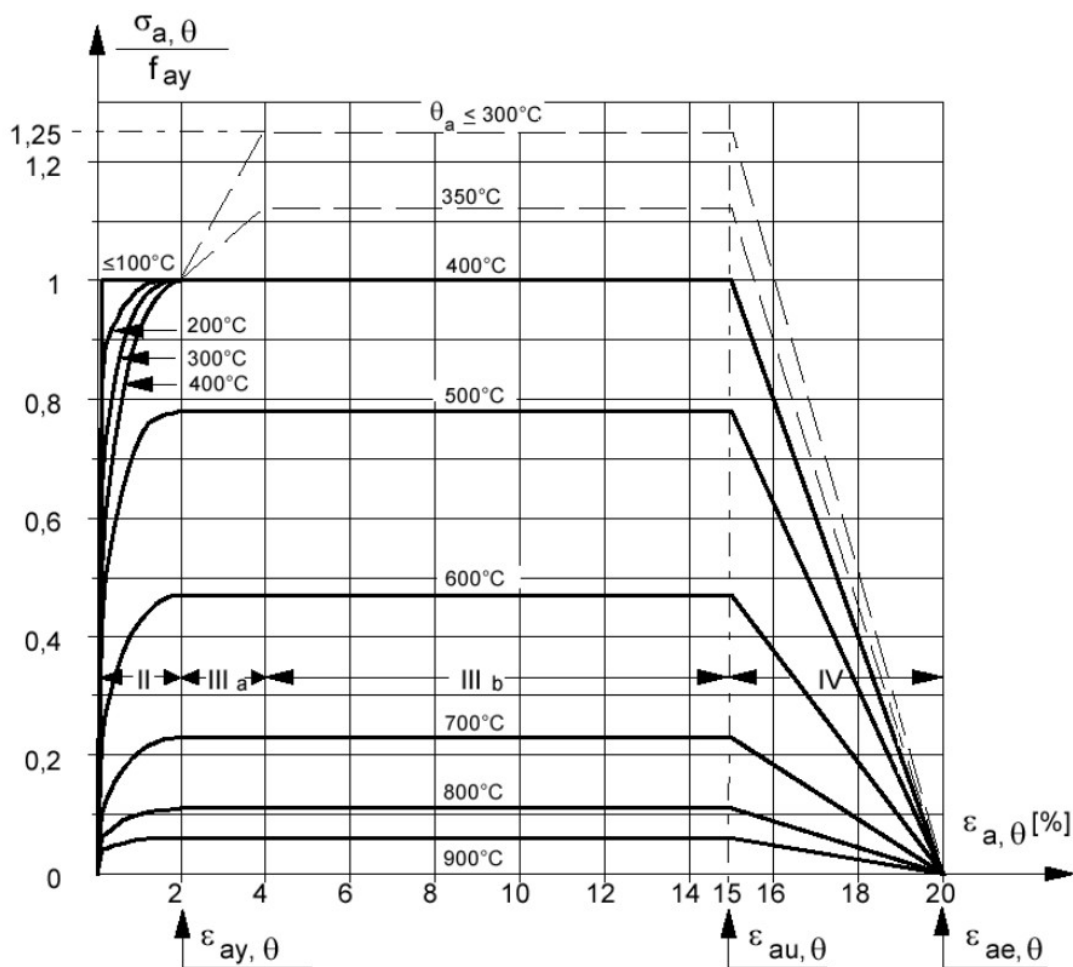
Taulukko 14. Pyöreiden putkiprofiilien keskimääräinen lämpötila θ_a °C ulkohalkaisijan D funktiona. (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

Stand.palo	R30	R60	R90	R120
$\theta_a(D)$	$620 + 95 \times \left(\frac{510-D}{370} \right)^{0,8}$	$820 + 4,18 \sqrt{510-D}$	$955 + 20 \times \left(\frac{510-D}{290} \right)^{1,5}$	1015
Rajaehdot	$135 \leq D \leq 510$	$165 \leq D \leq 510$	$200 \leq D \leq 510$	$270 \leq D \leq 510$

Taulukko 15. Neliöputkiprofiilien keskimääräinen lämpötila θ_a °C sivumitan b funktiona. (SFS-EN 1994-1-2 NA 2016)

Stand.palo	R30	R60	R90	R120
$\theta_a(b)$	650+ $45 \times \sqrt{\frac{400-b}{280}}$	860+ $30 \times \sqrt{\frac{400-b}{350}}$	970+ $5 \times \left(\frac{400-b}{200}\right)^{1,5}$	1025
Rajaehdot	$120 \leq b \leq 400$	$150 \leq b \leq 400$	$200 \leq b \leq 400$	$250 \leq b \leq 400$
Kun $b > 400$, käytetään sivumittaa $b = 400$ vastaavia lämpötiloja				

Teräksen jännitys-venymäkäyrästä huomataan, ettei palotilanteessa ole myötölujittuvaa aluetta. Tämä sallitaan ainoastaan kehittyneiden laskentamallien käytössä, joka rajaa lämpötilan alle 400°C. Aiemmin luvussa 3 kohdassa 3.2 esitettävässä taulukossa 3 pienennyskertoimien ja standardin EN 1994-1-2 sekä siihen perustuvan liitteen A ohjeiden avulla saadaan todenmukaisia käyriä jännityksistä ja venymistä korkeissa lämpötiloissa. (SFS-EN 1994-1-2 2014, 64)



Kuva 8. Rakenneteräksen S355 jännitys-venymäkäyrät korkeissa lämpötiloissa muodonmuutoksen alueella. (SFS-EN 1994-1-2, 64)

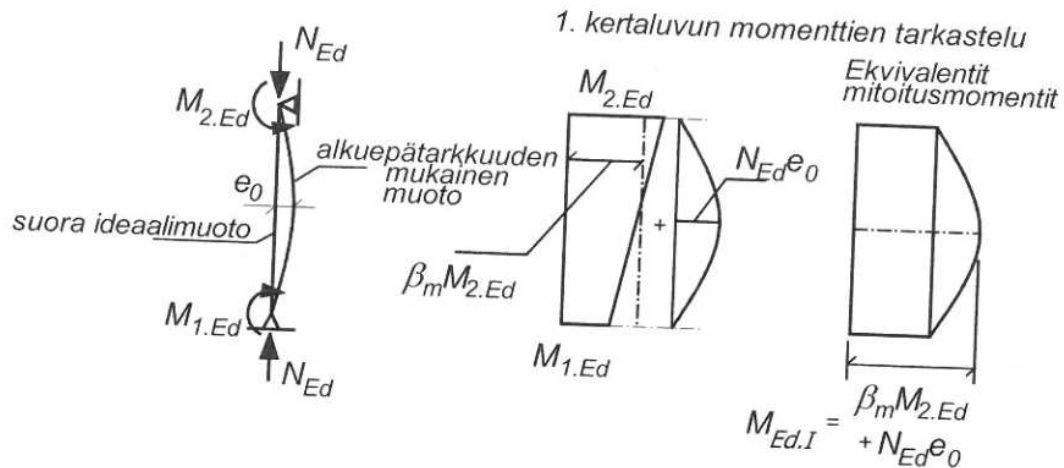
4.3 Kuorman epäkeskisyyden vaikutusten tarkastelu

Tämän opinnäytetyön luvussa 2 käsiteltiin hieman palotilanteen epäkeskistä kuormaa ja sitä, milloin epäkeskisyys vaikuttaa pilarilla sekä esitettiin Suomen kansallisen liitteen menetelmä, jossa saatiin kaavasta (15) epäkeskeisesti kuormitetun pilarin puristuskestävyys osana aksiaalikuormitetun pilarin kestävyttä. Oletuksena kuormitus $M_{Ed,fi}$ sisältää toisen kertaluvun vaikutukset, jotka voivat muuttua erittäin merkittäviksi hoikissa pilareissa. Tästä syystä palomitoituksen ensimmäisen kertaluvun mukaista mitoitusmomenttia $M_{max,fi}$ voidaan korottaa suurennuskertoimia käyttämällä, joten tässä tilanteessa $M_{Ed,fi} = k_m M_{max,fi}$ suurennuskerroin k_m on:

$$k_m = \frac{1}{1 - \left(\frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd,fi}}\right)^m} \quad (16)$$

missä potenssi $m \geq 1$ ja jonka avulla voidaan säädellä suurennuskerrointa ja näin ottaa huomioon esimerkiksi poikkileikkauksessa vallitsevan raudoitussuhteen vaikutus kestävyteen. (Peikko 2017, 396) Kaavassa palomitoituksen aksiaalipuristuskestävyys $N_{Rd,fi} = \chi N_{pl,Rd,fi}$.

Kuitenkin kehävaikutuksesta aiheutuvat jatkuvan pilarin momentit palo-osastossa pienenevät jatkuvasti pilarin lämpötilojen noustessa. Lyhyiden pilareiden toisen kertaluvun momentit aiheutuvat pilarin taipumasta ja ovat erittäin pieniä, joten silloin tämän tapaisia pilareita voidaan pitää palotilanteessa puhtaasti aksiaalikuormitetuina. Täytyy myös muistaa, että EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.4(5) toisen kertaluvun huomioiva kerroin k_m esitetään standardissa ekvivalentin momentin kertoimen kanssa. Jos mitoitusmomentti M_{Ed} on summatermi, sen voidaan olettaa sisältävän useampia kuin yhden ensimmäisen kertaluvun momentin, joihin liittyy erilaiset kertoimet ekvivalentin momentille β . Kyseisessä lausekkeessa esitetty ehto $k \geq 1$ tarkoittaa, että suurin ensimmäisen kertaluvun momentti pitää aina olla isompi kuin mitoitusmomentti pilarin pituudella. (TRY/by58 2012, 118) Eurokoodien hieman epäselkeän merkintätavan vuoksi EN 1994-1-1 kohta 6.7.3.4(5) on tulkinnanvarainen ja mahdollisesti aiheuttaa myös virheitä laskentatuloksissa.



Kuva 9. Samanmerkkiset pilarin päiden momentit ja niitä edustava ekvivalentin momentin kertoimen periaate. (TRY/by58 2012, 205)

Kuvan 9 mukaan alkukäyryyden vaikutusta ei kerrota ekvivalentin momentin kertoimella β , koska epätarkkuuden momenttiin $e_0 N_{Ed}$ liittyvä momentin suurennus ei ole riippuvainen ekvivalentinmomentin kertoimesta. (TRY/by58 2012, 206)

Standardin EN 1994-1-2 liitteessä H esitetään epäkeskisyyden vaikutuksen huomioon ottaminen, kun asetetaan mitoitus ehdoksi:

$$\frac{N_{Ed.fi.\delta}}{\varphi_\delta \varphi_s} \leq N_{Rd.fi} \quad (17)$$

missä $N_{Rd.fi}$ on sama aksiaalipuristuskestävyys kuin edellisessä lausekkeessa ja $N_{Ed.fi.\delta} = N_{Ed.fi}$ kun $M_{Ed.fi} > 0$, kun taas lausekkeessa jakajana tulo $\varphi_\delta \varphi_s < 1$ ottaa huomioon epäkeskisyyden vaikutuksen. (Peikko 2017, 395)

Liitteessä H luvut φ_δ ja φ_s esitetään erittäin epäselkeästi ainoastaan kuvaajien avulla, eikä niihin pohjautuvia tuloksia selitetä missään tarkemmin sekä $\varphi_s \leq 0,95$ on ainoastaan raudoitussuhteista $\frac{A_s}{A_c}$ syntyvä funktio. Lukuun $\varphi_\delta \leq 1$ sisältyy jo valmiiksi kuorman epäkeskisyyden sekä pilarin hoikkuuden vaikutukset, mutta kyseisen kuvaajan lukutarkkuus on erittäin huono. Huomioitavaa liitteessä H esitettyssä menetelmässä on, että käyttöä rajoitetaan antamalla ylä- ja alarajat poikkileikkauksen koolle sekä teholliselle pituudelle mitoitus ehdon $L_{e,\theta} \leq 4,5m$. Osoittamat ehdot ovat hieman ristiriidassa pilarin hoikkuuden suhteen, koska rajoituksia tähän ei ole. Näin ollen ehtojen

mukaan menetelmällä voitaisiin mitoittaa 140mm poikkileikkaukseltaan oleva pilari, jonka pituus saisi olla ainoastaan 4,5m. (TRY/by58 2012, 314) Tämän kokoinen poikkileikkaus ei olisi mitenkään järkevä nykyaikaisten rakennelmien koon suhteen.

Periaatteessa yhteisvaikutusta momentin ja normaalivoiman suhteen voidaan tarkastella samoilla periaatteilla kuin normaalilämpötilassa EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.2 mukaisesti. Tällöin yhteisvaikutuksen mitoitusehto on:

$$\frac{M_{Ed,fi}}{\mu_{d,fi}M_{pl,Rd,fi}} \leq \alpha_{M,fi} \quad (18)$$

missä

$$\mu_{d,fi} = \frac{1-\chi_{d,fi}}{1-\chi_{c,fi}} \quad (19)$$

$$\chi_{d,fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{pl,Rd,fi}} \quad (20)$$

$$\chi_{c,fi} = \frac{f_{c,eff,\theta}A_c}{N_{pl,Rd,fi}} \quad (21)$$

Standardin EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.4(3) mukaan toisen kertaluvun vaikutuksia ei tarvitse huomioida, jos standardin kohta 5.2.1(3) on voimassa:

$$\alpha_{cr} \geq 10 \quad (22)$$

missä $\alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}}$, joka kuvaa kimmoteorian mukaisen kriittisen kuorman suuruutta niin, että se on mitoituskuormitukseen verrattuna niin suuri, ettei rakenteelle aiheudu toisen kertaluvun momenteja. (Peikko 2017, 395)

Standardin SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen soveltamisohje NCCI antaa selkeän ja yksinkertaisen ohjeistuksen putkiliittopilareiden palomitoituksen epäkeskisyksien tarkasteluun. Menetelmässä on mielestäni ratkaistu hyvin esimerkiksi liitteen H epäselkeät kohdat ja mahdollisesti se aiheuttaa myös vähemmän virheitä laskentatuloksissa.

Momentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus otetaan huomioon normaalivoiman $N_{Ed,fi}$ epäkeskisyytenä. Tämä voidaan ratkaista kaavasta (23):

$$e_{fi} = \frac{M_{Ed,fi}}{N_{Ed,fi}} \quad (23)$$

missä $M_{Ed,fi}$ on pilarin pituudella palolle altistettuna esiintyvä suurin taivutusmomentti. $N_{Ed,fi}$ on kyseistä momenttia vastaava kuormitustapaukseen liittyvä normaalivoima.

Kaavan (23) avulla saatiin muutettua taivutusmomentti epäkeskisyydeksi e_{fi} . Puristuskestävyys $N_{Rd,fi,\delta}$ lasketaan epäkeskeisesti kuormitetulle pilarille osana aksiaali-kuormitetun pilarin kestävyyttä $N_{Rd,fi}$, joka saadaan aiemmin luvussa 3.2 esitetystä kaavasta (15):

$$N_{Rd,fi,\delta} = XN_{Rd,fi} \quad (15)$$

missä X on palotilanteen nurjahduskestävyyden $N_{Rd,fi}$ heikennyskerroin, joka saadaan kaavasta (24):

$$X = 0,5 \left(B_{fi} - \sqrt{B_{fi}^2 - \frac{4}{\chi(\lambda_{\theta})}} \right) \quad (24)$$

missä B_{fi} on pilarin taivutuskestävyyden huomioon ottava luku. B_{fi} saadaan kaavasta (25):

$$B_{fi} = 1 + \frac{1}{\chi(\lambda_{\theta})} + e_{fi} \frac{N_{pl,Rd,fi} - N_{c,Rd,fi}}{M_{pl,Rd,fi}} \quad (25)$$

missä $N_{pl,Rd,fi}$ on kaavasta (4) saatu liittopilaripoikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa ja $N_{c,Rd,fi}$ on betonipoikkileikkauksen puristuskestävyys, joka saadaan Suomen kansallisen liitteen teknisen ohjeen NCCI:n lausekkeesta (1.3d). $M_{pl,Rd,fi}$ on palonaikainen taivutuskestävyys.

Palolle altistetun pilarin taivutuskestävyyden $M_{pl.Rd.fi}$ tarkempi arvioiminen on monimutkainen ja hankala manuaalisesti suorittaa, mutta sitä voidaan helposti arvioida samalla tavoin kuin puhdasta taivutuskestävyyttä normaalilämpötilassa, käyttäen kestävyyslausekkeissa materiaalin lujuuksina:

$$\begin{cases} f_{cd} \rightarrow f_{c,eq\theta} = k_{c,\theta}(\theta_{c,eq\theta})f_{ck} \\ f_{sd} \rightarrow f_{sy,\theta} = k_{ys,\theta}(\theta_s)f_{sk} \\ f_{yd} \rightarrow f_{y,\theta} = k_{ya,\theta}(\theta_a)f_y \end{cases}$$

5 LASKENTATYÖKALUJEN VERTAILU

Tämän luvun tarkoituksena on vertailla standardin SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukana julkaistun soveltamisohjeen NCCI menetelmää betonitäyhteisten putkiliittopilarien palomitoitukseen. NCCI:n vastuuhenkilö tekniikan tohtori Matti Leskelä on aikoinaan laatinut menetelmän käyttäen teräsrakenneyhdistyksen liittopilarijulkaisussa esitettyjä lämpötiloja, joissa tulokset on saatu kokeellisia menetelmiä käyttäen. TRY:n julkaisussa suurin pyöreä pilarikoko on halkaisijaltaan 508 mm leveä poikkileikkaus, joten tämän seurauksena NCCI:n menetelmä rajoittaa poikkileikkauksen maksimihalkaisijaan 510 mm. (Leskelä, M Sähköpostikeskustelu 17.3.2020)

Tämän opinnäytetyön yhtenä päämääränä oli selvittää, onko standardin SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen sovellusohjeen NCCI:n menetelmää mahdollista laajentaa halkaisijaltaan yli 510 mm suurille poikkileikkauksille. Tämän laajentamisen mahdollisuuksien yhteydessä tiedostettiin menetelmän kaavojen monimutkaisuus ja niiden takana vallitsevien kokeellisten tutkimuksien ja polttokokeiden vaikuttavuus. Näiden tietojen perusteella lähtökohdat menetelmän laajentamiseen olivat melko suppeat. Lämpötilojen ja muiden parametrien toimivuus ja varmallalla puolella pysyminen rajoittaa poikkileikkausten kokoa, koska dataa sitä suuremmille pilareille ei ollut olemassa NCCI menetelmää tehdessä. (Leskelä, M Sähköpostikeskustelu 17.3.2020)

Menetelmästä riippumatta sitä on käytettävä kokonaisuutena. Lämpötiloja, pienennyskertoimia ja muita parametreja on käytettävä menetelmän ohjeiden mukaisesti, näin myös NCCI menetelmä toimii. Silloin voidaan todeta, että menetelmän käyttö rajoittuu sellaisenaan kuin se on annettu, eli laajentamisen mahdollisuutta ei ole. Tämä tarkoittaa silloin mitoituksen kannalta poikkileikkauksen halkaisijan rajoittuvan 510mm. (Leskelä, M Sähköpostikeskustelu 17.3.2020)

Todellisuudessa menetelmää toki pystyy laajentamaan halkaisijaltaan yli 510mm pila-reille, kun määritellään uudestaan kaikki siinä tarvittavat parametrit. Tämä tarkoittaisi esimerkiksi ekvivalenttien lämpötilojen sekä sovituskertoimien uudelleen määrittämistä, joita menetelmä edellyttäisi. (Leskelä, M Sähköpostikeskustelu 17.3.2020)

Tämän luvun alakohdassa vertailulaskelmissa tarkastellaan Suomen kansallisen liitteen soveltamisohjeen NCCI:n menetelmän eroavaisuuksia muiden laskentaohjelmien tulosten kanssa. Laskelmat suoritetaan ääritilanteissa suurilla hoikkuuksilla ja isoilla epäkeskisyyksillä, minkä ansiosta päästään tarkastelemaan laskentamenetelmän todellista toimivuutta sekä luotettavuutta. Vertailuissa käytettävät muut laskentaohjelmat ovat Rautaruukin Comcol sekä Peikko Groupin liittopilarityökalu.

