

Ville Vuorinen

KANTAVIEN TERÄSRAKENTEIDEN PA- LOSUOJAUS

Palosuojamaalalla paloluokissa R30-R120

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Professori Mikko Malaska
Tenure track -tutkija Kristo Mela
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Ville Vuorinen: Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus palosuojamaalalla paloluokissa R30-R120
Diplomityö, 123 sivua
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2023

Tässä diplomityössä tutkitaan kantavien teräsrakenteiden palosuojauksia ja sen kustannuksia. Teräs on palamaton materiaali, mutta lämpötilan noustessa se menettää materiaaliominaisuuksiinsa merkittävästi. Tämän vuoksi kantavia teräsrakenteita pitää usein palosuojata. Palosuojausmenetelmiä on monia, joista tässä työssä esitellään muutamia. Tutkimus painottuu kuitenkin palosuojamaalaukseen. Haastattelujen mukaan nykyään palomitoitus toteutetaan yleensä normaaliämpötilamitoituksessa mitoitettulle profiilille. Palosuojamaalaus voi kuitenkin edustaa huomattavaa osaa koko teräsrakenteen hinnasta, joten palosuojamaalattuja teräsrakenteita olisi rakennesuunnittelun yhteydessä hyvä tarkastella myös kustannusnäkökulmasta. Tutkimuksessa tarkastellaan, kuinka teräsrakenteen profiilin muutos vaikuttaa palosuojamaalauksen paksuuteen ja edelleen kustannuksiin. Palosuojauksen kalvopaksuuksia lasketaan käsin sekä Autodeskin Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelmalla (2021, myöhemmin tekstissä "Robot"). Samalla tutkitaan, miten kyseistä laskentaohjelmaa voidaan hyödyntää teräsrakenteiden palomitoituksessa.

Diplomityössä tutustutaan ensin kirjallisuuden avulla muutamaan palosuojautapaan, jotka ovat työn tilaajayrityksellä Afry Finland Oy:llä aktiivisesti käytössä. Tämän jälkeen selvitetään, miten teräsrakenteiden palomitoitus tehdään käsinlaskien sekä Robotilla. Kun palomitoitusprosessi on selvillä, valitaan yrityksen case-kohteista yksinkertaiset rakenteet, joille tehdään palomitoitus käsin sekä Robot-laskentaohjelmalla. Palomitoitus tehdään käsin perustuen kestävyysmenetelmään ja kriittisen lämpötilan menetelmään. Robotilla palomitoitus on mahdollista tehdä kolmella eri menetelmällä. Nämä menetelmät ovat kestävyys-, lämpötilaan/aikaan ja aikaan perustuvat menetelmät. Yksinkertaiset rakenteet mitoitetaan kaikilla menetelmillä palosuojamattomana sekä palosuojattuna ja vertaillaan saatuja tuloksia sekä palosuojamaalauksen kalvopaksuuksia.

Eri laskentamenetelmillä saatuja tuloksia vertaillaessa huomattiin, että pääsääntöisesti eri laskentamenetelmät antoivat samansuuruisia palosuojauksen tuloksia. Tutkimuksen aikana huomattiin kuitenkin joitain ongelmakohtia sekä Robotin laskennassa että käsinlaskennassa. Robotin todettiin kuitenkin soveltuvan hyvin teräsrakenteiden palomitoitukseen varsinkin, jos mitoitettava rakenne oli mallinnettu jo valmiiksi normaaliämpötilamitoituksen yhteydessä.

Lopuksi työssä tarkastellaan teräsrakenteiden kustannuksia. Case-kohteen rakenteet ryhmitellään siihen, että yhdelle ryhmälle voidaan määrätä sama palosuojamaalauksen kalvopaksuus. Tämän jälkeen ryhmän rasitetuimmalle rakenteelle määritellään palosuojamaalaus Robotin avulla ja lasketaan tämän jälkeen rakenteen kustannukset. Palosuojamaalauksen määrittäminen usealle eri profiilikoolle, jolloin pystytään vertailemaan profiilikoon merkitystä palosuojamaalatuksiin profiiliin kustannuksiin.