Vertailulaskelmissa oli tarkoitus alun perin olla yhtenä vertailtavana työkaluna SKOL liittopilarin laskentapohja, joka käyttää palomitoitustarkastelussa luvussa 3.1 esitettyä taulukkomitoitusta. Laskentapohjan tarkasteluissa havaittiin nopeasti palomitoituksessa käytettävän taulukkomitoituksen antamien tulosten erojen olevan huomattavan suuria jo pienillä poikkileikkauksilla, jolloin suurempien pilarikokojen ja kuormien vaikutukset heikentävät tuloksia entisestään. Tästä johtuen tarkempi vertailu todettiin tämän työkalun osalta tarpeettomaksi ja päätin, että kerron ainoastaan lyhyesti kyseisestä SKOL laskentapohjien yhteistyöhankkeesta, sillä tulokset eivät olisi olleet millään tavalla vertailukelpoisia keskenään.

SKOL-laskentapohjat ovat rakennesuunnittelualalla yleisesti käytössä ja useiden toimistojen kirjastoissa saatavilla jokapäiväistä käyttöä varten. SKOL-pohjat on luotu rakennetoimikunnan yhteistyöhankkeena EN-normeihin perustuen. Yhteistyöhön osallistuvivat SKOL:in jäsenoimistot, 17 suunnitteluyritystä, 7 oppilaitosta sekä muutama materiaalijärjestö. Hankkeen lopputuloksena saatiin valtava määrä laskentapohjia eri

materiaaleille ja toimintatavoille. Laskentapohjaa voidaan pitää luotettavana vertailun pohjana, koska sen takana on monta alan toimijaa ja se on käytössä monella suunnittelutoimistolla. (Betoniteollisuus ry 2010, 58)

SKOL-laskentapohja on luotu EC4 mukaisesti ja sillä voi mitoittaa ainoastaan yksi-kerrospilareita. Pyöreiden liittopilarien laskentapohja noudattaa palomitoituksessa standardin EN-1994-1-2 kohdan 4.2.3.4 mukaista taulukkomitoitusta. (Kielemniva 2017, 62)

Comcol on Rautaruukin ja Fundia Oy:n kehittämä liittopilariohjelma. Se on laadittu liittorakenteiden mitoittamisen avuksi ja sitä käyttävät monet rakennesuunnittelutoimistot. Ohjelma on kehitetty Steelcomp liittolaatta-liittopilarirunkojärjestelmän suunnitteluun ja mitoittamiseen. Comcol on vanha, suunnittelijoiden arjessa pitkään käytetty ja se on todettu erittäin helppokäyttöiseksi sekä luotettavaksi työkaluksi. (Rautaruukki Oy, 4)

Tämän luvun vertailulaskelmissa käytettävällä Comcol ohjelmistolla voidaan mitoittaa liittopilari palonkestoluokissa R30-R240 ja suorittaa liittopilarin täydellinen lujuuslaskenta ja kustannusoptimointi. Comcolin laskentamenetelmät eivät suoranaisesti noudata minkään normien mukaista menetelmää, vaan kyseisessä ohjelmassa käytetyt laskentamenetelmät ovat normiriippumattomia, koska ne perustuvat poikkileikkauksen tarkkaan analysointiin ensimmäisen ja toisen kertaluvun teorian mukaisesti. Pilarijänteen palotekninen mitoitus suoritetaan ohjelmassa elementtimenetelmää käyttäen, jossa poikkileikkauksen elementtiverkon lämpötilajakauma lasketaan vaadittuun aika- luokkaan. Pilarin palotilanteen kapasiteetti määräytyy poikkileikkauksen eri vyöhykkeiden lämpötilojen mukaan laskettujen voimien perusteella ja soveltuu jopa 10-kerroksisten pilareiden laskentaan. (Suomen Betoniyhdistys ry, 6-7)

Comcolin käyttöliittymä on tehty siten, että itse ohjelman käyttäjä ei näe laskennassa käytettäviä kaavoja tai muita yhdistelyjä. Mitoituksen varmuustasot noudattavat kuitenkin ENV-esistandardia ja niihin liittyviä suomen kansallisia soveltamisasiakirjoja, mutta kyseiseen ENV-esistandardiin perustuva laskentamenettely on nykyisin vanhentunut. Näin ollen ohjelman luotettavuutta ei voida todeta varmaksi ilman mahdollisia vertailulaskelmia, joita tässä luvussa suoritetaan. Johtopäätös -osiossa luvun lopussa

käydään tarkemmin läpi Comcol ohjelman oikeellisuutta ja analysoidaan mahdollisia eroavaisuuksia vertailtaviin laskentapohjiin. Kyseinen ohjelmisto on ollut pisimpään suunnittelijoiden käytössä ja sitä on pidetty luotettavana sekä helppokäyttöisenä ohjelmalla. Voidaan siis todeta, että Comcol ohjelma on erittäin hyvä vertailua tehdessä. (Rautaruukki Oy, 4)

Tässä opinnäytetyössä käytettävä Peikko Groupin liittopilarityökalu perustuu standardien (SFS-EN 1994-1-1; SFS-EN 1994-1-2) yksinkertaisiin menetelmiin. Perusongelmaksi muodostuu momentin huomioiminen palotilanteessa, jota eurokoodit eivät mahdollista ollenkaan. Laskentatyökalussa palomitoituksessa yhteisvaikutuskestävyys perustuu SCI:n menetelmään, joka on julkaisultaan yhteensopiva ENV-esistandardin kanssa. SCI:n menetelmä tekee nurjahduksesta ylikorostetun, mutta jäykkyyksien kalibroinnin myötä lopputuloksena saadaan varmallalla puolella olevia tuloksia. Tapaukset, jotka jäävät lähelle aksiaalikuormitettua tilannetta menevät turhan paljon varmalle puolelle. Betonipoikkileikkauksen lämpöprofiilin palotilanteen määrittämisessä Peikon ohjelma ei käytä ekvivalenttia betonilämpötilaa $\theta_{c, equ}$ vaan jakaa poikkileikkauksen osiin, joissa se määrittelee niille osille tietyn lämpötilan niin sanotulla yksinkertaistetulla vyöhykemenetelmällä. (Soivio, J Sähköpostikeskustelu 21.2.2020)

Yhtenä tämän opinnäytetyön vertailtavana työkaluna piti alun perin olla Swecon kehittämä BetoniPilari-Lite työkalu, joka on alun perin suunniteltu pelkän betonipilarin mitoittamiseen, mutta tällä hetkellä sitä ollaan työstämässä myös betonitäynteisen putkiliittopilarin mitoittamiseen murtorajatilassa sekä palotilanteessa. Ohjelma on käyttöliittymältään Excel pohjainen ja myös erittäin helppokäyttöinen. Sillä saa nopeasti tarkastettua betonipilarin kapasiteetin sekä pian myös kokonaisuudessaan suoritettua liittopilarin laskennan. Kyseisen ohjelman palomitoitusosion kehittäminen on vielä hieman kesken ja siitä syystä sitä ei vertailulaskelmiin otettu mukaan. BetoniPilari-Lite ohjelmisto toimii samalla tavoin, kuin Rautaruukin kehittämä Comcol, eli se perustuu myös yleisen menetelmän poikkileikkauksen tarkkaan analysointiin nimellisen jäykkyyden, nimellisen kaarevuuden sekä rakennusmääräyskokoelman menetelmien mukaiseen laskentaan, jossa poikkileikkauksen lämpötilat määritellään yksinkertaistetulla vyöhykemenetelmällä. Tämä oli myös toinen syy, jonka takia kyseinen mitoitus työkalu jätettiin vertailulaskelmista pois. Sillä vältyttiin käyttämästä kahta samaa me-

netelmää, jotka todennäköisesti antavat melko samoja tuloksia. Opinnäytetyön tarkoituksena on vertailla SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukana julkaistun sovellusohjeen NCCI:n likimenetelmän toimivuutta, jolloin tärkeimpänä on yhteisvaikutuskestävyyteen sisällytetyn toisen kertaluvun käyttäytyminen sekä sen eroavaisuudet yleisen menetelmän tarkkaan laskentaan. Toisen kertaluvun momentin määrittäminen on pitkä laskentaoperaatio. Nimellisen jäykkyyden menetelmässä käytetään taivutusjäykkyyden nimellisarvoja tarkasteltaessa toisen kertaluvun vaikutuksia, jolloin huomioidaan halkeilun, materiaalien epälineaarisuuksien ja viruman vaikutukset kokonaisuudessaan. Nimellisen kaarevuuden menetelmä antaa taipumaan perustuvan nimellisen lisämomentin, silloin kun taipuma lasketaan nurjahduspituuden kaarevuuden maksimiarvon avulla. Näihin voidaan sisällyttää vielä vino taivutus, jonka seurauksena poikkileikkaukseen kohdistuu taivutusta kahdesta suunnasta samanaikaisesti, jolloin neutraaliakseli sijoittuu vinoon pääakselin suunnasta katsottuna.

Vertailulaskelmia tehdessä oletettiin käytettävien laskentapohjien tulokset oikeelliseksi ja todellisuuteen nähden varmalla puolella oleviksi sekä verifioiduiksi muiden laskentamenetelmiin ja tuloksiin pohjautuen. Laskelmissa tapahtuvien mahdollisten eroavaisuuksien varmuutta ei pystytä todentamaan, koska Comcol ohjelmasta saatujen tuloksien takana olevia kaikkia laskentamenettelyjä ei tarkasti tiedetä ja Peikon työkalu on saatu tähän opinnäytetyöhön vain vertailevaa tutkimusta varten.

5.1 Vertailulaskelmat

Vertailulaskelmissa tarkastellaan palotilanteessa edellä mainittujen laskentatyökalujen tuloksia ja vertaillaan niitä toisiinsa. Laskelmissa käytetyt liittopilariden lähtötiedot on esitetty alla olevissa taulukoissa, joista käy ilmi poikkileikkausten koot ja niissä käytettävät materiaaliominaisuudet.

Laskelmissa vertaillaan poikkileikkauksia ääritilanteissa, joissa asetetaan pilarille suuret hoikkuudet ja isot epäkeskisyydet. Niin kuin aikaisemmin todettiin, pilarin muunnettu hoikkuus λ_θ rajoittuu maksimiarvoon 2, jolloin päädyttiin vertailulaskelmissa antamaan poikkileikkaukselle muunnetun hoikkuuden arvoksi 1,5. Normaalivoiman epäkeskisyys laskelmissa on 10% pilarin halkaisijasta. Nämä siksi, että tarkoituksena

oli tarkastella poikkileikkauksen kestävyyttä ääritilanteissa. Jos näiden arvojen tulokset kohtaavat toisensa eri työkaluilla, silloin oletuksena oli laskentatyökalujen toimivuus myös vähemmän hoikilla pilareilla sekä pienillä epäkeskisyyksillä.

Laskelmat on jaettu neljään eri sarjaan, joissa muuttujina ovat poikkileikkausten koot, paloluokat R60 ja R120 sekä raudoitussuhteet 2% ja 5%. Yhteen sarjaan kuuluu aina kolme eri pilarikokoa D323,9x6, D508x10 ja D1016x20, jossa D viittaa pyöreään poikkileikkaukseen ja luku sen perässä pilarin halkaisijaan sekä rakenneteräksen seinämävahvuuteen. Näistä yleisimpiä liike- ja toimitilarakentamisessa ovat kaksi ensimmäistä poikkileikkausta.

Rakenteille etsitään 100% käyttöaste palotilanteessa, jolloin normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutuskestävyys on maksimissa ja näin ollen pystytään vertailemaan laskentatyökalujen todellinen käytettävyys. Kuormitustapauksissa pilari on päistään nivelellisesti tuettu, jolloin nurjahduskerroin on luvun 3 kohdan 3.2 esittämän kaavan (13) mukaisesti 1. Laskennassa käytetyt osavarmuusluvut määräytyvät palotilanteen mukaisesti, jolloin ne ovat ykkösiä. Pilarin pituus määräytyy laskennassa käytettävän muunnetun hoikkuuden mukaisesti, joka on kaikissa tapauksissa 1,5. Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet ovat seuraavat:

- Rakenneteräs: S355
- Betoni: C35/45
- Betoniteräs: B500B

5.1.1 Sarja 1

Sarjan 1 lähtötiedot on esitetty taulukossa 16 ja laskelmissa käytetty paloluokka on R60 ja raudoitussuhde 2%. Aiemmin mainittu palotilanteen normaalivoiman 10% etäisyys neutraaliaskelista on esitetty taulukossa 16 epäkeskisyytenä e_{fi} .

Taulukko 16. Sarjan 1 poikkileikkausten 1, 2 ja 3 lähtötiedot.

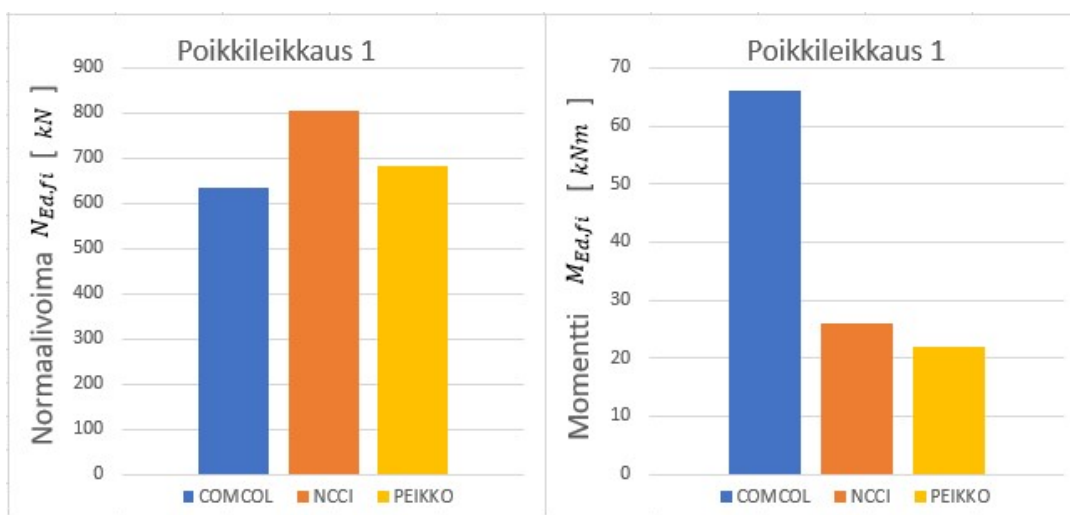
Sarja 1		Raudoitussuhde - 2% Hoikkuus - 1,5 Epäkeskisyyys - 10%				
Poikki-leikkaus	Poikkileikkauksen halkaisija D [mm]	Teräsosan vahvuus t [mm]	Teräslaji S355 f_y [N/mm ²]	Betonilaatu C35/45 f_{ck} [N/mm ²]	Betoniteräslaji B500B f_{sk} [N/mm ²]	
1	323,9	6	355	35	500	
2	508	10	355	35	500	
3	1016	20	355	35	500	
	Raudoituksen suojabetonipaksuus u_s [mm]	Raudoituksen halkaisija ϕ [mm]	Raudoituspäätyjen määrä n_s [kpl]	Raudoitussuhde ρ_s [%]	Hoikkuus λ_θ [-]	Epäkeskisyyys e_{fi} [mm]
1	50	16	8	2,151	1,5	32,39
2	50	25	8	2,145	1,5	50,8
3	50	32	20	2,197	1,5	101,6

Taulukon 16 esitettyjen lähtöarvojen perusteella on tarkasteltu tämän luvun alussa esitettyjen laskentamenetelmien antamia tuloksia. Laskennassa saadut tulokset on esitetty taulukossa 17 ja havainnollistettu kyseisiä lukuja kuvissa 10, 11 ja 12 pylvädiagrammeilla. Taulukossa 17 on myös esitetty tuloksien suhteelliset erot, jossa muiden laskentaohjelmien tuloksia on verrattu SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen sovellusohjeen NCCI:n menetelmään sekä myös Comcol ja Peikon työkaluja on verrattu keskenään. Suhteellisen eron antaman tuloksen ymmärrettävyyttä on helpotettu siten, että kun NCCI:n menetelmän tulos antaa suuremman kestävyuden, silloin suhteellinen ero on negatiivinen ja taas toisinpäin.

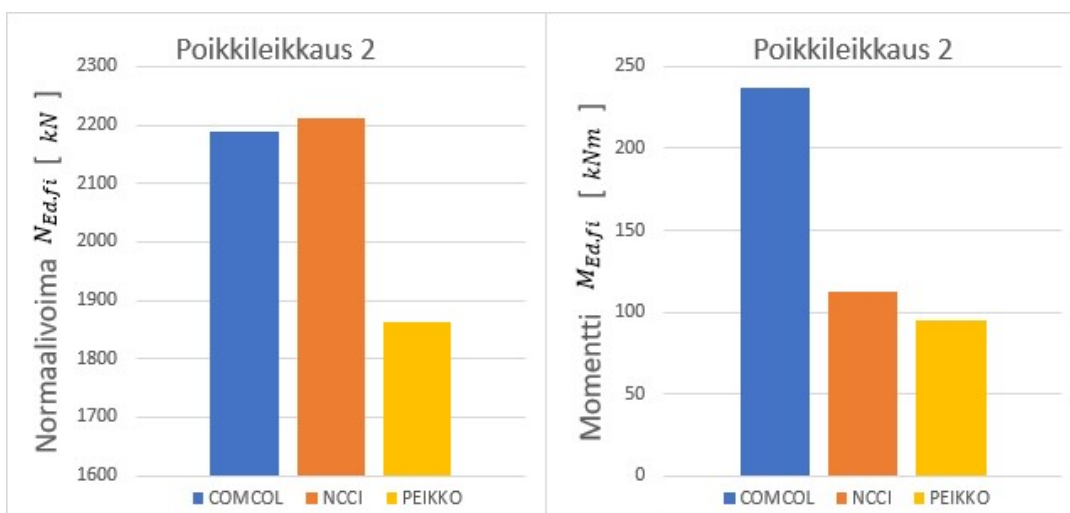
Taulukko 17. Laskentaohjelmilla saadut 100% käyttöasteet 2. kertaluvun huomioivan normaalivoiman ja sitä vastaava 1. kertaluvun taivutusmomentti palotilanteessa.

SARJA 1		Palotilanne					
		COMCOL		NCCI		PEIKKO	
Poikki-leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	
1	633	66	804	26	683	22	
2	2188	237	2211	112	1862	95	
3	8740	1839	0	0	8413	855	
		Suhteellinen ero					
		NCCI vs COMCOL		NCCI vs PEIKKO		PEIKKO vs COMCOL	
Poikki-leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	
1	-27,0	60,6	-17,7	-18,2	-7,9	66,7	
2	-1,1	52,7	-18,7	-17,9	14,9	59,9	
3	-	-	-	-	3,7	53,5	

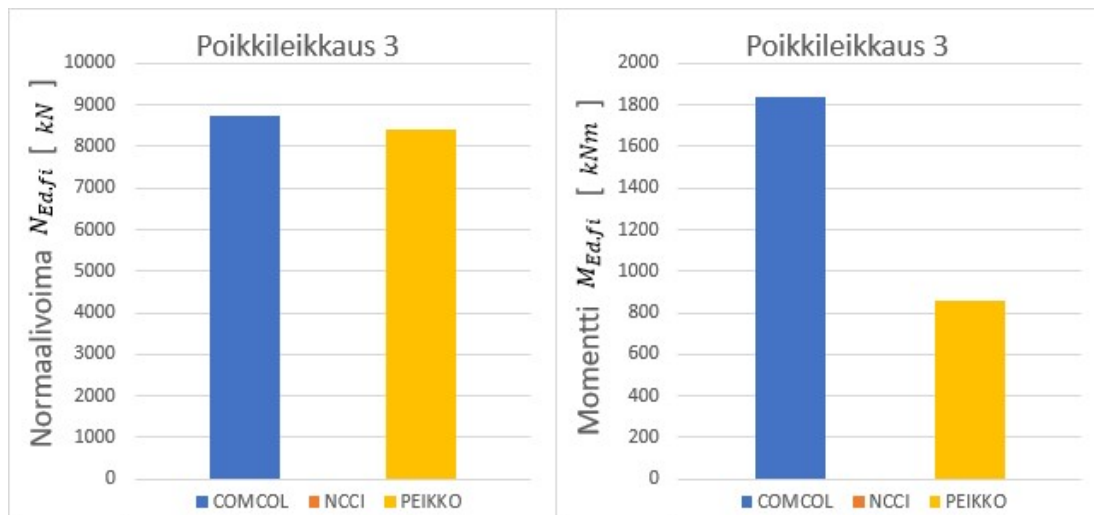
Taulukosta 17 voidaan todeta 100% käyttöastetta vastaavien mitoitusarvojen olevan melko lähellä toisiaan, kun taas Comcolin palotilanteen taivutuksesta aiheutuva momentti on huomattavasti suurempi verrattuna Peikon ja NCCI:n menetelmiin. Tähän yksiselitteisenä vastauksena on Comcolin yleisen menetelmän käyttö, joka tarkastelee poikkileikkauksen kestävyuden tarkasti ensimmäisen ja toisen kertaluvun teorian mukaisesti. Taulukosta huomataan myös, että poikkileikkauksen 3 vertailut on suoritettu ainoastaan Comcolin ja Peikon työkaluilla. Tämä johtuu aiemmin esitellystä Suomen kansallisen liitteen sovellusohjeen NCCI:n menetelmästä, joka rajoittuu 510mm suu-
relle poikkileikkaukselle.



Kuva 10. Poikkileikkauksen 1 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 11. Poikkileikkauksen 2 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 12. Poikkileikkauksen 3 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.

5.1.2 Sarja 2

Sarjan 2 lähtötiedot on esitetty taulukossa 18 ja laskelmissa käytetty paloluokka on R60 ja raudoitussuhde 5%. Raudoitussuhteen nostaminen viiteen prosenttiin vastaa hieman paremmin normaalia suunnittelua, pilarien ollessa hoikkia ja taivutusmomenttien arvot suhteellisen suuria. Tämän sarjan tarkastelussa pystytään hieman tarkastelemaan, muuttuivatko laskentaohjelmien suhteelliset erot pienemmiksi.

Taulukko 18. Sarjan 2 poikkileikkausten 1, 2 ja 3 lähtötiedot.

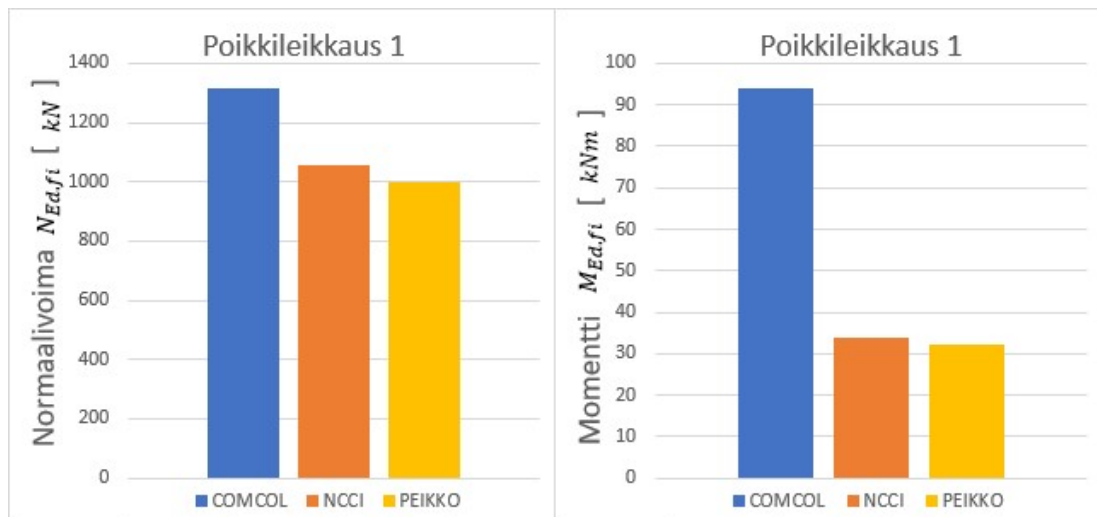
Sarja 2		Raudoitussuhde - 5% Hoikkuus - 1,5 Epäkeskisyyss - 10%				
Poikkileikkaus	Poikkileikkauksen halkaisija D [mm]	Teräsosan vahvuus t [mm]	Teräslaji S355 f_y [N/mm ²]	Betonilaatu C35/45 f_{ck} [N/mm ²]	Betoniteräslaji B500B f_{sk} [N/mm ²]	
1	323,9	6	355	35	500	
2	508	10	355	35	500	
3	1016	20	355	35	500	
	Raudoituksen suojabetonipaksuus u_s [mm]	Raudoituksen halkaisija ϕ [mm]	Raudoitustankojen määrä n_s [kpl]	Raudoitussuhde ρ_s [%]	Hoikkuus λ_{ϕ} [-]	Epäkeskisyyss e_{fi} [mm]
1	50	20	12	5,190	1,5	32,39
2	50	32	12	5,441	1,5	50,8
3	50	32	46	5,202	1,5	101,6

Taulukossa 18 on esitetty sarjan 2 poikkileikkausten 1, 2 ja 3 lähtötiedot, jotka ovat muuten samat kuin sarjassa 1, mutta raudoitussuhde nostettiin viiteen prosenttiin, jolloin raudoitustankojen määrä ja koko muuttuivat.

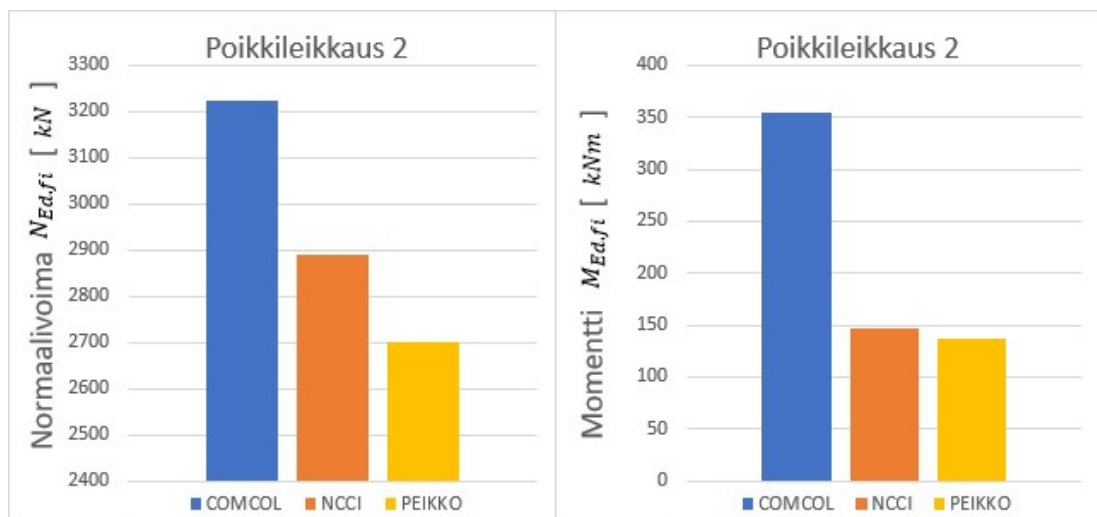
Taulukko 19. Laskentaohjelmilla saadut 100% käyttöasteet 2. kertaluvun huomioivan normaalivoiman ja sitä vastaava 1. kertaluvun taivutusmomentti palotilanteessa.

SARJA 2		Palotilanne					
	COMCOL		NCCI		PEIKKO		
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	
1	1315	94	1054	34	997	32	
2	3224	355	2889	147	2700	137	
3	13182	2793	0	0	0	0	
	Suhteellinen ero						
	NCCI vs COMCOL		NCCI vs PEIKKO		PEIKKO vs COMCOL		
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	
1	19,8	63,8	-5,7	-6,3	24,2	66,0	
2	10,4	58,6	-7,0	-7,3	16,3	61,4	
3	-	-	-	-	-	-	

Kuten taulukosta 19 huomataan, että NCCI:n ja Peikon väliset suhteelliset erot muuttuivat positiiviseen suuntaan, kun taas Comcoliin verrattuna suhteelliset erot pysyivät melko samoina tai muuttuivat ehkä jopa hieman suuremmiksi. Tämä voisi mahdollisesti viitata siihen, että Comcol pystyy hyödyntämään raudoitusta tarkan laskennan myötä enemmän raudoituksen ylittäessä jonkin tietyn raja-arvon. Taulukosta 19 voidaan myös huomata, että poikkileikkauksen 3 laskenta on suoritettu ainoastaan Comcol ohjelmistolla, koska Peikon laskentapohjan kapasiteetti ei riittänyt nostamaan raudoitussuhteen arvoa viiteen prosenttiin.



Kuva 13. Poikkileikkauksen 1 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 14. Poikkileikkauksen 2 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.

Poikkileikkauksen 3 havainnollistava pylväsdigrammi jätettiin pois, koska NCCI:n sekä Peikon menetelmiä ei saatu vertailtua Comcolin kanssa. Kuitenkin kuvista 13 ja 14 voidaan huomata Comcolin kestävyyksien suuret erot sekä todeta likimenetelmien jäävän turhankin paljon varmalle puolelle.

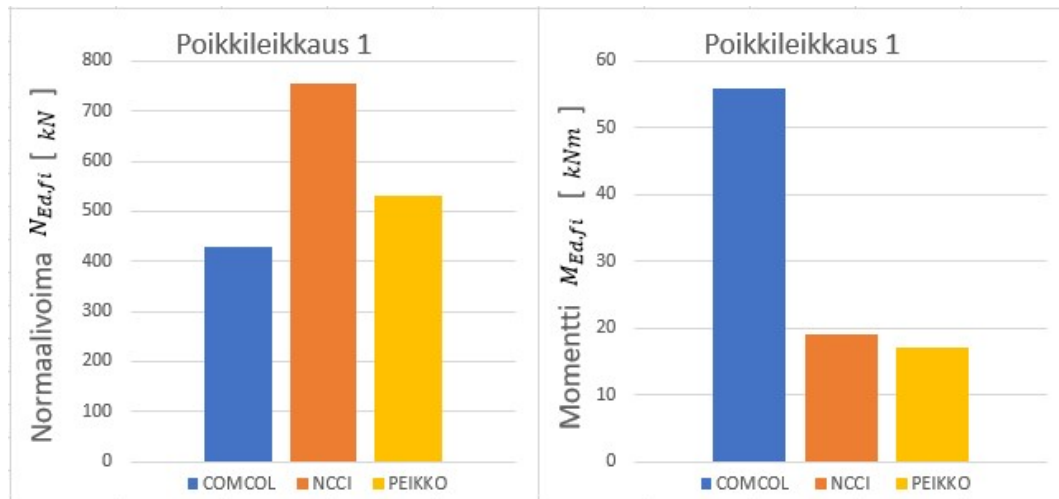
5.1.3 Sarja 3

Sarjan 3 lähtötiedot ovat samat kuin sarjassa 1 taulukossa 16 esitetyt arvot. Raudoitussuhde on 2%, mutta paloluokka tämän luvun laskelmissa on R120. Laskelmien suhteelliset erot todennäköisesti eroavat eniten toisistaan, koska paloluokkaa nostettiin ja samalla raudoituksen määrää vähennettiin.

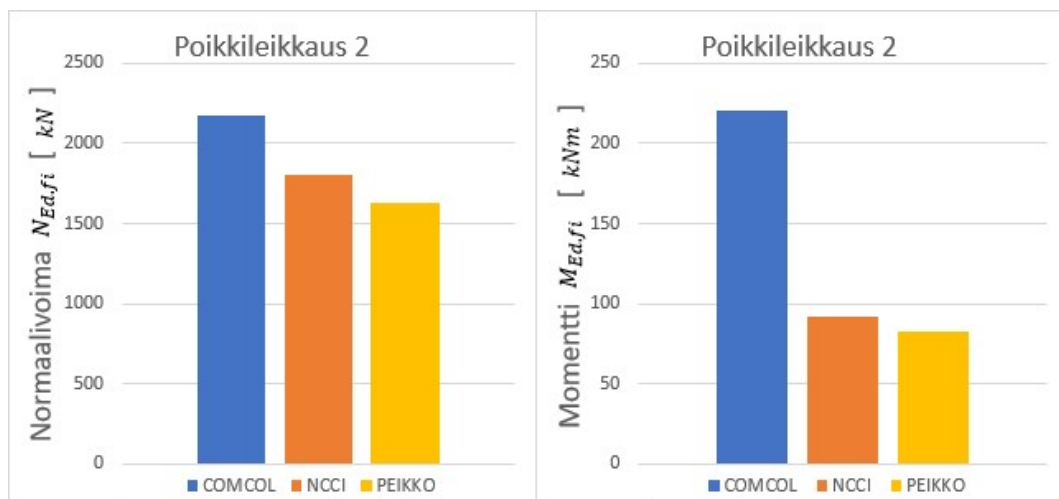
Taulukko 20. Laskentaohjelmilla saadut 100% käyttöasteet 2. kertaluvun huomioivan normaalivoiman ja sitä vastaava 1. kertaluvun taivutusmomentti palotilanteessa.

SARJA 3		Palotilanne					
		COMCOL		NCCI		PEIKKO	
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	
1	430	56	574	19	530	17	
2	2178	221	1803	92	1626	83	
3	7489	1558	0	0	7380	825	
		Suhteellinen ero					
		NCCI vs COMCOL		NCCI vs PEIKKO		PEIKKO vs COMCOL	
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	
1	-33,5	66,1	-8,3	-11,8	-23,3	69,6	
2	17,2	58,4	-10,9	-10,8	25,3	62,4	
3	-	-	-	-	1,5	47,0	

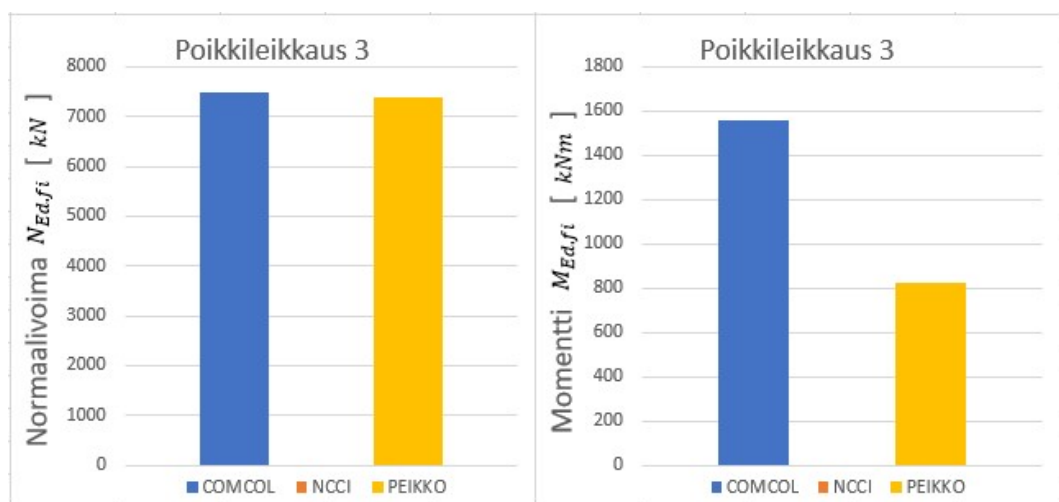
Taulukon 20 tuloksista voidaan todeta suhteellisten erojen kasvavan entisestään, mikä oli ihan odotettavissa sarjan 3 vertailuita tehdessä. Suomen kansallisen liitteen teknisen ohjeen NCCI:n- ja Peikon likimenetelmien voidaan todeta toimivan melko samalla tavoin myös paloluokkaa kasvatettaessa, sillä suhteelliset erot pysyvät samoissa luokissa.



Kuva 15. Poikkileikkauksen 1 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 16. Poikkileikkauksen 2 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 17. Poikkileikkauksen 3 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.

Kuvasta 17 nähdään, että Peikon työkalu toimii suurin piirtein samoilla suhteilla Comcoliin verrattuna kuin muillakin poikkileikkauksilla. Myös sarjan 1 kuva 12 on samanlainen sarjan 3 kuvan 17 kanssa.

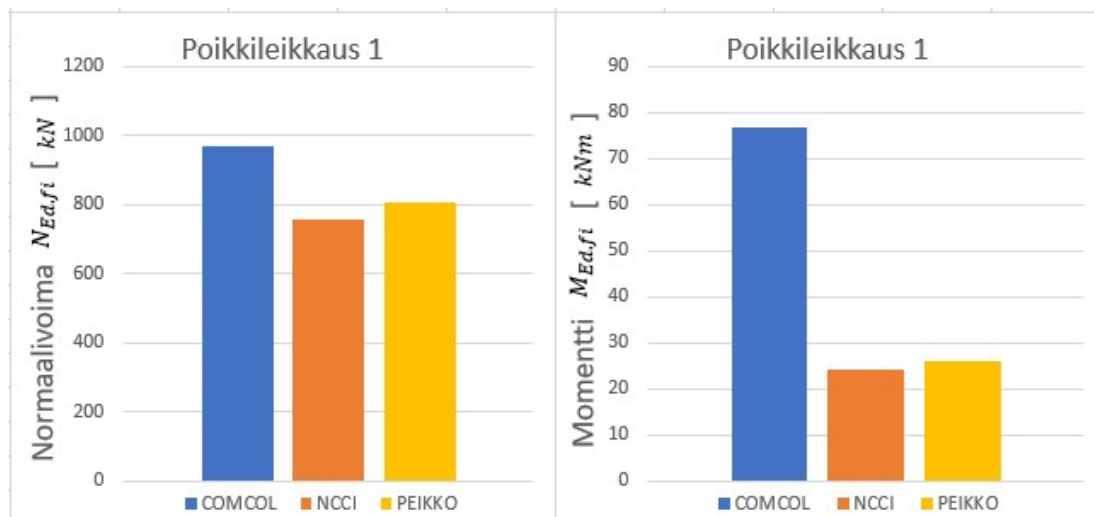
5.1.4 Sarja 4

Sarjan 4 poikkileikkausten 1, 2 ja 3 lähtöarvot ovat samat kuin sarjan 2 esitettyssä taulukossa 18. Sarjan 4 laskelmien paloluokka on R120 ja käytetty raudoitussuhde on 5%.

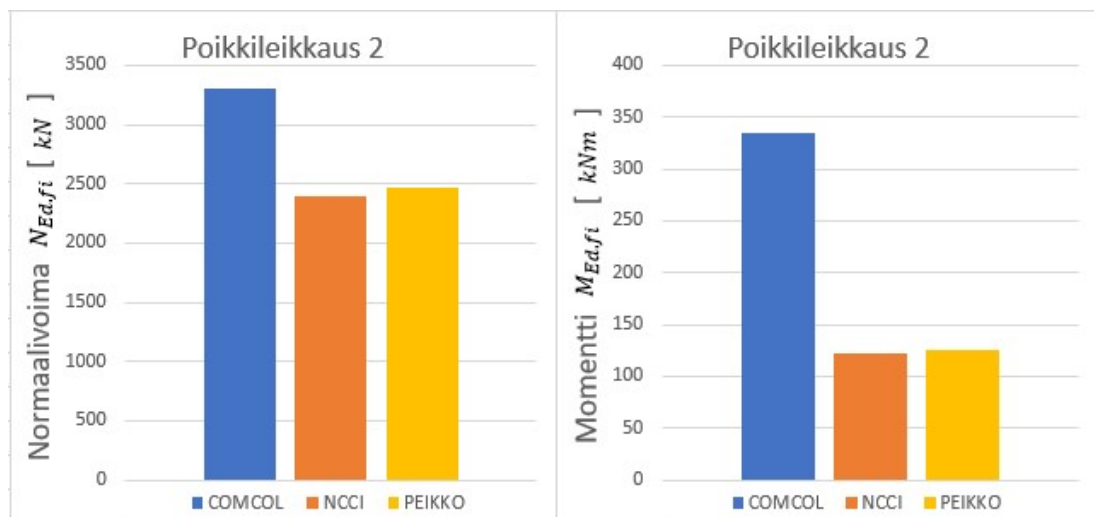
Taulukko 21. Laskentaohjelmilla saadut 100% käyttöasteet 2. kertaluvun huomioivan normaalivoiman ja sitä vastaava 1. kertaluvun taivutusmomentti palotilanteessa.

SARJA 4		Palotilanne					
		COMCOL		NCCI		PEIKKO	
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	
1	968	77	755	24	806	26	
2	3299	334	2392	122	2464	125	
3	12257	2574	0	0	0	0	
Suhteellinen ero							
		NCCI vs COMCOL		NCCI vs PEIKKO		PEIKKO vs COMCOL	
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	
1	22,0	68,8	6,3	7,7	16,7	66,2	
2	27,5	63,5	2,9	2,4	25,3	62,6	
3	-	-	-	-	-	-	

Taulukosta 21 huomataan NCCI:n ja Peikon tulosten olevan erittäin lähellä toisiaan. Tämä johtuu niissä käytettävästä likimenetelmästä, joka antaa reilusti varmalle puolelle jäävän tuloksen verrattuna Comcolin yleiseen menetelmään. Kuitenkin voidaan todeta, että menetelmä käyttäytyy oikein, kun tulos on varmalla puolella. Jos taas olisi toisinpäin, laskentamenetelmään ei voisi täysin luottaa, ellei tuloksia pystyttäisi jotenkin todentamaan oikeellisiksi.