Tehdyn kustannusvertailun perusteella palonkestoluokassa R30 profiilikoon kasvattaminen ei ole yleensä kustannuksiltaan kannattavaa. R60 palonkestoluokassa profiilikoon kasvatus tuottaa useasti halvemman ratkaisun kuin alkuperäinen profiili. Tutkimuksessa huomattiin, että jos rakenteen pitää kestää palossa yli 30 minuuttia, kannattaa teräsrakenteen profiilia ja palosuojamaalauksen kalvopaksuutta optimoida. Optimaalisin tulos kustannusnäkökulmasta löydettiin yleensä kasvattamalla teräsrakenteen vakioprofiilikokoa yksi tai kaksi kokoa, jolloin teräsrakenteen ja palosuojamaalauksen kustannukset olivat mahdollisimman lähellä toisiaan.

Avainsanat: palosuojamaali, teräsrakenne, palomitoitus, kustannusvertailu, Robot

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Ville Vuorinen: Fire protection of load-bearing steel structures by fire protection painting in fire classes R30-R120.

Master of Science Thesis, 123 pages

Tampere University

Master's Degree Programme in Civil Engineering

May 2023

In this thesis, the fire protection of load-bearing steel structures and their costs are investigated. Steel is a non-combustible material, but when the temperature rises, it loses its material properties significantly. Because of this, load-bearing steel structures often need to be fireproofed. There are many fire protection methods, a few of which are presented in this work. However, the research focuses on fire protection paint. According to the interviews, nowadays fire designing is usually carried out for a profile designed at normal temperature. However, fire protection painting can represent a significant part of the price of the entire steel structure, so it would be good to consider fire protection painted steel structures in the context of structural planning also from a cost perspective. The study examines how the change in the profile of the steel structure affects the thickness of the fire protection coating and further the costs. Fire protection film thicknesses are calculated manually and with Autodesk's Robot Structural Analysis Professional (2021, later in the text "Robot") calculation program. At the same time, we will investigate how the calculation program in question can be used in the fire design of steel structures.

In the thesis, we will first familiarize ourselves with a few fire protection methods with the help of literature, which are actively used by the company ordering the work, Afry Finland Oy. After this, we will find out how the fire rating of steel structures is done by manually calculating and with a Robot. When the fire dimensioning process is clear, simple structures are selected from the company's case sites, for which fire dimensioning is done manually and with the Robot calculation program. Fire designing is done manually based on the resistance method and the critical temperature method. With the Robot, it is possible to do fire designing using three different methods. These methods are resistance, temperature/time, and time-based methods. Simple structures are calculated with all methods without fire protection and with fire protection, and the results obtained, and the film thicknesses of the fire protection painting are compared.

When comparing the results obtained with different calculation methods, it was noticed that the different calculation methods gave the same fire protection results. During the research, however, some problem points were noticed in both Robot's calculation and manual calculation. However, the robot was found to be well suited for fire designing of steel structures, especially if the structure to be designed had already been made ready with normal temperature designing of the structure.

Finally, the work examines the costs of steel structures. The structures of the case object are grouped in such a way that one group can be assigned the same film thickness of the fire protection coating. After this, the most stressed structure in the group is defined with the help of the Robot for fire protection painting, and then the costs of the structure are calculated. The determination of the fire protection painting is repeated for several different profile sizes, which makes it possible to compare the importance of the profile size with the costs of the fire protection painted profile.

Based on the cost comparison, increasing the profile size in fire resistance class R30 is usually not cost-effective. In the R60 fire resistance class, increasing the profile size often results in a cheaper solution than the original profile. The research found that if the structure must last more than 30 minutes in a fire, it is worth optimizing the profile of the steel structure and the film thickness of the fire protection coating. The most optimal result from a cost point of view was usually found by increasing the standard profile size of the steel structure by one or two sizes so that the costs of the steel structure and the fire protection painting were as close as possible.

Keywords: fire protection paint, steel structure, fire design, cost comparison, Robot

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

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Afry Finland Oy:n toimeksiannosta sekä Tampereen yliopiston ohjeistuksen ja vaatimusten mukaisesti. Työ on laadittu yritykselle palomitoitusosaamisen lisäämiseksi. Lisäksi diplomityö päättää opinnot yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnassa.