Kuva 18. Poikkileikkauksen 1 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 19. Poikkileikkauksen 2 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.

Tämän luvun laskelmista jätettiin taas poikkileikkauksen 3 havainnollistava pylväsdiagrammi pois, koska Peikon laskentapohjalla ei pystytty kyseisen pilarin 5% raudoitussuhdetta määrittämään. Muuten tulokset näyttävät käyttäytyvän edellä esitettyjen tulosten mukaisesti, eikä suuria muutoksia havaittu. Taivutusmomenttien kuvista molempien poikkileikkausten osalta huomataan Comcolin tulosten olevan huomattavasti suurempia NCCI:n ja Peikon tuloksiin verrattuna. Tästä voi hyvin päätellä palomitoituksen epävarmuutta, kun normaalilämpötilassa erot ovat erittäin pienet.

5.2 Johtopäätökset

Näissä vertailulaskelmissa tarkasteltiin standardin SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukana julkaistun teknisen ohjeen NCCI:n likimenetelmää Rautaruukin kehittämään liittopilarin mitoitus työkaluun, joka käytti aiemmin luvussa 3 kohdassa 3.3 esitettyjä kehittyneitä laskentamalleja eli niin sanottua yleistä menetelmää. Toisena vertailutyökaluna oli Peikko Groupin kehittämä liittopilarin mitoitus Excel, joka oli omanlaisensa likimenetelmä ja sen toimivuus perustui Standardin EN 1994-1-2 mukaiseen yksinkertaiseen laskentamenetelmään.

Vertailut sisälsivät neljä eri sarjaa, joissa jokaisessa oli kolme poikkileikkausta. Jokaisessa sarjassa vaihtuivat raudoitussuhteen sekä paloluokan arvot, minkä avulla pystyttiin tarkastelemaan menetelmien käyttäytyminen ja saatiin myös varmuutta laskentamenetelmien toimivuudesta. Sarjojen välissä pyrittiin hieman analysoimaan menetelmien välisten erojen syitä. Isoimmat erot syntyivät Rautaruukin Comcol ohjelmistoon verrattuna, johon jo aiemmin sarjan 1 taulukoitujen tulosten alla perehdyttiin. Yleisen menetelmän poikkileikkauksen tarkan analysoinnin laskenta on erittäin haastava ja pitkä prosessi, mutta antaa paljon mahdollisuuksia pilarin valinnalle sekä raudoitukseksi.

Vertailulaskelmista huomattiin Peikon työkalun antamien tulosten olevan erittäin lähellä NCCI:n menetelmän laskelmia poikkileikkausten 1 ja 2 osalta. Peikon työkalusta huomattiin esimerkiksi sarjan 2 laskelmia suoritettaessa, että mitoitusohjelmaa ei ole varsinaisesti kehitetty poikkileikkauksen 3 suuruusluokkaa oleville pilareille. Tämä huomattiin, kun raudoitussuhteen arvoa oltiin korottamassa 5%:iin. Sarjan 1 ja 3 vertailuissa Peikon työkalu näytti toimivan samalla tavoin kuin muissakin pilarin eri kokoluokissa, joissa palotilanteen normaalivoiman suuruusluokka oli vielä verrattavissa Comcolin ohjelman kanssa, mutta palotilanteen taivutusmomentin arvo jäi turhankin varmalle puolelle.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella menetelmien toimivuutta ja tulosten eroja toisen kertaluvun aiheuttamasta momentin vaikutuksesta. Poikkileikkausten kestävyysien tarkastelu sekä yhteisvaikutuskuvaajien esittäminen ja niiden vertailu on

helppoa ja oikeastaan jokaisella menetelmällä niiden tulokset olivat toisiinsa verrattavissa. Likimenetelmien kaavoihin sijoitetun toisen kertaluvun arvioimista on voitu mieltää hieman epävarmaksi, mutta tämän luvun vertailulaskelmien perusteella huomattiin tulosten olevan varmalla puolella Comcoliin verrattuna, mikä oli hyvä asia.

6 A. ESPINOS'N MENETELMÄ

Opinnäytetyön kirjallisuustutkimukseen syvemmin perehdyttyäni tuli vastaan erittäin mielenkiintoinen tutkimus. Tutkimuksen aiheena oli Standardin SFS-EN 1994-1-2 palomitoituksen uusi menetelmä, joka käsitteli juuri minun aikaisempaa kysymystäni likimenetelmän laajentamisesta yli 510 mm suurille poikkileikkauksille. Standardin SFS-EN 1994-1-2 ja sen liitteen H menetelmä todettiin antavan liian hyviä tuloksia hoikille betonitäytteisille putkiliittopilareille. Tämän takia kutsuttiin koolle projekti-ryhmä, joka laati uuden menetelmän korvaten olemassa olevan liitteen H. Erittäin laaja ja kattava parametrinen tutkimus koostui 5046 tehdystä analyysistä eri tapauksille, jotka kattavat periaatteessa kaikki betonitäytteisten putkiliittopilarien käytännön soveltamisessa tarvittavat tapaukset. Kyseinen menetelmä ottaa huomioon pienet sekä suuret epäkeskisyydet neutraaliakselista, mutta kuitenkin epäkeskisyyden ollessa enintään $\frac{e}{D} = 1$. Myös toisen kertaluvun momentista aiheutuva hyvin vaikeasti mallinnettava kaksoiskaarevuus ja siitä muodostuvat erilaiset taivutusmomenttikaaviot on otettu tarkasteluissa huomioon. (Interaction diagram based method for fire resistance design of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns 2018, 3)

Betonitäytteiset putkiliittopilarit ovat erittäin houkutteleva rakenneratkaisu monissa suurissa kohteissa, mutta niiden käyttöä haittaavat turvallisen, tarkan ja laajasti sovellettavien likimenetelmien puute palomitoitukseen. Menetelmän avulla voidaan toteuttaa erittäin hoikkia pilareita, joilla on siitä huolimatta hyvä kuorman kantokyky. Liittopilarit ovat sellaisinaan esteettisesti hyvännäköisiä sekä myös arkkitehtien mieleen. Ne palvelevat hyvin myös työmaata, kun pilarit toimivat valutilanteessa muottina silloin työmaalta jää pois muottien purkutyö. Samalla saadaan pintakäsittelyä myöten

valmis rakenne. (Interaction diagram based method for fire resistance design of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns 2018, 6)

Standardin SFS-EN 1994-1-2 yksinkertaisten laskentamenetelmien puute johti Euroopan Standardointikomitean nimeämään projektiryhmän, jonka tarkoituksena oli kehittää uusi yksinkertainen laskentamenetelmä betonitäytteisille putkiliittopilareille palossa. Kyseinen tiimi valmisteli ennen tätä projektia hiili- ja terästudkimusrahaston rahoittaman tutkimusprojektin, jossa tärkeimpänä panoksena oli muuttaa palotilanteen epätasaisesti muuttuvien lämpötilojen vaikutukset poikkileikkauksessa vastaaviksi tasaisiksi lämpötiloiksi. Tämän tutkimusprojektin ansiosta uuden menetelmän poikkileikkausten lämpötilojen määrittämiset eri komponenteille helpottui. (Interaction diagram based method for fire resistance design of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns 2018, 7)

Hiili- ja teräsrachasto (RFCS) tukee tutkimus- ja innovaatiohankkeita hiili- ja teräsalalla. Yliopistoille, tutkimuskeskuksille ja yksityisille yrityksille annetaan vuosittain noin 40 miljoonaa euroa hankkeiden rahoittamiseen. (European Commission 2020)

Betonisisuksen ekvivalentti lämpötila $\theta_{c.eq}$ voidaan pyöreissä pilareissa arvioida putken leikkauskertoimen ja paloluokan funktiona lausekkeesta (26):

$$\theta_{c.eq} = 81.8 - 5.05 * t_{fi} + 0.003 * t_{fi}^2 - 15.07 * \frac{A_m}{V} + 0.3 \left(\frac{A_m}{V} \right)^2 - 0.88 * t_{fi} * \frac{A_m}{V} + 7.43 * t_{fi}^{0.842} * \left(\frac{A_m}{V} \right)^{0.714} \quad (26)$$

missä t_{fi} on rakenteelle määritetty paloluokan mukainen palonkesto-aika. $\frac{A_m}{V}$ on pilarin leikkauskerroin, joka saadaan kaavasta (27):

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\pi * D}{\frac{\pi}{4} * D^2} \quad (27)$$

Pyöreiden putkiprofiilien keskimääräinen lämpötila $\theta_{a.eq}$ saadaan kaavasta (28):

$$\theta_{a.eq} = -824.67 - 5.58 * t_{fi} + 0.007 * t_{fi}^2 - 0.01 * t_{fi} * \frac{A_m}{V} + 645.08 * t_{fi}^{0.269} * (A_m/V)^{0.017} \quad (28)$$

missä t_{fi} ja $\frac{A_m}{V}$ ovat samat kuin kaavassa (26).

Raudoitusten lämpötilat $\theta_{s.eq}$ pyöreissä liittopilareissa:

$$\theta_{s.eq} = \beta_3 * \left(\frac{t_{fi}}{u_s}\right)^3 + \beta_2 * \left(\frac{t_{fi}}{u_s}\right)^2 + \beta_1 * \left(\frac{t_{fi}}{u_s}\right) + \beta_0 \quad (29)$$

missä $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ovat taulukon 22 mukaisia arvoja, jotka määräytyvät pääterästen keskiöetäisyyden u_s mukaisesti.

Taulukko 22. Pyöreiden liittopilarien pääterästen keskiöetäisyyksiä vastaavat ekvivalentin lämpötilan kertoimet.

	u_s (mm)	β_3	β_2	β_1	β_0
CHS	20	7236.5	-10458	5497.6	19.38
	30	58714	-41328	10910	11.179
	35	0	-12732	6518	91.208
	50	0	-55639	13768	-19.897
	55	0	-43201	10790	24.229
	70	0	0	8858	96.676

Jäykkyyksien sovituskertoimet pyöreille rakenneputkille ja raudoitukselle saadaan kaavoista (30) ja (31). Betonin jäykkyyden sovituserroin $\varphi_{c,\theta}$ on 1.2, joka ei ole riippuvainen poikkileikkauksen koosta. Tämä valinta korostaa pilarin murtumistilanteessa taivutusjäykkyyden koostumisen pääsääntöisesti betonin ja raudoituksen osuuksista.

Raudoituksen lämpötiloja määritettäessä kaavan (29) ja taulukon 22 mukaan ei raudoitusten lämpötilat muutu poikkileikkauksen kasvaessa tai pienentyessä, mikä hieman itseäni mietitytti. Tässä opinnäytetyössä oletetaan taulukon 22 arvojen pätevän kaikille poikkileikkauksille koosta huolimatta. Yhtenä vaikuttavana tekijänä voisi olla taulukon käytön määrittäminen tietyille poikkileikkaukselle, jolloin jokaiselle pilari-koolle pitäisi olla oma taulukonsa. Mahdollisuutena on myös se, että raudoituksen lämpötilat kaavan (29) mukaan ovat niin suuria, että jäävät aina varmalle puolelle.

$$\text{Rakenneputki: } \varphi_{a,\theta} = 0.75 - 0.023 * \left(\frac{A_m}{V}\right) \quad (30)$$

$$\text{Betoniteräs: } \varphi_{s,\theta} = 0.8 - 0.002 * t_{fi} \quad (31)$$

Liittopilarien todellinen taivutusjäykkyys $EI_{eff,II,fi}$ toisen kertaluvun analyysin sekä kyseisten ekvivalenttien lämpötilojen mukaan edustaa pilarin globaalia käyttäytymistä huomioiden toisen asteen vaikutukset palossa. Menetelmässä käytetään samaa muotoa kuin standardin SFS-EN 1994-1-2 normaalilämpötilan taivutusjäykkyyden laskennassa, jolla voidaan ottaa huomioon korkeissa lämpötiloissa muuttuvat ominaisuudet erilaisin korjaus- ja sovituskertoimin. Efektiivinen taivutusjäykkyys $EI_{eff,II,fi}$ toisen kertaluvun analyysin perusteella palotilanteessa ilmaistaan seuraavasti:

$$EI_{eff,II,fi} = K_\theta * K_o * [\varphi_{a,\theta} * E_{a,\theta} * I_a + \varphi_{s,\theta} * E_{s,\theta} * I_s + K_{e,II} * \varphi_{c,\theta} * E_{c,\theta} * I_c] \quad (32)$$

missä $K_\theta = 0.9$, kun palonkesto-aika $t_{fi} \geq 60 \text{min}$. $K_o = 0.9$ on normaalilämpötilan suunnittelussa käytetty sovituskerronin ja $K_{e,II} = 0.5$ on korjauskerronin. (Interaction diagram based method for fire resistance design of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns 2018, 10)

6.1 Vertailulaskelmat

Vertaillaan seuraavaksi A. Espinos'n menetelmää luvussa 5 esitettyihin laskentamenetelmiin ja työkaluihin. Käytetään laskelmissa samoja arvoja sekä materiaaliominaisuuksia kuin luvun 5 vertailulaskelmissa. Luvussa 5 laskettiin sarjojen 1-4 saadut tu-

lokset ja päästiin vertailemaan raudoitussuhteen ja palonkestoluokan vaikutuksia laskentatyökalujen suhteellisiin eroihin. Tuloksista huomattiin erojen olevan melko pieniä NCCI:n ja Peikon menetelmien välillä, mutta Comcolin yleinen menetelmä antoi paljon suurempia kestävyksiä. Suoritetaan tämän kohdan vertailulaskelmissa tulokset ainoastaan sarjoille 1–3. Näin päästään vertailemaan raudoitussuhteen vaikutusta sekä myös paloluokan korotuksen vaikutusta pieneen raudoitusmäärään.

Sarjojen tuloksia esitettäessä taulukoissa on kaksi eri A. Espinos'n menetelmän arvoa poikkileikkausten 1, 2 ja 3 palotilanteen normaalivoimalle $N_{Ed.fi}$ ja taivutusmomentille $M_{Ed.fi}$. Nämä on erotettu toisistaan (1)A.Espinos ja (2)A.Espinos tavoin, jossa (1)A.Espinos kohdassa on laskettu taivutusjäykkyys samalla tavalla kuin NCCI:n menetelmässä kaavan (5) mukaisesti, jota myös Ana Espinos oli käyttänyt väitöskirjaa tehdessään ennen projektiryhmän laatimaa uutta menetelmää. (Espinos 2012) Myös uuden menetelmän raportissa oli taivutusjäykkyydelle esitetty sama kaava, mutta ainoastaan aksiaalikuormitetuille pilareille. Kohdan (2)A.Espinos alla on käytetty tulosten laskemisessa tutkimusryhmän aikaansaaman menetelmän todellisen taivutusjäykkyyden $EI_{eff.II.fi}$ arvoa aiemmin luvussa 6 esitettyä kaavan (32) mukaisesti.

Havainnollistavissa pylväsdiagrammeissa on esitetty A. Espinos'n menetelmän tulokset ainoastaan laskelmien (2)A.Espinos mukaisesti.

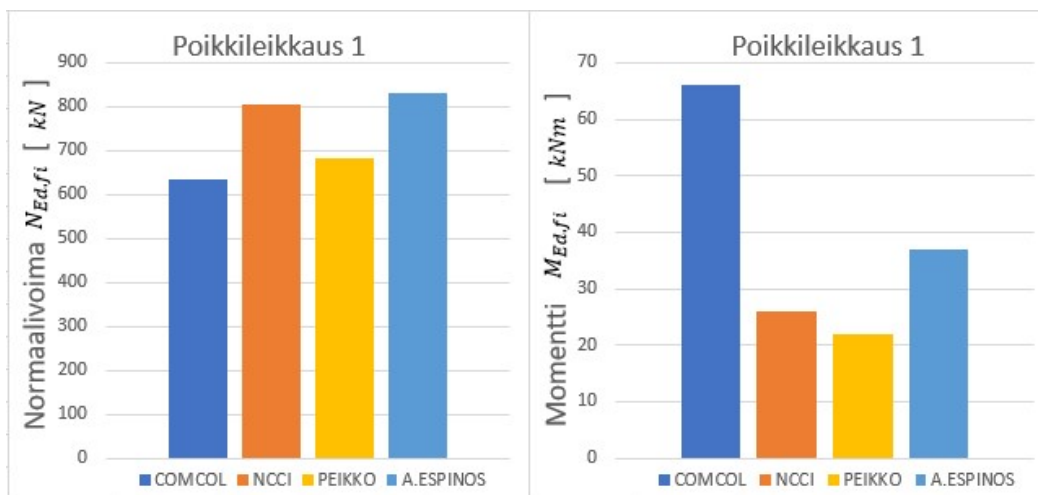
6.1.1 Sarja 1

Tämän kohdan sarjan 1 lähtötiedot ovat samat kuin luvun 5 kohdan 5.1.1 taulukossa 16 esitetyt arvot. Sarjan 1 laskelmissa käytetty paloluokka on R60 ja raudoitussuhde 2%. Tulokset ja niiden suhteelliset erot laskentatyökalujen välillä on esitetty taulukossa 23, josta voidaan tarkastella menetelmien prosentuaalisia eroja toisiinsa nähden. Kuvissa 20, 21 ja 22 on selkeytetty pylväsdiagrammeilla kyseisiä tuloksia.

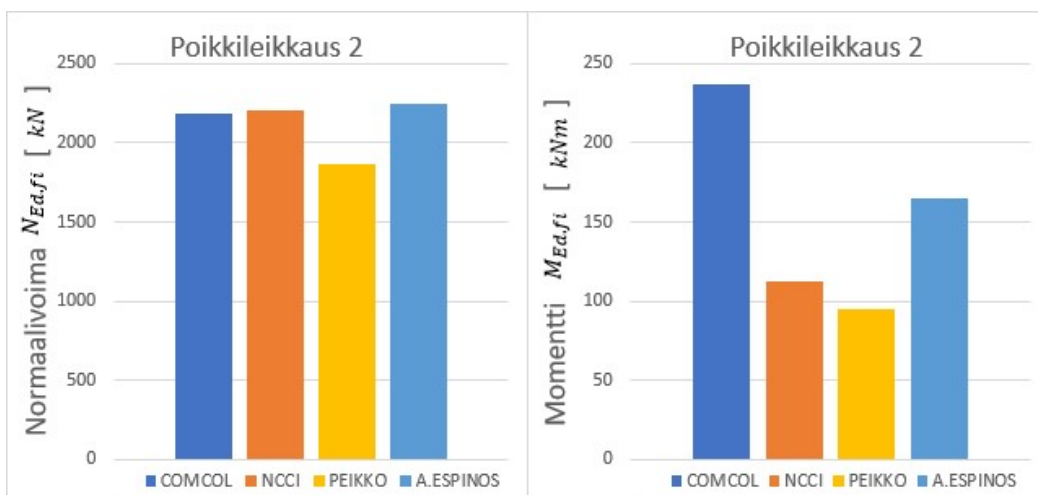
Taulukko 23. Laskentaohjelmilla saadut 100% käyttöasteet 2. kertaluvun huomioivan normaalivoiman ja sitä vastaava 1. kertaluvun taivutusmomentti palotilanteessa.

SARJA 1		Palotilanne									
		COMCOL		NCCI		PEIKKO		(1) A. ESPINOS		(2) A. ESPINOS	
Poikki leikkaus		$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]
1		633	66	804	26	683	22	810	39	833	37
2		2188	237	2211	112	1862	95	2177	174	2250	165
3		8740	1839	0	0	8413	855	9550	1612	9925	1514
		Suhteellinen ero									
		(1) A.ESPINOS vs COMCOL		(1) A.ESPINOS vs PEIKKO		(1) A.ESPINOS vs NCCI		(1) A.ESPINOS vs (2) A.ESPINOS		(2) A.ESPINOS vs COMCOL	
Poikki leikkaus		$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]
1		-28,0	40,9	-18,6	-77,3	-0,7	-50,0	2,8	-5,4	-31,6	43,9
2		0,5	26,6	-16,9	-83,2	1,5	-55,4	3,2	-5,5	-2,8	30,4
3		-9,3	12,3	-13,5	-88,5	-	-	3,8	-6,5	-13,6	17,7

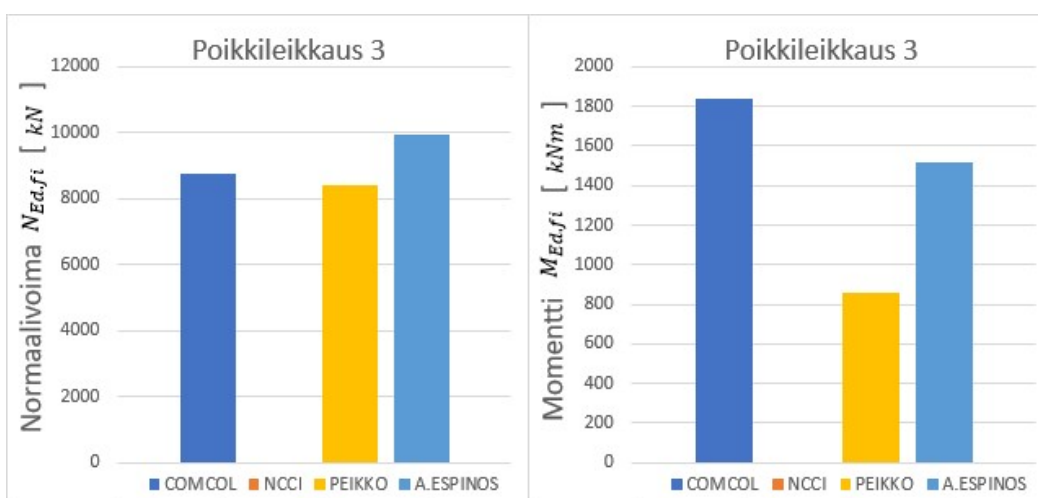
Taulukosta 23 huomataan A. Espinos'n menetelmän laskemien 1 ja 2 olevan erittäin lähellä toisiaan. Tästä voisi luulla, että taivutusjäykkyyksien antamat tulokset kaavojen (5) ja (31) eivät eroa juurikaan toisistaan, mutta näin ei ole. A. Espinos'n uuden menetelmän todellisen taivutusjäykkyyden $EI_{eff,II,fi}$ laskeminen kaavan (32) mukaan antaa todella paljon pienemmän arvon verrattuna kaavaan (5). Tämä vaikuttaa suuresti pilarin kriittiseen nurjahduskuormaan $N_{cr,eff,fi}$ palossa, joka taas vaikuttaa pilarin nurjahduspituuteen l_{θ} . Vaikka tulokset taulukossa 23 ovat erittäin lähellä toisiaan, niin pilareiden mitta on aivan eri. Laskelmissa (1)A.Espinos esimerkiksi poikkileikkauksen 2 pilarin korkeus L on 8,75m ja laskelmissa (2)A.Espinos pilarin korkeus on ainoastaan 6,77m, jolloin molempien tapausten muunnettu hoikkuus λ_{θ} taivutusjäykkyyksien ja kriittisen nurjahduskuorman tulosten perusteella on 1,5. Taulukosta 23 voidaan myös todeta, että poikkileikkauksen 1 ja 3 tulokset ovat palotilanteen normaalivoiman suhteen melko suuret verrattuna muhin menetelmiin, joiden arvot ovat lähellä toisiaan. Tämän sarjan perusteella ei vielä kannata sen suurempia johtopäätöksiä esittää vaan on hyvä tarkastella sarjan 2 ja 3 tulokset.



Kuva 20. Poikkileikkauksen 1 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 21. Poikkileikkauksen 2 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 22. Poikkileikkauksen 3 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.

6.1.2 Sarja 2

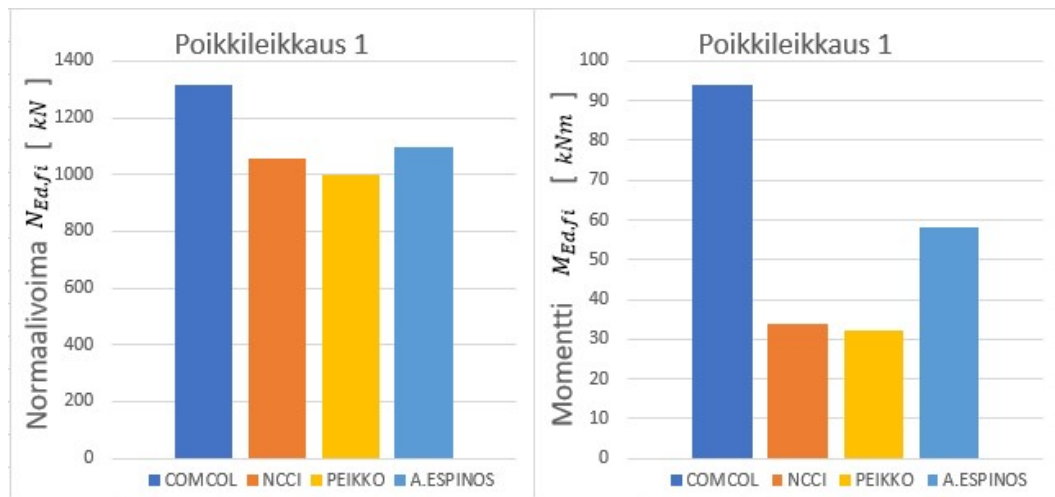
Sarja 2 lähtötiedot ovat samat kuin luvun 5 kohdan 5.1.2 taulukossa 18 esitetyt arvot. Tämän sarjan laskelmien paloluokka on R60 ja raudoitussuhde nostettiin 5%:iin. Taulukossa 24 on esitetty tulokset ja niiden suhteelliset erot.

Taulukko 24. Laskentaohjelmilla saadut 100% käyttöasteet 2. kertaluvun huomioivan normaalivoiman ja sitä vastaava 1. kertaluvun taivutusmomentti palotilanteessa.

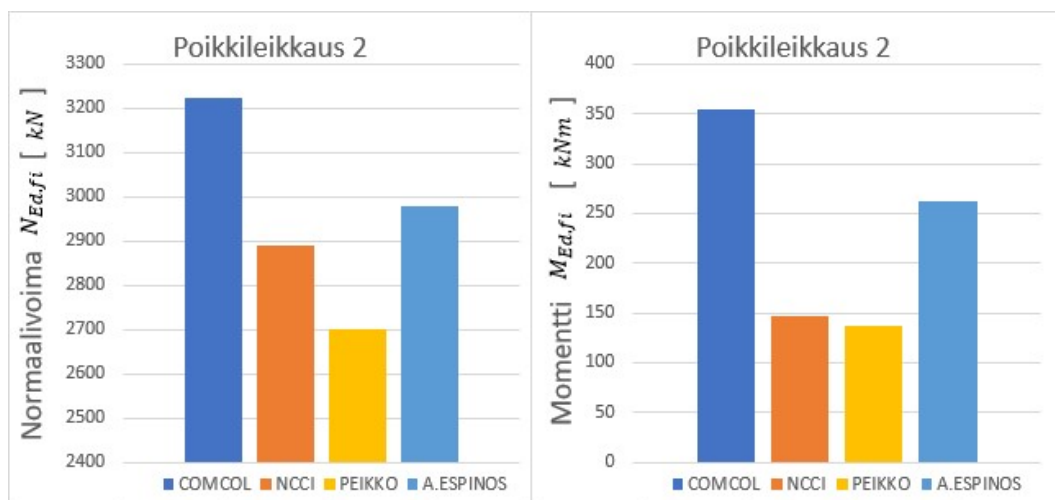
SARJA 2		Palotilanne									
		COMCOL		NCCI		PEIKKO		(1) A. ESPINOS		(2) A. ESPINOS	
Poikki leikkaus		$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]
1		1315	94	1054	34	997	32	1069	61	1097	58
2		3224	355	2889	147	2700	137	2892	278	2980	262
3		13182	2793	0	0	0	0	12190	2497	12635	2329
		Suhteellinen ero									
		(1) A.ESPINOS vs COMCOL		(1) A.ESPINOS vs PEIKKO		(1) A.ESPINOS vs NCCI		(1) A.ESPINOS vs (2) A.ESPINOS		(2) A.ESPINOS vs COMCOL	
Poikki leikkaus		$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]
1		18,7	35,1	-7,2	-90,6	-1,4	-79,4	2,6	-5,2	16,6	38,3
2		10,3	21,7	-7,1	-102,9	-0,1	-89,1	3,0	-6,1	7,6	26,2
3		7,5	10,6	-	-	-	-	3,5	-7,2	4,1	16,6

Nyt taulukosta 24 voidaan huomata A. Espinos'n menetelmän olevan erittäin lähellä muita laskentamenetelmiä. Voidaan myös huomata A. Espinos'n menetelmän antavan suurempia taivutusmomentin $M_{Ed,fi}$ arvoja kuin NCCI:n ja Peikon menetelmillä ottaen taas huomioon (2)A.Espinos laskelmien erittäin pienen taivutusjäykkyyden arvon, jonka vuoksi pilarin mitta on huomattavasti pienempi kuin muissa tapauksissa. Tämä muuttaakin aikaisemmin todetun mielipiteen NCCI:n ja Peikon menetelmien turhan paljon varmalle puolelle jäämisestä sekä kyseenalaistaa taas hieman Comcolin suuria kestävyys arvoja.

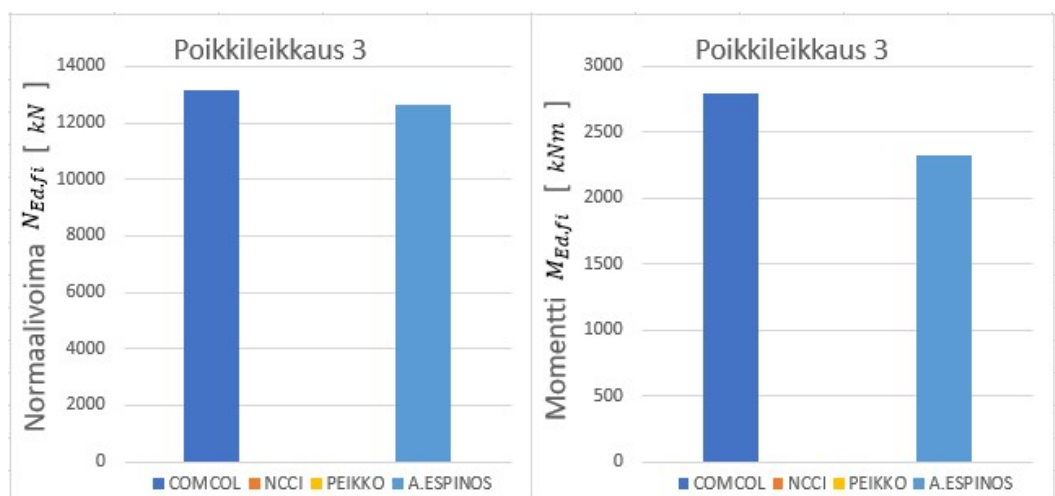
Alla olevissa kuvissa 23, 24 ja 25 huomataan hyvin (2)A.Espinos laskelmien antaman taivutusmomentin suuruuden verrattuna NCCI:n ja Peikon tuloksiin. A. Espinos'n menetelmän tulokset toimivat hieman samassa suhteessa Comcolin tulosten kanssa, eli normaalivoiman 2. kertaluvun huomioivan ja sitä vastaava 1. kertaluvun momentti on suhteessa suurempi NCCI:n ja Peikon tulosten kanssa.



Kuva 23. Poikkileikkauksen 1 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 24. Poikkileikkauksen 2 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 25. Poikkileikkauksen 3 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.

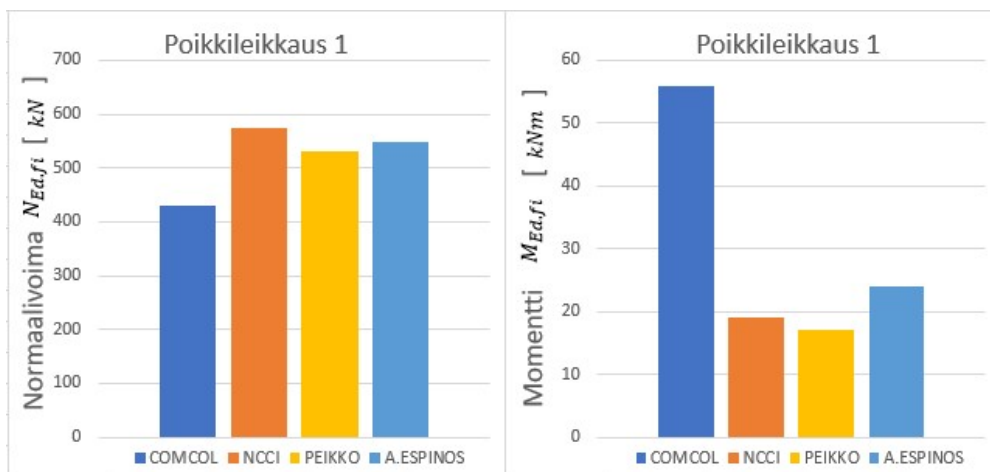
6.1.3 Sarja 3

Tämän kohdan sarjan 3 lähtötiedot ovat samat kuin luvun 5 kohdan 5.1.3 taulukossa 20 esitetyt arvot. Sarjan 3 laskelmissa käytetty paloluokka on R120 ja raudoitussuhde 2%. Tämän kohdan laskelmissa päästään tarkastelemaan A. Espinos'n menetelmän suhteellisia eroja nostettaessa paloluokkaa suuremmaksi sekä samalla pienennetään raudoituksen määrää. Taulukossa 25 on esitetty tulokset ja niiden suhteelliset erot.

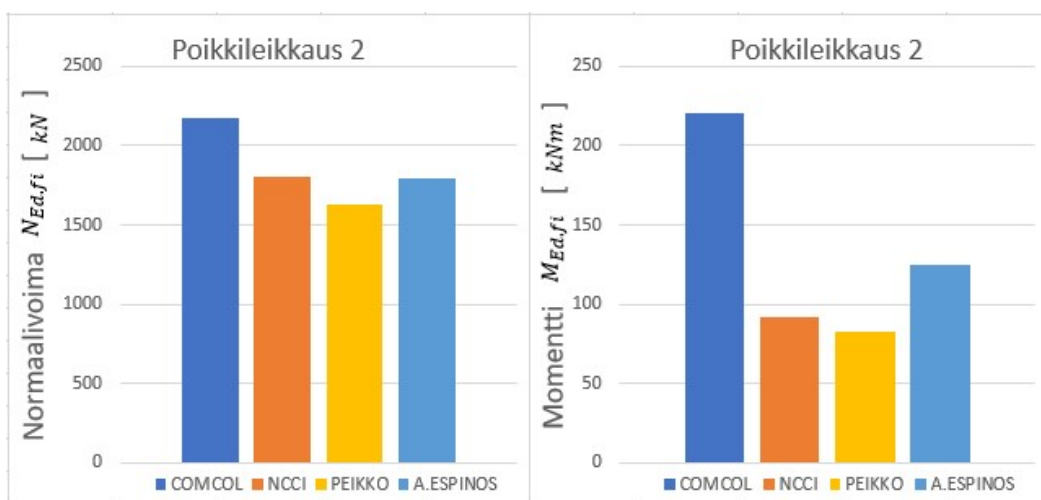
Taulukko 25. Laskentaohjelmilla saadut 100% käyttöasteet 2. kertaluvun huomioivan normaalivoiman ja sitä vastaava 1. kertaluvun taivutusmomentti palotilanteessa.

SARJA 3		Palotilanne									
		COMCOL		NCCI		PEIKKO		(1) A. ESPINOS		(2) A. ESPINOS	
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	$N_{Ed,fi}$ [kN]	$M_{Ed,fi}$ [kNm]	
1	430	56	574	19	530	17	539	24	549	24	
2	2178	221	1803	92	1626	83	1742	131	1793	125	
3	7489	1558	0	0	7380	825	8220	1360	8650	1272	
Suhteellinen ero											
		(1) A.ESPINOS vs COMCOL		(1) A.ESPINOS vs PEIKKO		(1) A.ESPINOS vs NCCI		(1) A.ESPINOS vs (2) A.ESPINOS		(2) A.ESPINOS vs COMCOL	
Poikki leikkaus	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	$N_{Ed,fi}$ [%]	$M_{Ed,fi}$ [%]	
1	-25,3	57,1	-1,7	-41,2	6,1	-26,3	1,8	0,0	-27,7	57,1	
2	20,0	40,7	-7,1	-57,8	3,4	-42,4	2,8	-4,8	17,7	43,4	
3	-9,8	12,7	-11,4	-64,8			5,0	-6,9	-15,5	18,4	

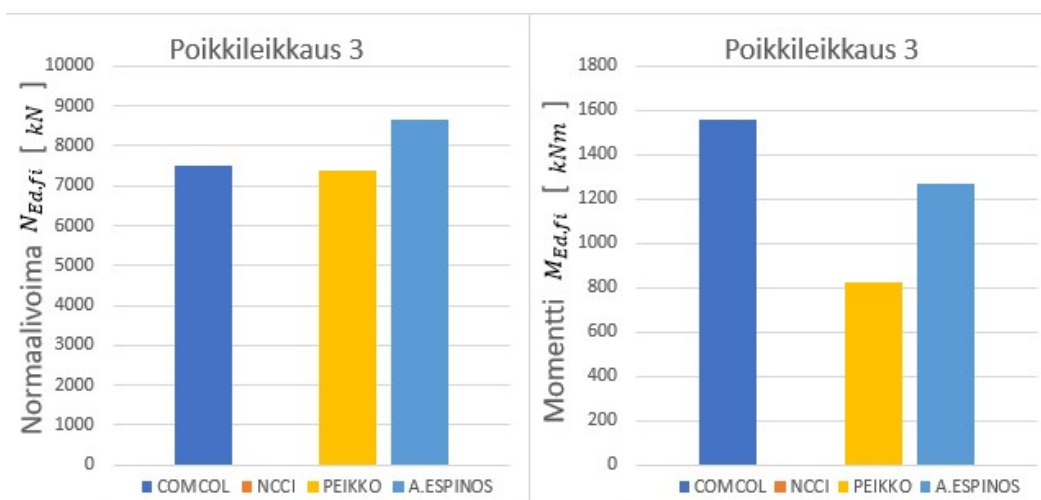
Kuten taulukosta 25 huomataan A. Espinos'n menetelmä toimii samoilla tavoin kuin aikaisemmissakin laskelmissa, vaikka paloluokkaa nostettiin. Täytyy edelleen muistaa, että vaikka tulokset ovat lähellä toisiaan, niin käytännön tilanteessa on suuriakin eroja. Esimerkiksi NCCI:n menetelmän laskelmien pilarin mitta L on paljon suurempi kuin (2)A. Espinos'n menetelmässä, eli suuri huomio kiinnittyy taivutusjäykkyyden laskennasta saatuihin pieniin lukuihin, jotka heijastuvat kriittisen nurjahduskuorman laskentaan. Pienen kriittisen nurjahduskuorman $N_{cr,eff,fi}$ myötä pilarin nurjahduspituus $L_{c,\theta}$ jää myös pieneksi, jolloin pilarin mitoituksessa käytettävä pituus on pienempi.



Kuva 26. Poikkileikkauksen 1 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 27. Poikkileikkauksen 2 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.



Kuva 28. Poikkileikkauksen 3 palotilanteen normaalivoima ja sitä vastaava toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti.

6.2 Johtopäätökset

Tämän luvun vertailulaskelmissa tarkasteltiin aiemmin esitetyn Espanjalaisen Ana Espinosin, yhdessä projektiryhmän kanssa kehittämää betonitäytteisen putkiliittopilarin palomitoituksen uutta laskentamenetelmää, joka korvasi aikaisemman liitteen H menetelmän ja perustui näin ollen myös Standardin SFS-EN 1994-1-2 mukaiseen yksinkertaiseen laskentamenetelmään. Vertailut sisälsivät aiemman luvun 5 kohdan 5.1 vertailulaskelmien sarjojen 1–3 lähtötiedot.

Laskelmien analysoinnin kannalta oli erittäin tärkeää sisäistää luvussa 5 kohdassa 5.1 esitetyt asiat. Niistä tärkeimpänä oli ymmärtää muunnetun hoikkuuden λ_θ arvo, jota likimenetelmien laskentaprosessissa käytettiin ja sen vaikutus käytännön suunnittelussa. (2)A.Espinos'n menetelmän taivutusjäykkyyden laskennassa kaavan (32) mukaan saadut arvot olivat paljon pienempiä kuin NCCI:n ja Peikon menetelmillä. Comcolin taivutusjäykkyyden arvoa ei niin helposti pystynyt vertaamaan A.Espinos'n menetelmän kanssa, koska yleisen menetelmän periaatteella taivutusjäykkyys lasketaan tarkasti, jolloin muunnetun hoikkuuden arvon laskeminen suoritetaan vain likimenetelmiä käytettäessä.