Ensin haluan kiittää Afryn esimiestäni Juhani Viitasta, joka otti toiveeni paloon liittyvästä aiheesta vastaan ja keksi myös hyvän diplomityöaiheen siihen liittyen. Lisäksi erityiskiitokset työn ohjaamisesta kuuluu Otto Niemelälle, joka toimi pääasiallisena ohjaajana työssä. Otto vastasi kysymyksiini erittäin nopeasti ja perehtyi myös syvällisesti aiheeseen. Tästä on hienoa päästä jatkamaan yhteistyötä näiden henkilöiden kanssa.

Haluan myös kiittää Tampereen yliopiston professori Mikko Malaskaa, joka toimi koulun puolen ohjaajana. Mikko antoi hyviä vinkkejä hyvän tieteellisen käytännön mukaiseen kirjoittamiseen ja tutkimiseen. Opiskeluvuodet ovat olleet antoisat ja olen saanut hyviä ystäviä sekä mielestäni hyvät eväät tuleviin koitoksiin. Haluankin vielä lopuksi kiittää kaikkia opiskelutovereitani sekä kotiväkeä hyvästä tukemisesta ja kannustamisesta diplomityön sekä koko yliopiston aikana.

Tampereella, 19.5.2023

Ville Vuorinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset	1
1.3 Tutkimusmenetelmät	2
2. KANTAVIEN TERÄSRAKENTEIDEN PALOSUOJAUSMENETELMÄT	4
2.1 Palosuojamaalit	5
2.2 Palosuojalevyt	10
2.2.1 Mineraalivillalevyt	10
2.2.2 Kipsilevyt ja -elementit	10
3. TERÄSRAKENTEEN PALOMITOITUS	12
3.1 Suunnitteluperusteet	12
3.2 Teräksen materiaaliominaisuudet	15
3.3 Lämpötilan kehittyminen palossa	17
3.4 Mitoitusmenetelmät	20
3.5 Poikkileikkaustekijä	21
3.6 Teräsrakenteen palonkestävyys ja kriittinen lämpötila	22
3.7 Palotilanteen kuormitusyhdistelmät	25
3.8 Palosuojauksen suunnittelu ja mitoitus	27
3.9 Teräsrakenteiden palomitoitus Autodeskin Robot Structural Analysis Professional -ohjelmalla	28
4. ERI LASKENTAMENETELMIEN SOVELTAMINEN TERÄSRAKENTEIDEN PALOMITOITUKSESSA	37
4.1 Palosuojaaamaton teräsrakenne	39
4.1.1 Käsinlaskenta	39
4.1.2 Robot	41
4.2 Palosuojamaalattu teräsrakenne	43
4.2.1 Käsinlaskenta	43
4.2.2 Robot	44
4.3 Tulosten vertailu	45
5. PROFIILIKOON VAIKUTUS PALOSUOJAMAALAUKSEN TARPEESEEN PALONKESTOLUOKISSA R30-R120	51
5.1 Kustannusten erittely	51
5.2 Profiilikokojen vertailu	53
5.3 Johtopäätökset	59
6. YHTEENVETO	61
LÄHTEET	65

LIITE A: KUSTANNUSKUVAAJAT	68
LIITE B: PALOSUOJAAMATTOMAN RAKENTEEN LÄMPÖTILAN LASKEMINEN	71
LIITE C: PALOSUOJATUN RAKENTEEN LÄMPÖTIILAN LASKEMINEN.....	75
LIITE D: PALKIN LASKENTA KESTÄVYYSMENETELMÄLLÄ.....	77
LIITE E: PILARIN LASKENTA KESTÄVYYSMENETELMÄLLÄ.....	85
LIITE F: PALKIN KRIITTISEN LÄMPÖTILAN LASKEMINEN	93
LIITE G: PILARIN KRIITTISEN LÄMPÖTILAN LASKEMINEN	108

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Suurten teollisuusrakenteiden rungot ovat hyvin usein teräsrakenteisia ja näiden teräsrakenteiden palosuojauksella on merkittävä vaikutus hankkeiden rakennus- ja ylläpito-kustannuksiin. Rakennesuunnittelun yhteydessä olisi hyvä pystyä optimoimaan palosuojauksen määrää, jotta suojaus voidaan toteuttaa nopeasti ja kustannustehokkaasti. Optimointi sisältää sekä suojausmenetelmien oikean valinnan sekä suunnittelussa käytettävien laskentamenetelmien tehokkaan hyödyntämisen. Terästä käytetään paljon kantavien rakenteiden rakennusmateriaalina ja sen vuoksi on tärkeää, että ne kestävät myös palotilanteessa sortumatta. Teräs on palamaton materiaali, mutta lämpötilan noustessa se menettää lujuuttaan. Tämän vuoksi kantavat teräsrakenteet ovat usein palosuojattava.

Tilaja-yritys Afry Finland Oy suunnittelee paljon tällaisia teräsrunkoisia rakennuksia. Yrityksellä on tarve selvittää parhaat menetelmät palosuojauksen valintaan ja mitoittamiseen. Lisäksi teollisuuskohteiden ongelmana on vaativampi ilmastorasitusluokka kuin yleisesti, jolloin tavalliset palosuojamaalit eivät riitä rakenteiden palosuojaukseen. Yritys kaipaa selkeitä menettelytapoja Autodeskin Robot Structural Analysis Professional -laskentaohjelmalla (2021, myöhemmin tekstissä "Robot") toteutettavaan palomitoitukseen.

1.2 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten teräsrakenteiden palomitoitus tehdään ja millainen palosuojaus rakenteelle olisi taloudellista tehdä. Tutkimuksessa tarkastellaan eri rakenteiden palosuojauksen välttämättömyyttä ja kustannustehokkainta palosuojauksen toteuttamistapaa palonkestoluokissa R30-R120. Palonkestoluokan kirjain R kuvaa rakenteelle annettua vaatimusta kantavuudesta ja perässä oleva numero kertoo ajan, jonka rakenteen pitää vähintään kestää palossa minuutteina. Tutkimuksessa pyritään selvittämään, onko palosuojaus taloudellisinta toteuttaa palosuojamaalauksella, teräsrakenteen poikkileikkausta kasvattamalla tai näiden yhdistelmänä. Palosuojamaalien CE-merkkiin kytketty suoritustasoilmoitus viittaa usein ETA-todistukseen. Tämän todistuksen liitteestä löytyy palosuojamaalin määrittämiseen tarvittavat tiedot. Yleensä tämä tieto

on kuitenkin vain taulukoita, joiden avulla palosuojamaalin kalvopaksuus voidaan määrittää. Tässä työssä kuitenkin haluttiin käyttää Robottia palosuojamaalauksen mitoittamiseen, jolloin palosuojamaalin tiheyden, ominaislämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuden arvot pitää selvittää. Nämä parametrit ovat tosin vaikea saada selville ja ne muuttuvat palosuojamaalin valmistajakohtaisesti. Tähän tutkimukseen valittiin yksi markkinoilla oleva palosuojamaali. Tutkimuksella pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- miten Robot-laskentaohjelmaa voidaan käyttää teräsrakenteiden palomitoituksessa ja palosuojauksen suunnittelussa;
- millä tavalla palosuojausratkaisua voidaan kehittää ja optimoida rakennesuunnittelun yhteydessä;
- miten eri palomitoitusmenetelmien tulokset poikkeavat toisistaan;
- miten rakennuksen kantavia teräsosia voidaan ryhmitellä palomitoituksen kannalta järkevästi, siten että yhdelle ryhmälle pystyttäisiin määrittelemään sama palosuojaus;
- onko palosuojamaalauksen kalvopaksuuden kasvattaminen vai teräsrakenteen poikkileikkauksen kasvattaminen taloudellisempaa.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen alussa selvitetään kirjallisuustutkimuksena, miten teräsrakenteiden palosuojaus ja palomitoitus toteutetaan. Palosuojausmenetelmistä keskitytään lähinnä palosuojamaalaukseen, mutta työn alussa maalausta verrataan myös muihin palosuojamenetelmiin. Mitoituspalona käytetään standardipaloa. Edelleen kirjallisuustutkimuksena selvitetään, miten Robot tekee palomitoituksen, mitä menetelmiä ohjelma soveltaa sekä minkälaisia oletuksia mitoitukseen liittyy. Työssä selvitetään ohjelman soveltamista palomitoituksessa tutkimalla eri laskentaparametrien vaikutuksia tuloksiin. Robotilla on myös varsin helppo ryhmitellä rakenneosia, joten tutkimuksessa pyritään vastaamaan myös siihen, kuinka rakennuksen teräsrakenteita voidaan ryhmitellä palomitoituksen kannalta järkevästi. Kirjallisuustutkimuksena selvitetään myös, onko palosuojamaalauksen ja teräsrakenteen poikkileikkauksen optimoinnista tehty jo tutkimusta ja millaisia tuloksia tästä on saatu.