Tuloksista huomattiin A. Espinos'n menetelmän käyttäytyvän hieman eri tavoin kuin NCCI:n- ja Peikon menetelmien. Palotilanteen normaalivoimat $N_{Ed,fi}$ olivat melko lähellä toisiaan, kun taas sitä vastaavan toisen kertaluvun huomioon ottavan ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentin $M_{Ed,fi}$ arvo oli Comcolin menetelmän tapaan hieman suurempi. A.Espinos'n menetelmän taivutusjäykkyyden laskennassa normaalitilanteen mukaan kaavassa (32) käytettyjen korjaus- ja pienennyskertoimien myötä tulokset jäivät melko pieniksi. Tähän yhtenä suurena tekijänä oli kaavassa (32) käytettyjen sovituskertoimien φ_i arvot. Ne olivat pienempiä verrattuna Leskelän menetelmän vastaaviin taulukosta saatuihin arvoihin.

A.Espinos'n menetelmän avulla mitoitettaessa halkaisijaltaan yli puolen metrin suuruisia poikkileikkauksia herättivät pieniä epäilyksiä. Heidän omat polttokokeensa ovat tehty hoikille, mutta pienille poikkileikkauksille. Ymmärrettävästi polttouunien voimakapasiteetti ei riitä suurikokoisille koekappaleille. Menetelmän takana on erittäin laaja FEM-laskenta, jolla pystytään tarkastelemaan suurempien poikkileikkausten

käyttäytymistä palon aikana ja sitä kautta tutkimaan lämmön kehittymistä betonin ulkopinnasta ytimeen. Kokonaisuudessaan menetelmän takana on erittäin suuri määrä monien alan asiantuntijoiden panosta, millä on mahdollistettu yksinkertainen palomitoituksen tarkastelu myös suurten ja massiivisten liittopilarien osalta. Vertailulaskelmista voidaan todeta poikkileikkauksen 3 käyttäytyvän järkevästi ja antavan vertailukelpoisia tuloksia esimerkiksi Comcol liittopilariohjelman kanssa.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön päätavoitteena oli laatia selkeä kokonaisuus eurokoodin mukaiselle betonitäytteisten putkiliittopilarien palomitoitukselle ja vertailla standardin SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen soveltamisohjeen NCCI:n likimenetelmän toimivuutta Ruukin kehittämän Comcol ohjelmistoon sekä Peikko Groupin luomaan laskentatyökaluun. Yhtenä työn osana oli selvittää NCCI:n menetelmän laajentamismahdollisuudet halkaisijaltaan yli 510 mm suuriin poikkileikkauksiin. Tutkielman luvuissa 2–4 on pyritty esittämään kaikista keskeisimmät asiat betonitäytteisten putkiliittopilarien palomitoitukseen. Työssä on pääasiallisesti käsitelty enemmän käytännön kohteissa käytettyjä pyöreitä putkiprofiileja.

Luvuissa 5 ja 6 suoritettiin vertailulaskelmia työkalujen välillä, joiden avulla saatiin erittäin kattava määrä hyviä vertailukelpoisia tuloksia. Laskelmien perusteella voidaan Eurokoodi 4:n Suomen kansallisen liitteen soveltamisohjeen NCCI:n menetelmä todeta toimivaksi ja varmalle puolelle jääväksi, jos liittopilarin halkaisija ei ylitä 510 mm rajaa. Toisena vertailun kohteena oli Ana Espinosin väitöskirjassaan esittämä uusi palomitoitusmenetelmä, jossa on myös jo pohjat uudelle tulevalle Eurokoodi 4:n kansalliselle liitteelle. Tämän laskentamenetelmän taivutusjäykkyuden $EI_{eff.II.fi}$ laskennassa huomattiin suuria eroja verrattuna NCCI:n ja Peikon menetelmiin. Taivutusjäykkyudet olivat huomattavasti pienempiä, millä oli suuri vaikutus kriittisen nurjahduskuorman laskentaan ja tämän myötä pilarin sallittuun nurjahduspituuteen. Edellä mainittujen asioiden summana pilarin pituus jäi todella lyhyeksi, mikä sai taas epäilemään Comcolin suuria kestävyysarvoja sekä siihen vaikuttavia materiaaliominaisuuksia.

Liitteessä 1 on esimerkki Standardin SFS-EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukana julkaistun teknisen ohjeen NCCI:n menetelmän kestävyysmitoituksesta palotilanteessa sarjan 1 poikkileikkauksen 2 lähtötietojen mukaan. Liitteessä 2 on A. Espinos'n menetelmän mukainen kestävyyslaskenta palotilanteessa samalle poikkileikkaukselle.

7.1 Tavoitteiden saavuttaminen

Tässä opinnäytetyössä tehtiin laaja vertailu edellä mainittujen laskentatyökalujen välillä. Vertailulaskelmien selkeä esitystapa osoittautui ennakoitua hankalammaksi, kun kourallinen menetelmiä sekä suuri määrä muuttuvia arvoja pyöriteltiin samanaikaisesti etsien jatkuvasti eroavaisuuksia toinen toistensa välillä. Siitä huolimatta mielestäni näiden asioiden kokoamisessa yhdeksi kattavaksi kokonaisuudeksi onnistuttiin. Työssä pystyttiin mielestäni hyvin ilmaisemaan betonitäyhteisten liittopilarien palomitoituksen tärkeys ja osoittamaan toisesta kertaluvusta aiheutuvan taivutusmomentin vaikutus mitoitukseen. Pilari, joka kestää normaalilämpötilassa hienosti, voi palotilanteessa toisen kertaluvun vaikutuksista muuttua erittäinkin kriittiseksi rakenteeksi varsinkin nivelellisesti päistään tuettuna. Tämä asia suunnittelijoiden keskuudessa ei todellakaan ole itsestäänselvyys ja usein suhtautuminen jopa kriittisiä rakennemalleja mitoitettaessa voi olla vähintäänkin huolimaton.

Opinnäytetyön kokonaisuus saatiin pidettyä alkuperäiseen rajaukseen nähden hyvin aiheessaan. Liittorakenteista on tehty aiemmin hyviä diplomitöitä, joissa käsitellään liittolaattojen, -palkkien sekä -pilareiden kokonaisuutta erittäin laajasti, mutta näistä kaikista tärkeimpänä on palomitoituksen tarkastelu, joka yleensä nousee määrääväksi tekijäksi. Tämä työ rajautui ainoastaan liittopilareihin ja niiden palomitoitukseen, joka saatiin raportin aikana melko hyvin esitettyä. Normaalilämpötilan mitoittamiseen liittopilareiden osalta, jokaisessa suunnittelutoimistossa on varmasti monta hyvää ja toimivaa laskentapohjaa. Esimerkiksi Comcol ohjelmistolla mitoitettaessa normaalilämpötilassa kriittisiä rakenteita kestävyyskannalta ongelmia ei ole, mutta palomitoituksen seurauksena rakenne ei välttämättä kestä ja tämä on hyvä huomio jokaisen suunnittelijan omaksua.

7.2 Jatkotutkimustarpeet

Tässä opinnäytetyössä tehty tutkimus vaatii vielä jatkotutkimustoimenpiteitä. Työssä käsiteltiin oikeastaan pelkästään pyöreitä poikkileikkauksia, mikä oli vertailulaskelmien kannalta välttämätöntä. Ne ovat kuitenkin käytännön suunnittelussa tärkeämpi osa-alue. Neliöpoikkileikkauksilla ei pystytä saavuttamaan samaa suuruusluokkaa olevia pilareita kuin pyöreillä. Työssä esitetyt kaavat joidenkin osalta ovat hieman erilaisia neliöpilareilla, jolloin tämän opinnäytetyön perusteella ei mahdollisesti pysty neliöpoikkileikkausta mitoittamaan.

Rautaruukin kehittämän Comcol ohjelmiston varmuustason epäilykset nousivat A.Espinos'n menetelmän vertailulaskelmien aikana. Taivutusjäykkyyden pienet arvot saivat miettimään Comcol ohjelmiston määrittämiä poikkileikkauksen lämpötiloja. Comcolin suuret kestävyysarvot olivat ensimmäisissä vertailulaskelmissa selitettävissä sillä, että yleisen menetelmän tarkka rakenteen analysointi mahdollistaa suuremmat normaalivoiman ja taivutusmomentin kuormitukset. Tämä pitää kyllä paikkansa, mutta tulosten suurien erojen myötä sekä A.Espinos'n menetelmän pienten taivutusjäykkyyksien arvojen takia epäilykset heräsivät.

Luvussa 6 käsiteltiin espanjalaisen Ana Espinosin kehittämää liittopilarin palomitoitusmenetelmää. Menetelmä kokonaisuudessaan vaikuttaa hyvältä, mutta muutamia tutkimuksen kohteita siitä löytyy. Raudoitusten lämpötiloja määritettäessä taulukkoa 22 apuna käyttäen, terästen lämpötila ei ole riippuvainen pilarin koosta. Tällöin terästen lämpötila ei muutu esimerkiksi D323,9 verrattuna D508 halkaisijaltaan olevilla pilareilla, kun suojaetäisyys on sama. Terästen lämpötilat $D = 323,9$ ja siitä ylöspäin olevilla pilareilla ovat melko samat kuin NCCI:n menetelmässä käytettyjen taulukoiden 4 ja 5 arvot, kun taas pienempiin poikkileikkauksiin mentäessä lämpötilat nousevat ja silloin vaikutukset ovat negatiiviset mitoitusprosessissa. Luvun 6 menetelmää pitäisi myös vielä vertailla taivutusjäykkyyksien suhteen sekä tarkastella todelliset eroavaisuudet poikkileikkausten kestävyyksille käyttäen samanpituisia pilareita, jolloin erot olisivat todennäköisesti melko suuret.

LÄHTEET

Betoniteollisuus ry. 2010. Eurokoodilla mitoittavia laskentapohjia suunnittelijoiden ja oppilaitosten käyttöön. Betoni 3. 58-61.

Betoniteollisuuden www-sivut. 2020. Viitattu 20.2.2020. <http://www.betoni.com>

European Commission www-sivut. 2020. Viitattu 4.4.2020. <http://www.ec.europa.eu>

Espinos, A. 2012. Numerical analysis of the fire resistance of circular and elliptical slender concrete filled tubular columns. Väitöskirja. Universitat Politècnica de València.

Heiskanen, A. 2008. Palosuojaamattomien betonitäytteisten putkiliittopilarien palonkestävyys ranskalaisen menetelmän mukaan. AMK-opinnäytetyö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Viitattu 24.2.2020.

Hietanen, T. 2009. Betoniteräkset, Tiedote. Betonikeskus ry. Helsinki

Interaction diagram based method for fire resistance design of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns. 2018. ResearchGate 07/2018. <http://www.researchgate.net>

Innos, T. 2019. Betonitäyteen teräsputkiprofiilin rakenteellinen toiminta palossa ja kestävyysien vertailu hiili- ja ruostumattomalla teräsprofiililla. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Viitattu 19.2.2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201908303065>

Juvonen, J. 2014. Teräsbetoni- ja liittopilarin palomitoitus R180 luokkaan eurokoodien mukaisesti. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 21.2.2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201401021004>

Kielenniva, K. 2017. Pyöreän Betoni-teräs-liittopilarin suunnittelu ja mitoitus murtorajatilassa ja palotilanteessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 17.3.2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201708241786>

Kiviniemi, S. 2019. Pyöreän betoni-teräslittopoikkileikkauksen kestävyden mitoitus taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuskuvaajan avulla. AMK-opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Viitattu 10.2.2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201905057631>

Lahdenmaa, J. 2019. Teräsrakenteet 1. Luento 1, Teräksen materiaaliominaisuuksia 1/2019.

Leskelä, M. Tekniikan tohtori, SFS-EN 1994-1-2 NA soveltamisohjeen NCCI vastuhenkilö. Julkaisematon sähköpostikeskustelu. Lähetetty 16.3.2020 klo 16.03. Viitattu 17.3.2020

Peikko Group Oy. 2017. Behaviour and design of steel-concrete composite structures. Lahti: Peikko Group Oy.

Peltomaa, M. 2009. Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 19.2.2020.

Rautaruukki Oy. 2000. SteelComp-liittopilari, Tuoteseloste. Vantaa: Rautaruukki Oy

Rautaruukki Oy & Fundia betoniteräkset Oy. 1999. Comcol, Käyttöohje. Vantaa: JP-Kakko Oy.

SFS-EN 1992-1-2. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. 2005. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki: SFS.

SFS-EN 1993-1-2. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. 2005. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki: SFS.

SFS-EN 1994-1-1. Eurokoodi 4: Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2005. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki: SFS.

SFS-EN 1994-1-2. Eurokoodi 4: Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. 2006. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki: SFS.

SFS-EN 1994-1-2. Eurokoodi 4: Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus. 2014. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki: SFS. Viitattu 4.3.2020. <http://www.sfs.fi>

SFS-EN 1994-1-2 NA. Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1994-1-2. 2016. Ympäristöministeriö. Helsinki: YM.

SFS Terässtandardiesite. Terässtandardit. 2019. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.

Siikanen, U. 2009. Rakennusaineoppi. Helsinki: Rakennustieto Oy

Soivio, J. Diplomi-insinööri, tutkimus ja kehitysinsinööri, Peikko Group, Lahti. Julkaisematon sähköpostikeskustelu. Lähetetty 21.2.2020 klo 12.14. Viitattu 17.3.2020

Suomen Betoniyhdistys ry. 1995. Normikortisto, Teräs-betoni -liittopilarin mitoitus 2. kertaluvun teoriolla. Helsinki: BY

Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry. 2012. Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 4 -oppikirja BY 58. Helsinki: BY & TRY.

Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry. 1988. BY26 Liittorakenteet, Suunnitteluohjeet 1988. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy

Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry. 1991. BY36 Liittorakenteiden sovellusohjeet 1991. Jyväskylä: Suomen Betonitieto Oy

Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry. 2013. EC4 Liittorakenteet. Luentomoniste Helsingin messukeskuksen liittorakenteiden kurssi 18.-19.9.2013.

Suomen RakMK B4. 2005. Betonirakenteet. Määräykset ja ohjeet 2005. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto ja rakennusosasto.

Teräsrakenneyhdistys ry. 2004. Betonitäyteen teräsluotopilarin suunnitteluohje. Helsinki: TRY.

Teräsrakenneyhdistys ry. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 -oppikirja. Helsinki: TRY.

LIITE 1: PYÖREÄN BETONITÄYTTEISEN PUTKILIITTOPILARIN
PALOMITOITUS NCCI MENETELMÄN MUKAISESTI,
NIVELELLINEN PERUSTULIITOS

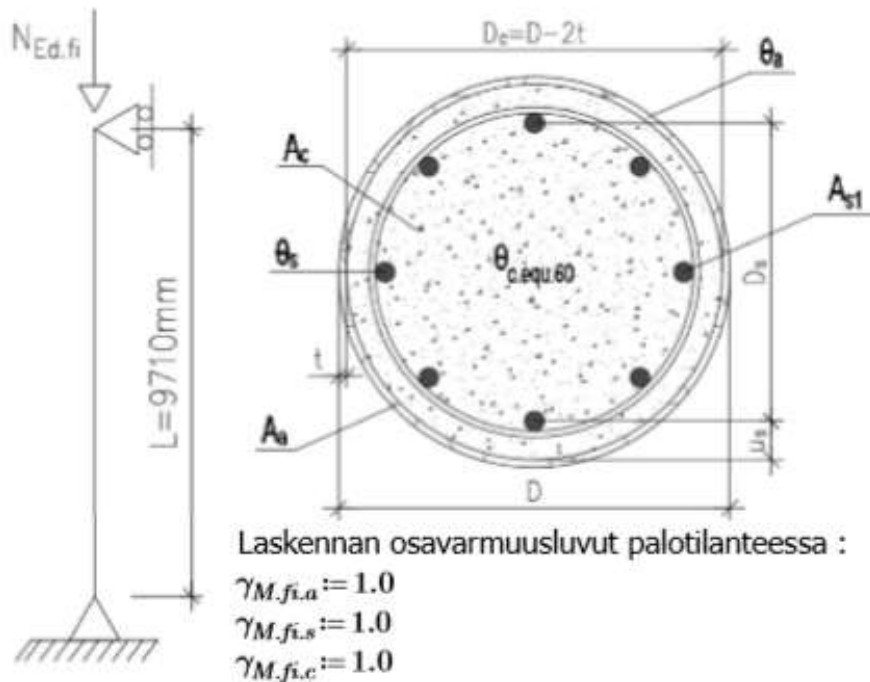
Laskennan lähtötiedot

Mitoitetaan pyöreä betonitäytteinen putkiliittopilari palotilanteessa standardin EN 1994-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukana julkaistun sovellusohjeen NCCI:n menetelmän mukaisesti. Laskenta on sama kuin luvun 5 vertailulaskelmien kohdan 5.1.1 Sarjan 1 suoritettujen laskelmat poikkileikkauksesta 2. Laskelmissa on haettu 100% käytöaste palonaikaiselle puristuksen ja momentin yhteisvaikutuskestävyydelle.

Lähtötiedot ovat seuraavat:

- Palonkestoluokka R60
- Pilarin pituus on 9710mm, joka tulee muunnetun hoikkuuden arvosta 1,5
- Poikkileikkauksen halkaisija D on 508mm
- Rakenneputken seinämävahvuus t on 10mm
- Teräslaatu S355
- Betonilaatu C35/45
- Betoniterälaji B500B
- Raudoituksen keskiöetäisyys rakenneputken sisäpinnasta u_s on 50mm
- Raudoituksen halkaisija on 25mm
- Raudoitusmäärä n_s on 8kpl, jolloin raudoitussuhde on 2,1%
- Pilarin muunnettu hoikkuus on 1,5
- Normaalivoiman epäkeskisyys on 10% eli 50,8mm

Palotilanteen mitoituskuorma : $N_{Ed,fi} := 2211 \text{ kN}$



Lähtötiedot :

Paloluokka : R60

Pilarin halkaisija : $D := 508 \text{ mm}$

Rakenneputken seinämävahvuus : $t := 10 \text{ mm}$

Raudituksen keskiöetäisyys putken sisäpinnasta : $u_s := 50 \text{ mm}$

Terästen lukumäärä : $n_s := 8$

Betoniteräksen halkaisija : $\phi := 25 \text{ mm}$

Muut tiedot :

Betonilaatu C35/45 : $f_{ck} := 35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Teräslaatu S355 : $f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Betoniteräslaatu B500B : $f_{sk} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Rakenneputken sisähalkaisija : $D_c := D - 2 \cdot t = 488 \text{ mm}$

Pääterästen välinen keskiöetäisyys : $D_s := D_c - 2 \cdot u_s = 388 \text{ mm}$

Yhden teräksen pinta-ala : $A_{s1} := \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$

Palotilanteen mitoituskuormat :

Palotilanteen normaalivoima : $N_{Ed,fi} = 2211 \text{ kN}$

Palotilanteen ensimmäisen
kertaluvun momentti :

$$M_{Ed,fi} := 0.1 \cdot D \cdot N_{Ed,fi} = 112.319 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Rakenneputken poikkileikkausarvot :

Pyöreään rakenneputken ala : $A_a := \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_c^2) = (1.565 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$

Pyöreään rakenneputken neliömomentti : $I_a := \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - D_c^4) = (4.852 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$

Pyöreään rakenneputken plastinen taivutusvastus : $W_{pa} := \frac{D^3}{6} - \frac{D_c^3}{6} = (2.48 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$

Betoniteräksen poikkileikkausarvot :

Raudoituksen yhteispinta-ala : $A_s := A_{s1} \cdot n_s = (3.927 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$

Raudoituksen neliömomentti : $I_s := \frac{n_s}{8} \cdot D_s^2 \cdot A_{s1} = (7.39 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$

Raudoituksen plastinen taivutusvastus : $W_{ps} := 1.7 \cdot n_s \cdot D_s \cdot \frac{A_{s1}}{6} = (4.317 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$

Betonin poikkileikkausarvot :

Betonin poikkileikkausala : $A_c := \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} - A_s = (1.831 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$

Halkeilemattoman betonin neliömomentti : $I_c := \frac{\pi}{64} \cdot D_c^4 - I_s = (2.71 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

Halkeilemattoman betonin plastinen taivutusvastus : $W_{pc} := 0.167 \cdot D_c^3 - W_{ps} = (1.898 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$

Raudoitussuhde : $\rho_s := \frac{A_s}{A_c} \cdot 100 = 2.145 \text{ \%}$

Palotilanteen neliömomentit :

Pyöreään rakenneputken neliömomentti palotilanteessa : $I_{a,\theta} := I_a = (4.852 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$

Raudoituksen neliömomentti palotilanteessa : $I_{s,\theta} := I_s = (7.39 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$

Betonin neliömomentti palotilanteessa : $I_{c,\theta} := I_c = (2.71 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$

MATERIAALI : RAKENNETERÄS

Kimmokerroin : $E_a := 210 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Pyöreiden putkiprofiilien keskimääräinen lämpötila θ_a °C ulkohalkaisijan D funktiona :

$$\theta_a := 820 + 4.18 \cdot \sqrt{510 - \frac{D}{\text{mm}}} = 825.911 \text{ °C} \quad \text{kun } \rightarrow \quad 165 \text{ mm} \leq D \leq 510 \text{ mm}$$

Rakenneteräksen materiaaliominaisuuksien pienennyskertoimet :

$$k_{ya,\theta} := 0.09705$$

$$k_{Ea,\theta} := 0.08417$$

$$\text{Palotilanteen lujuus : } f_{ya,\theta} := k_{ya,\theta} \cdot f_y = 34.453 \frac{N}{mm^2}$$

MATERIAALI : BETONI

Betonipoikkileikkauksen ekvivalentti lämpötila pyöreissä pilareissa voidaan arvioida putken ulkohalkaisijan D funktiona lausekkeesta :

$$\theta_{c,eqn.60} := \frac{16300}{\left(\frac{D}{mm}\right)^{0.66}} = 266.881 \text{ } ^\circ C \quad \text{kun } \rightarrow \quad 135 \text{ mm} \leq D \leq 510 \text{ mm}$$

Betonin materiaaliominaisuuksien pienennyskertoimet :

$$k_{c,\theta} := 0.8831$$

$$k_{Ec,\theta} := 0.3464$$

$$\text{Palotilanteen lujuus : } f_{c,\theta} := k_{c,\theta} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{M,fc}} = 30.909 \frac{N}{mm^2}$$

MATERIAALI : BETONITERÄS

$$\text{Kimmokerroin : } E_s := 210 \cdot 10^3 \frac{N}{mm^2}$$

Raudituksen lämpötilat θ_s $^\circ C$ pyöreissä liittopilareissa kun $u_s = 50$ mm :

$$\theta_s := 270 \text{ } ^\circ C$$

Betoniteräksen materiaaliominaisuuksien pienennyskertoimet :

$$k_{ys,\theta} := 1.0$$

$$k_{Es,\theta} := 0.83$$

$$\varepsilon_{c1} := 0.0025$$

$$\text{Palotilanteen lujuus : } f_{ys,\theta} := k_{ys,\theta} \cdot f_{sk} = 500 \frac{N}{mm^2}$$

Jäykkyyden sovituskerroimet :

$$\varphi_{a,\theta} := 0.70 \quad | \quad \varphi_{s,\theta} := 1.0 \quad | \quad \varphi_{c,\theta} := 1.2$$

PALONAIKAINEN TEHOLLINEN TAIVUTUSJÄYKKYYS

Liittopilarin palonaikainen tehollinen taivutusjäykkyys lasketaan eri rakenneosille EN 1994-1-2 kohdan 4.3.5.1(5) mukaan seuraavasti :

Rakenneputki : $EI_{a,\theta} := k_{Ea,\theta} \cdot E_a \cdot I_a = 8.576 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$

Raudoitus : $EI_{s,\theta} := k_{Es,\theta} \cdot E_s \cdot I_s = 12.88 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$

Betoni : $EI_{c,\theta} := k_{Ec,\theta} \cdot \frac{f_{ck}}{\epsilon_{c1}} \cdot I_c = 13.142 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$

Liittopilarin palomitoitus puristettuna sauvana edellyttää pilaripoikkileikkauksen tehollisen taivutusjäykkyyden $EI_{eff,fi}$ arvioimista. EN 1994-1-2 kohdassa 4.3.5.1(5) esitetyn periaatteen mukaisesti :

$$EI_{eff,fi} := \varphi_{a,\theta} \cdot EI_{a,\theta} + \varphi_{s,\theta} \cdot EI_{s,\theta} + \varphi_{c,\theta} \cdot EI_{c,\theta} = 34.655 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

PALONAIKAINEN PURISTUSKESTÄVYYS

Rakenneputki : $N_{a,Rd,fi} := k_{ya,\theta} \cdot \frac{f_y \cdot A_a}{\gamma_{M,fi,a}} = 539.018 \text{ kN}$

Raudoitukset : $N_{s,Rd,fi} := k_{ys,\theta} \cdot \frac{f_{sk} \cdot A_s}{\gamma_{M,fi,s}} = (1.963 \cdot 10^3) \text{ kN}$

Betoni : $N_{c,Rd,fi} := k_{c,\theta} \cdot \frac{f_{ck} \cdot A_c}{\gamma_{M,fi,c}} = 5659.682 \text{ kN}$

Pilaripoikkileikkauksen puristuskestävyys lasketaan summamalla poikkileikkauksen jokaisen tehollisen alkion kestävyys :

Rakenteen palonaikainen kokonaispuristuskestävyys :

$$N_{pt,Rd,fi} := N_{a,Rd,fi} + N_{s,Rd,fi} + N_{c,Rd,fi} = 8162.196 \text{ kN}$$

PALONAIKAINEN TAIVUTUSKESTÄVYYS

Suurin taivutuskestävyys epäkeskisellä normaalivoimalla :

$$M_{max.Rd.fi} := \left(W_{pa} \cdot \frac{k_{ya,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{M.fi,a}} \right) + \left(W_{ps} \cdot \frac{k_{ys,\theta} \cdot f_{sk}}{\gamma_{M.fi,s}} \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot W_{pc} \cdot \frac{k_{c,\theta} \cdot f_{ck}}{\gamma_{M.fi,c}} \right) = 594.57 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Neutraaliakselin etäisyys massakeskipisteestä :

$$D_{n.fi} := \frac{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{k_{c,\theta} \cdot f_{ck}}{\gamma_{M.fi,c}} \cdot D_c^2}{2 \cdot D \cdot \frac{k_{c,\theta} \cdot f_{ck}}{\gamma_{M.fi,c}} + 4 \cdot t \cdot \left(2 \cdot \frac{k_{ya,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{M.fi,a}} - \frac{k_{c,\theta} \cdot f_{ck}}{\gamma_{M.fi,c}} \right)} = 175.594 \text{ mm}$$

Betonin taivutusvastus $2 D_n$ alueella :

$$W_{pen.fi} := D_c \cdot D_{n.fi}^2 = (1.505 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

Rakenneteräksen taivutusvastus $2 D_n$ alueella :

$$W_{pan.fi} := 2 \cdot t \cdot D_{n.fi}^2 = (6.167 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

Rakenteen taivutuskestävyys $2 D_n$ alueella :

$$M_{n.Rd.fi} := W_{pan.fi} \cdot \frac{k_{ya,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{M.fi,a}} + W_{pen.fi} \cdot \frac{k_{c,\theta} \cdot f_{ck}}{2} = 253.78 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Rakenteen plastinen taivutuskestävyys :

$$M_{pl.Rd.fi} := M_{max.Rd.fi} - M_{n.Rd.fi} = 340.791 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

PALONAIKAINEN NURJAHDUSKESTÄVYYS

Palonaikainen dimensioton hoikkuus :

$$\lambda_{\theta} := 1.5 \quad \text{Muunnettu hoikkuus rajoitetaan siten, että } \lambda_{\theta} \leq 2 \quad \Rightarrow \text{OK}$$

Pilarin puristuskestävyys, kun rakenteiden palonaikaiset osavarmuusluvut ovat ykkösiä :

$$N_{pl,Rd,fi} := N_{a,Rd,fi} \cdot \gamma_{M,fi,a} + N_{s,Rd,fi} \cdot \gamma_{M,fi,s} + N_{c,Rd,fi} \cdot \gamma_{M,fi,c} = 8162.196 \text{ kN}$$

Pilarin kriittinen kuorma palossa :

$$N_{cr,fi} := \frac{N_{pl,Rd,fi}}{\lambda_{\theta}^2} = 3627.642 \text{ kN}$$

Nurjahduspituus L_c :

$$L_c^2 = L_{c1} := \frac{\pi^2 \cdot EI_{eff,fi}}{N_{cr,fi}} = 94.284 \text{ m}^2$$

$$L_c := \sqrt{L_{c1}} = 9.71 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad L := 1.0 \cdot L_c = 9.71 \text{ m}$$

Nurjahduskäyrä c:n epätarkkuustekijä EN 1993-1-1 taulukon 6.1 mukaan :

$$\alpha_{\theta} := 0.49$$

Piennestekijän laskentaan tarvittava apusuure Φ_{θ} :

$$\Phi_{\theta} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{\theta} \cdot (\lambda_{\theta} - 0.2) + \lambda_{\theta}^2) = 1.944$$

Piennestekijä χ_{θ} :

$$\chi_{\theta} := \frac{1}{\Phi_{\theta} + \sqrt{\Phi_{\theta}^2 - \lambda_{\theta}^2}} = 0.315 \leq 1.0 \quad \Rightarrow \text{OK}$$

Pilarin puristuskestävyys :

$$N_{Rd,fi} := \chi_{\theta} \cdot N_{pl,Rd,fi} = 2567.296 \text{ kN}$$

Pilarin nurjahduskestävyyden käyttöaste :

$$ka_{nurjahdus,fi} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd,fi}} \cdot 100 = 86.122 \quad \%$$

PALONAIKAINEN PURISTUKSEN JA MOMENTIN YHTEISVAIKUTUSKESTÄVYYS

Taivutusta voidaan tarkastella pilarin kuorman epäkeskisyyden e_{fi} avulla :

$$e_{fi} := \frac{M_{Ed,fi}}{N_{Ed,fi}} = 50.8 \text{ mm}$$

Kerroin :

$$B_{fi} := 1 + \frac{1}{\chi_0} + e_{fi} \cdot \frac{N_{pl,Rd,fi} - N_{c,Rd,fi}}{M_{pl,Rd,fi}} = 4.552$$

B_{fi} :stä riippuva kerroin :

$$X := 0.5 \cdot \left(B_{fi} - \sqrt{B_{fi}^2 - \frac{4}{\chi_0}} \right) = 0.861$$

Yhteisvaikutuksen huomioon ottava normaalivoimakestävyys lasketaan kaavalla :

$$N_{Rd,fi,\delta} := X \cdot N_{Rd,fi} = 2211.402 \text{ kN}$$

Momentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksen käyttöaste :

$$ka_{M,N,fi} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd,fi,\delta}} \cdot 100 = 100 \quad \%$$

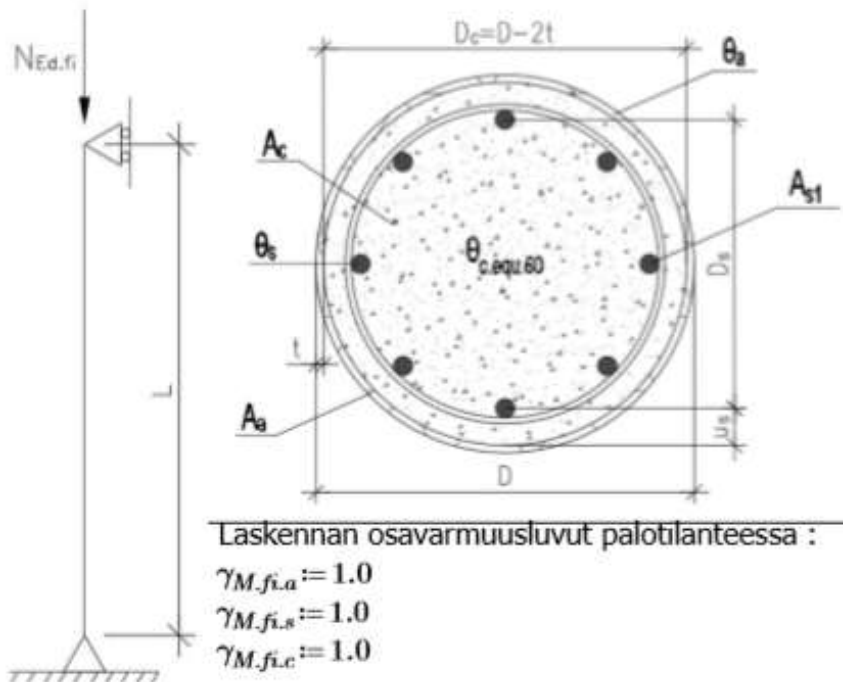
LIITE 2: PYÖREÄN BETONITÄYTTEISEN PUTKILIITTOPILARIN PALOMITOITUS A. ESPINOS'N MENETELMÄN MUKAISESTI, NIVELELLINEN PERUSTULIITOS

Laskennan lähtötiedot

Suoritetaan saman pilarin palomitoitus espanjalaisen tutkijan Ana Espinos'n menetelmän mukaisesti. A. Espinos'n menetelmä itsessään on hieman erilainen kuin Leskelän kehittämä NCCI. A. Espinos'n menetelmästä syntyy normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskuvaaja, jossa on kaksi eri verhoikäyrää. Ulkopuolinen käyrä on teoreettinen M-N yhteisvaikutuskuvaaja ja sisempi käyrä on muunnettu yhteisvaikutuskäyrä kertoimella 0,9. Käyrin sisään jää kaksi pistettä, joista pienempi on 1. kertaluvusta aiheutuva taivutusmomentti ja suurempi piste on 2. kertaluvusta aiheutuva momentti, joka on samalla mitoittava taivutusmomentti. Laskelmissa on haettu mitoittava taivutusmomentti muunnetulle yhteisvaikutuskäyrälle, jolloin käyttöaste on 100%. Laskelmien lähtötiedot ovat seuraavat:

- Palonkestoluokka R60
- Pilarin pituus on 6770mm, jolloin muunnetun hoikkuuden arvo on 1,5
- Poikkileikkauksen halkaisija D on 508mm
- Rakenneputken seinämävahvuus t on 10mm
- Teräslaatu S355
- Betonilaatu C35/45
- Betoniterälaji B500B
- Raudoituksen keskiöetäisyys rakenneputken sisäpinnasta u_s on 50mm
- Raudoituksen halkaisija on 25mm
- Raudoitusmäärä n_s on 8kpl, jolloin raudoitussuhde on 2,1%
- Pilarin muunnettu hoikkuus on 1,5
- Normaalivoiman epäkeskisyys on 10% eli 50,8mm

Palotilanteen mitoituskuorma : $N_{Ed,fi} := 2250 \text{ kN}$



Lähtötiedot :

Paloluokka : $R_{60} := 60$

Pilarin pituus : $L := 6.77 \text{ m}$

Pilarin halkaisija : $D := 508 \text{ mm}$

Rakenneputken seinämävahvuus : $t := 10 \text{ mm}$

Raudituksen keskiöetäisyys putken sisäpinnasta : $u_s := 50 \text{ mm}$

Terästen lukumäärä : $n_s := 8$

Betoniteräksen halkaisija : $\phi := 25 \text{ mm}$

Mitotuskuorman epäkeskisyyden : $e := 50.8 \text{ mm}$

Muut tiedot :

Betonilaatu C35/45 : $f_{ck} := 35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Teräslaatu S355 : $f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Betoniteräslaatu B500B : $f_{sk} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Rakenneputken sisähalkaisija : $D_c := D - 2 \cdot t = 488 \text{ mm}$

Pääterästen välinen keskiöetäisyys : $D_s := D_c - 2 \cdot u_s = 388 \text{ mm}$

Leikkasukerroin : $A_m V := \frac{\pi \cdot D}{\frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot m}} = 7.874$

Yhden teräksen pinta-ala : $A_{s1} := \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$

Rakenneputken poikkileikkausarvot :

$$\text{Pyöreään rakenneputken ala : } A_a := \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_c^2) = 15645.131 \text{ mm}^2$$

$$\text{Pyöreään rakenneputken neliömomentti : } I_a := \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - D_c^4) = (4.852 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$\text{Pyöreään rakenneputken plastinen taivutusvastus : } W_{pa} := \frac{D^3}{6} - \frac{D_c^3}{6} = (2.48 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Betoniteräksen poikkileikkausarvot :

$$\text{Raudoituksen yhteispinta-ala : } A_s := A_{s1} \cdot n_s = 3926.991 \text{ mm}^2$$

$$\text{Raudoituksen neliömomentti : } I_s := \frac{n_s}{8} \cdot D_s^2 \cdot A_{s1} = (73.898 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$$\text{Raudoituksen plastinen taivutusvastus : } W_{ps} := 1.7 \cdot n_s \cdot D_s \cdot \frac{A_{s1}}{6} = (4.317 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

Betonin poikkileikkausarvot :

$$\text{Betonin poikkileikkausala : } A_c := \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} - A_s = 183110.869 \text{ mm}^2$$

$$\text{Halkeilemattoman betonin neliömomentti : } I_c := \frac{\pi}{64} \cdot D_c^4 - I_s = (2.71 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

Halkeilemattoman betonin

$$\text{plastinen taivutusvastus : } W_{pc} := 0.167 \cdot D_c^3 - W_{ps} = (1.898 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

$$\text{Raudoitussuhde : } \rho_s := \frac{A_s}{A_c} \cdot 100 = 2.145 \text{ \%}$$

MATERIAALI : RAKENNETERÄS

$$\text{Kimmokerroin : } E_a := 210 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ekvivalentti lämpötila θ_a °C:

$$\theta_a := -824.67 - 5.58 \cdot R_{60} + 0.007 \cdot R_{60}^2 - 0.01 \cdot R_{60} \cdot A_m V + 645.08 \cdot R_{60}^{0.260} \cdot A_m V^{0.017} = 870.892 \text{ °C}$$

$$\text{Rakenneputken pienennyskerotimet : } k_{y_{a,\theta}} := 0.07455 \quad k_{E_{a,\theta}} := 0.07405$$

Palotilanteen lujuudet :

$$f_{y_{a,\theta}} := k_{y_{a,\theta}} \cdot f_y = 26.465 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$E_{a,\theta} := k_{E_{a,\theta}} \cdot E_a = 15550.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

MATERIAALI : BETONI

Ekvivalentti lämpötila θ_c °C:

$$\theta_c = 81.8 - 5.05 \cdot R_{90} + 0.003 \cdot R_{90}^2 - 15.07 \cdot A_m V + 0.3 \cdot A_m V^2 - 0.88 \cdot R_{90} \cdot A_m V + 7.43 \cdot R_{90}^{0.842} \cdot A_m V^{0.714} = 292.561 \text{ °C}$$

Betonin pienennyskerotimet :

$$k_{c,\theta} := 0.8574$$

$$\varepsilon_{cu,\theta} := 0.006889$$

Palotilanteen lujuudet :

$$f_{c,\theta} := k_{c,\theta} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{M,fi,c}} = 30.009 \frac{N}{mm^2}$$

$$E_{c,\theta} := \frac{f_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} = 4356.075 \frac{N}{mm^2}$$

MATERIAALI : BETONITERÄS

Kimmokerroin : $E_s := 210 \cdot 10^3 \frac{N}{mm^2}$

Ekvivalentti lämpötila θ_s °C:

$$\theta_s := 0 \cdot \left(\frac{R_{60}}{\left(\frac{u_s}{mm} \right)^2} \right)^3 + (-55639) \cdot \left(\frac{R_{60}}{\left(\frac{u_s}{mm} \right)^2} \right)^2 + 13768 \cdot \left(\frac{R_{60}}{\left(\frac{u_s}{mm} \right)^2} \right) + (-19.897) = 278.487 \text{ °C}$$

Betoniteräsken pienennyskerotimet :

$$k_{ys,\theta} := 1.0$$

$$k_{Es,\theta} := 0.8215$$

Palotilanteen lujuudet :

$$f_{ys,\theta} := k_{ys,\theta} \cdot f_{sk} = 500 \frac{N}{mm^2}$$

$$E_{s,\theta} := k_{Es,\theta} \cdot E_s = 172515 \frac{N}{mm^2}$$

Jäykkyyksien sovituskerroimet :

Betoni : $\varphi_{c,\theta} := 1.2$

Rakenneteräs : $\varphi_{a,\theta} := 0.75 - 0.023 \cdot A_m V = 0.569$

Betoniteräs : $\varphi_{s,\theta} := 0.8 - 0.002 \cdot R_{60} = 0.68$

PALONAIKAINEN TEHOLLINEN TAIVUTUSJÄYKKYYS

Jäykkyyden korjauskerroin korkeissa lämpötiloissa R60 paloluokassa :

$K_\theta := 0.9$

Todellinen toisen asteen taivutusjäykkyys : $K_o := 0.9$ $K_{e,II} := 0.5$

$EI_{eff,II,fi} := K_\theta \cdot K_o \cdot (\varphi_{a,\theta} \cdot E_{a,\theta} \cdot I_a + \varphi_{s,\theta} \cdot E_{s,\theta} \cdot I_s + K_{e,II} \cdot \varphi_{c,\theta} \cdot E_{c,\theta} \cdot I_c) = 16.236 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$

PALONAIKAINEN PURISTUSKESTÄVYYS

Rakenteen palonaikainen kokonaispuristuskestävyys :

$N_{pl,Rd,fi} := A_a \cdot f_{ya,\theta} + A_c \cdot f_{c,\theta} + A_s \cdot f_{ys,\theta} = 7872.522 \text{ kN}$

PALONAIKAINEN TAIVUTUSKESTÄVYYS

$2 h_n$ alueella vaikuttavien terästen lukumäärä :

$n_{s2} := 4$

$2 h_n$ alueella vaikuttavien terästen pinta-ala :

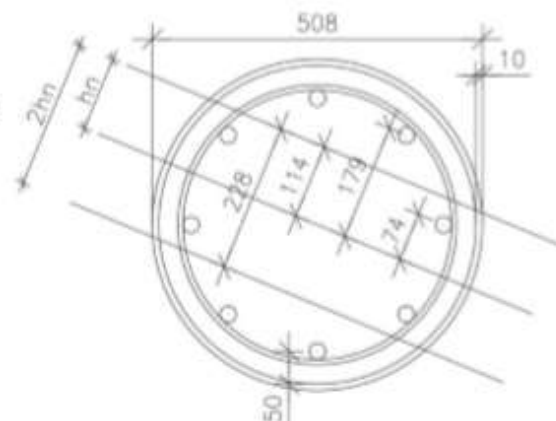
$A_{s1} := A_{s1} \cdot n_{s2} = 1963.495 \text{ mm}^2$

Neutraaliakselin etäisyys massakeskipisteestä :

$h_n := \frac{A_c \cdot f_{c,\theta} - A_{s1} \cdot (2 \cdot f_{ys,\theta} - f_{c,\theta})}{2 \cdot D \cdot f_{c,\theta} + 4 \cdot t \cdot (2 \cdot f_{ya,\theta} - f_{c,\theta})} = 114.322 \text{ mm}$

Rakenneteräksen taivutusvastus $2 h_n$ alueella :

$W_{pm,fi} := 2 \cdot t \cdot h_n^2 = 261390.978 \text{ mm}^3$



Raudoituksen keskiöetäisyys neutraaliakselista:

$e_{rand} := 74 \text{ mm}$

Betoniteräksen taivutusvastus $2 h_n$ alueella :

$$W_{psn.fi} := n_{s2} \cdot e_{raud} \cdot A_{s1} = (1.453 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

Betonin taivutusvastus $2 h_n$ alueella :

$$W_{pcn.fi} := (D - 2 \cdot t) \cdot h_n^2 - W_{psn.fi} = (6.233 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

M-N yhteisvaikutuskäyrän pisteet :

Piste A :

$$N_{A.Rd.fi} := N_{pl.Rd.fi} = (7.873 \cdot 10^3) \text{ kN} \quad | \quad M_{A.Rd.fi} := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Rakenteen plastinen taivutuskestävyys :

$$M_{pl.Rd.fi} := (W_{pa} - W_{psn.fi}) \cdot f_{ys,\theta} + \frac{1}{2} \cdot (W_{pc} - W_{pcn.fi}) \cdot f_{c,\theta} + (W_{ps} - W_{psn.fi}) \cdot f_{ys,\theta} = 393.139 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Piste B :

$$M_{B.Rd.fi} := M_{pl.Rd.fi} = 393.139 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad | \quad N_{B.Rd.fi} := 0 \text{ kN}$$

Piste C :

$$N_{C.Rd.fi} := A_c \cdot f_{c,\theta} = 5494.974 \text{ kN} \quad | \quad M_{C.Rd.fi} := M_{pl.Rd.fi} = 393.139 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Suurin taivutuskestävyys epäkeskisellä normaalivoimalla :

$$M_{max.Rd.fi} := W_{pa} \cdot f_{ys,\theta} + \frac{1}{2} \cdot W_{pc} \cdot f_{c,\theta} + W_{ps} \cdot f_{ys,\theta} = 566.224 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Piste D :

$$N_{D.Rd.fi} := \frac{A_c \cdot f_{c,\theta}}{2} = 2747.487 \text{ kN} \quad | \quad M_{D.Rd.fi} := M_{max.Rd.fi} = 566.224 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

TOISEN KARTALUVUN VAIKUTUKSIEN HUOMIOIMINEN :

Pilarin nurjahduspituus : $L_c := 1.0 \cdot L = 6.77 \text{ m}$

Toisen kertaluvun pilarin kriittinen kuorma palossa :

$$N_{cr,eff.fi} := \frac{\pi^2 \cdot EI_{eff,II.fi}}{L_c^2} = (3.496 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Momentin suurennuskerroin : $r := 1$

$$\beta := 0.66 + 0.44 \cdot r = 1.1$$

$$k_{f_i} := \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed,f_i}}{N_{cr,eff,f_i}}} = 3.086$$

$$k_{imp,f_i} := \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed,f_i}}{N_{cr,eff,f_i}}} = 2.805$$

Alkuepäkeskisyys e_{imp} :

$$\rho_s = 2.145 \% \leq 3 \% \Rightarrow e_{imp} := \frac{L}{300} = 22.567 \text{ mm}$$

Yhteisvaikutuskuvaajan janan B - D kulma :

$$M_{max,Rd,f_i} - M_{pl,Rd,f_i} := \frac{M_{max,Rd,f_i}}{kN \cdot m} - \frac{M_{pl,Rd,f_i}}{kN \cdot m} = 173.085$$

$$B_D = \arctan\left(\frac{M_{max,Rd,f_i} - M_{pl,Rd,f_i}}{N_{D,Rd,f_i}}\right) \Rightarrow B_D := 3.6047^\circ$$

$$z := N_{Ed,f_i} \cdot m \cdot \tan(B_D \text{ deg}) = 141.743 \text{ kN} \cdot m$$

$$M_{pl,N,Rd,f_i} := M_{pl,Rd,f_i} + z = 534.882 \text{ kN} \cdot m$$

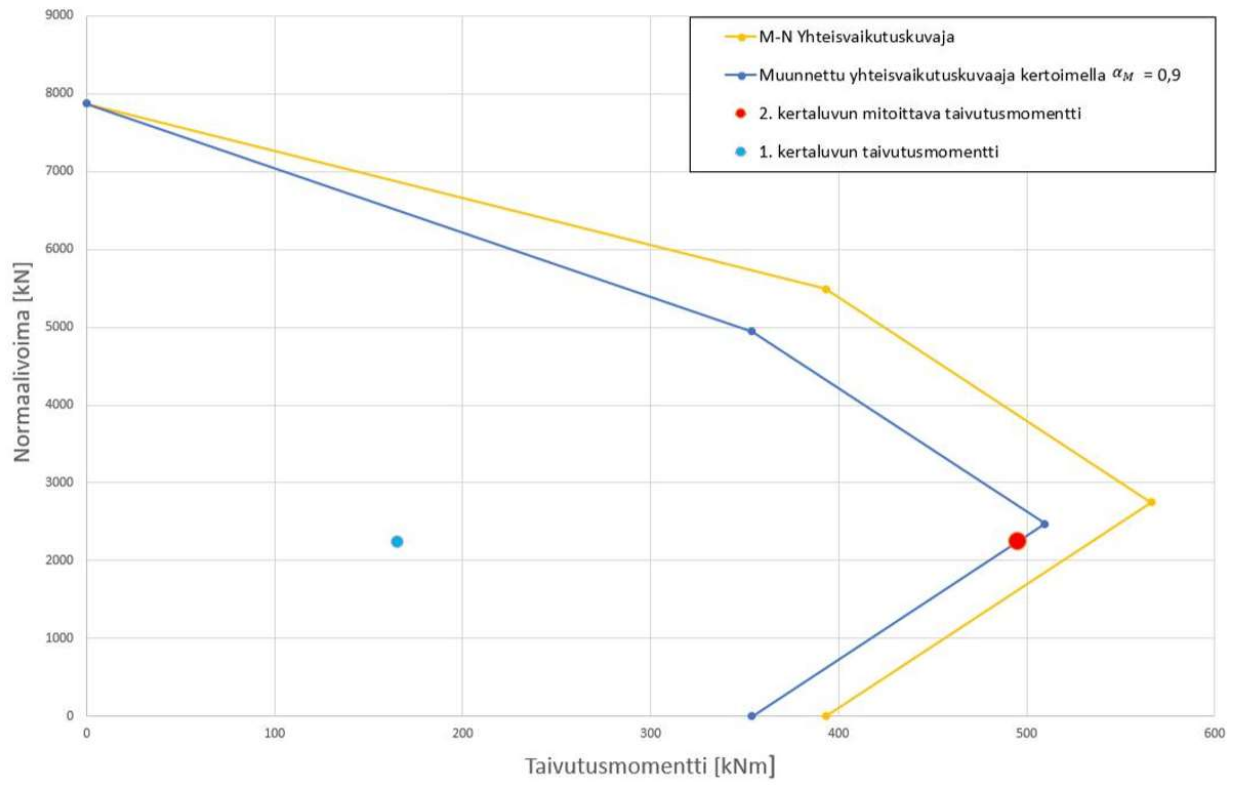
Toisesta kertaluvusta aiheutuva momentti : (mitoitettava taivutusmomentti)

$$M_{Ed,f_i,2} := (k_{f_i} \cdot e + k_{imp,f_i} \cdot e_{imp}) \cdot N_{Ed,f_i} = 495.178 \text{ kN} \cdot m$$

Toisen kertaluvun huomioon ottava ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentti :

$$M_{Ed,f_i,1} := (e + e_{imp}) \cdot N_{Ed,f_i} = 165.075 \text{ kN} \cdot m$$

M-N Yhteisvaikutuskuvaaja



LIITE 3: PYÖREÄN BETONITÄYTTEISEN PUTKILIITTOPILARIN PALOMITOITUS COMCOL OHJELMISTOLLA, NIVELELLINEN PERUSTULIITOS

Laskennan lähtötiedot

Mitoitetaan pyöreä betonitäytteinen putkiliittopilari palotilanteessa standardin EN 1994-1-2 yleisen menetelmän mukaisesti Comcol ohjelmistolla. Laskenta on sama kuin luvun 5 vertailulaskelmien kohdan 5.1.1 Sarjan 2 suoritettujen laskelmien poikkileikkauksesta 2. Laskelmissa on haettu 100% käyttöaste palonaikaiselle puristuksen ja momentin yhteisvaikutuskestävyydelle.

Lähtötiedot ovat seuraavat:

- Palonkestoluokka R60
- Pilarin pituus on 10000mm
- Poikkileikkauksen halkaisija D on 508mm
- Rakenneputken seinämävahvuus t on 10mm
- Teräslaatu S355
- Betonilaatu C35/45
- Betoniterälaji B500B
- Raudoituksen keskiöetäisyys rakenneputken sisäpinnasta u_s on 50mm
- Raudoituksen halkaisija on 32mm
- Raudoitusmäärä n_s on 12kpl, jolloin raudoitussuhde on 5,2%
- Normaalivoiman epäkeskisyys on 10% eli 50,8mm

PILARIN LUJUUSLASKELMAT

Tiedostonimi:

C:\Program Files (x86)\RUUKKI\COMCOL\ComCol_Projektikansiopohja\508x10_R60_5_.ccd

***** PILARIN YLEISTIEDOT *****

Mitoitusnormi: Omanormi (EC4+FIN NAD)

Materiaalilujuudet:

- Betoni:	katso jännekohtaiset tiedot!			
- Teräsprofiili:	S355JO	fk	=	355.0 N/mm ²
- Betoniteräs:	A500HW	fyk	=	500.0 N/mm ²
- Liitososat:	S355JO			

Kuormaosavarmuuskertoimet:

- Pysyväkuorma:	1.15
- Muuttuvakuorma:	1.50
- Minimikerroin:	1.35

Pilarin geometria:

Jänne	Korkeus [mm]	Tyyppi	Profiili [mm]	Nurjahdus		Kiinnitys		Paloluokka
				X-aks	Y-aks	Yläpää	Alapää	
1	10000	1	Ø508	1	0	2/2(f)	2/2(f)	A60

Laskenta vain X-akselin suuntaan

Tyyppi:

1 = Liittopilari
2 = Betonipilari
3 = Teräspilari

Nurjahdus:

0 = nurjahdus estetty
1 = nurjahdus sallittu

Tasokiinnitys:

1 = uloke
2 = nivelkiinnitys
3 = jäykkä kiinnitys
(f) = palotilanne

Pilari täyttää annetut mitoitus ehdot.

PILARIN LUJUUSLASKELMAT

Pilarijänne n:o 1 Span 1

*** GEOMETRIA ***

Pilarijänteen korkeus:	Tasoväli		10000 mm
Tasorakenne:	Yläpää	betonipalkki	200 mm
	Alapää	perustus	
Kiinnitykset:	Yläpää	nivelkiinnitys	
		nivelkiinnitys (palotilanne)	
	Alapää	nivelkiinnitys	
		nivelkiinnitys (palotilanne)	
Nurjahdussuunnat:	X-akseli	nurjahdus sallittu	
	Y-akseli	nurjahdus estetty	
Vaadittu paloluokka:	R60		

*** KUORMAT ***

Vaakakuormat jänteelle:

- Tuulikuormat -
- Konsolikuormat -

Pystykuormat ylätasolta:

	Normaalivoima N	Yläpää		Alapää	
		Øx/Mx	Kiertymä/Momentti Øy/My	Kiertymä/Momentti Øx/Mx	Øy/My
Pysyvät kuormat:	2462.8 kN		125.1 kNm		50.8 kNm
Muuttuvat kuormat:					
- Max normaalivoima	2462.8 kN		125.1 kNm		50.8 kNm
- Tapaus A	0.0 kN		0.0 kNm		0.0 kNm
- Tapaus B	0.0 kN		0.0 kNm		0.0 kNm

Kuormasta pitkäaikaista = 30.0 %
 Kuormasta palotilanteessa mukana = 30.0 %
 Kuorman tyyppi: Henkilö/tungoskuormaa

*** VOIMASUUREET ***

Pilarijänteen mitoittavat voimasuureet:

Kuormitus- tapaus	Nd [kN]	1. kertaluku		2. kertaluku	
		Mxd [kNm]	Myd [kNm]	Mxd [kNm]	Myd [kNm]
3/2	6526	0	723	-	-
2/2	6594	0	-530	0	0
2/2a	6526	0	723	0	0
3/2	6526	0	723	-	-
1/1	3404	0	-273	0	0

Pilari täyttää annetut mitoitus ehdot.

PILARIN LUJUUSLASKELMAT

Pilarijänne n:o 1 Span 1

*** MATERIAALIT ***

Materiaaliosavarmuuskertoimet:

- Betoni:	1.35
- Teräsprofiili:	1.00
- Betoniteräs:	1.10

Pilarijänteen tyyppi:

Betoniterästen suojakerros:

Betonilujuus ja luokka:

Pilarijänteen raudoitus:

Liittopilariprofiili:

Liittopilari
(Hakateräksen pintaan)

C35/45-1

virumaluku

A500HW

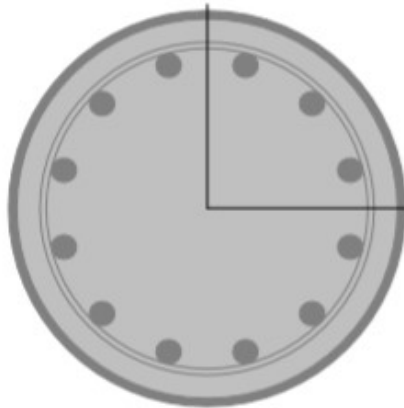
pääteräkset

haat

S355JO

RR508.0*10.0

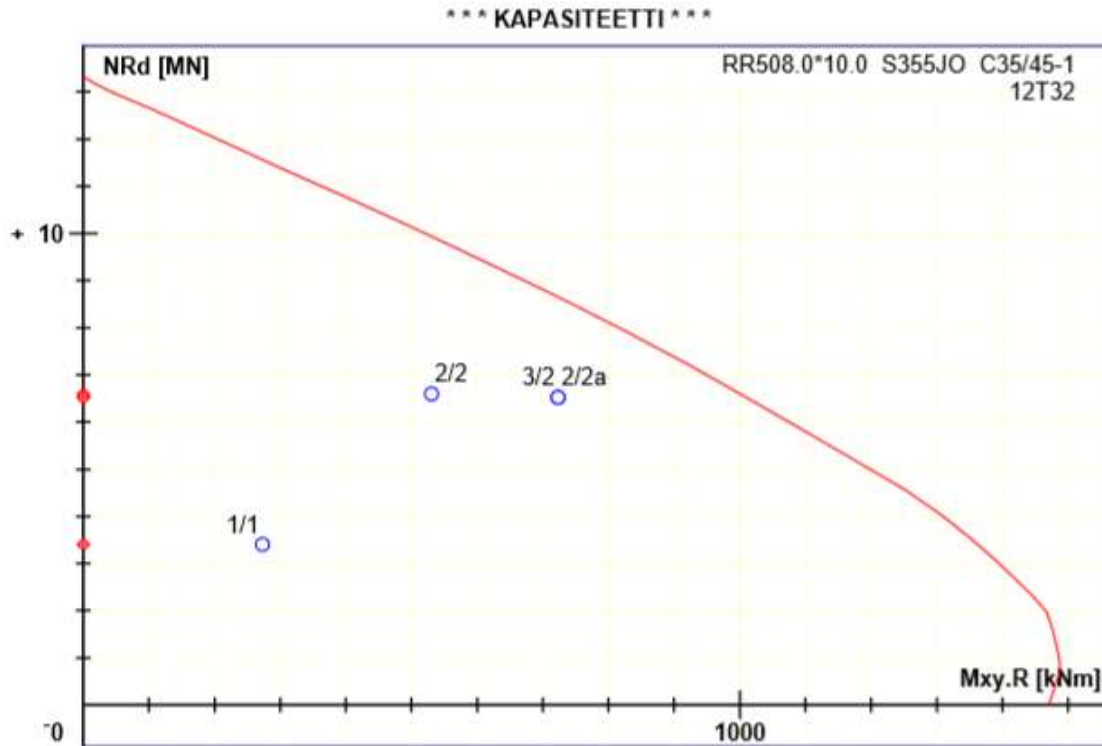
				30 mm
fck/fcd	=			35.0/25.9 N/mm ²
Ø	=			1.70
fyk/fyd	=			500/455 N/mm ²
Asr	=			9648 mm ²
Asr/Ac	=			5.2 %
				12T32
				3T8K50
				31T8K300
				3T8K50
fk/fd	=			355/355 N/mm ²
S355JO				122.8 kg/m



No	Ø	As [mm ²]	Xk [mm]	Yk [mm]
1	32.0	804	49.2	183.5
2	32.0	804	-49.2	183.5
3	32.0	804	-134.4	134.4
4	32.0	804	-183.5	49.2
5	32.0	804	-183.5	-49.2
6	32.0	804	-134.4	-134.4
7	32.0	804	-49.2	-183.5
8	32.0	804	49.2	-183.5
9	32.0	804	134.4	-134.4
10	32.0	804	183.5	-49.2
11	32.0	804	183.5	49.2
12	32.0	804	134.4	134.4

Sweco
PILARIN LUJUUSLASKELMAT

Pilarijanne n:o 1 Span 1



*** PALOMITOITUS ***

Vaadittu paloluokka:
Harjaterästen keskimääräinen lämpötila:
Pilari kokonaan palotilassa.

R60
128 °C

*** VOIMASUUREET ***

Pilarijanteen mitoittavat voimasuureet palotilanteessa:

Kuormitus- tapaus	N [kN]	1. kertaluku		2. kertaluku	
		Mx [kNm]	My [kNm]	Mx [kNm]	My [kNm]
3/2	3202	0	355	-	-
2/2	3261	0	-262	0	-262
2/2a	3224	0	355	0	641
4/2	3202	0	355	-	-
1/1	2522	0	-202	0	0

Pilari täyttää annetut mitoitus ehdot.

PILARIN LUJUUSLASKELMAT

Pilarijänne n:o 1 Span 1

*** PALOTILANTEEN KAPASITEETTI ***