Palosuojamaalauksen kalvopaksuuden ja teräsrakenteen poikkileikkauksen optimaalista ratkaisua etsitään käsinlaskennan menetelmillä sekä Robotilla. Työssä käytetään esi-

merkkinä case-kohdetta, josta valitaan ensin yksinkertaiset rakenteet, joille tehdään palomitoitus käsin sekä Robotilla käyttäen eri laskentamenetelmiä. Case-kohteena toimii suuri teollisuuden laitos, jonka alapuolinen osa on betonirakenteinen ja sen päällä teräksinen pilari-palkkirunko. Yksinkertaisten rakenteiden palomitoituksen jälkeen selvitetään palosuojatun rakenteen kustannukset laskemalla ensin palosuojauksen paksuus Robotilla ja tämän jälkeen kustannukset Excelillä. Nämä laskut suoritetaan eri profiilikoilla, jotta voidaan selvittää kustannuksiltaan optimaalisin ratkaisu. Robot-laskentaohjelmaa pyritään siis käyttämään koko palosuojamaalauksen määrittämiseen. Lisäksi työssä ryhmitellään case-kohteen rakenteet palosuojauksen kannalta mielekkäisiin ryhmiin ja tehdään näille myös kustannusvertailua.

Laskentatuloksista pyritään löytämään säännönmukaisuuksia, joiden avulla rakennesuunnittelijan olisi helppo valita rakenteelle materiaali- ja palosuojaukuskustannusten suhteen kustannustehokas rakennepoikkileikkaus sekä maalin kalvonpaksuus. Haastatteleamalla yrityksen suunnittelijoita selvitetään myös, miten teräsrakenteiden palomitoitus nykyisin toteutetaan sekä, millä menetelmillä palosuojauksen ratkaisut määritetään. Haastattelujen tulosten perusteella voidaan arvioida menetelmiä, joiden avulla rakennesuunnittelija pystyisi jo suunnitteluprosessin aikana arvioimaan suunnitteluratkaisun edellyttämän palosuojauksen vaikutusta ratkaisun kustannuksiin.

Tutkimuksessa tunnistettujen menetelmien toimivuutta arvioidaan soveltamalla niitä yrityksen toteuttamien rakennuskohteiden suunnitteluratkaisuihin. Näissä todellisia kohteita hyödyntävissä tapaustutkimuksissa rakennusrungon teräsosia pyritään ryhmittelemään siten, että eri palosuojamaalauksen kalvopaksuudella olevia rakenneosia olisi mahdollisimman vähän. Tutkimustuloksista koostetaan kuvaajia, joiden avulla teräsprofiilin muutoksen vaikutuksia maalaus- ja materiaalikustannusten muodostamiin kokonaiskustannuksiin on mahdollista vertailla.

2. KANTAVIEN TERÄSRAKENTEIDEN PALOSUOJAUSMENETELMÄT

Kantavien teräsrakenteiden palonkesto-aika ei useinkaan ole riittävä suojaamattomana, etenkin jos mennään yli 15 minuutin palonkestovaatimuksen. Tämän vuoksi rakenteita joudutaan usein suojaamaan tulipalolta. Teräsrakenteiden palonkesto-aikaa voidaan kasvattaa joko eristämällä rakenne lämmöltä tai parantamalla rakenteen kykyä vastaanottaa lämpöä. Jotkut palosuojausmenetelmät, kuten vermikuliittilevyt, voivat toimia samaan aikaan sekä eristävinä että lämpöä sitovina. Palosuojausmenetelmien suojauksen tehokkuuteen vaikuttavat pääasiassa lämmönjohtavuus ja kosteussisältö. Lämpötilan muuttuessa myös ominaislämpö ja tiheys muuttuvat, joten niillä on myös vaikutusta palosuojauksen tehokkuuteen. Ominaislämmön ja tiheyden muutokset ovat kuitenkin niin pieniä, että niille käytetään tavallisesti vakioarvoja. Kosteussisältö vaikuttaa lähinnä palon alkuvaiheessa, kun veden höyrystymisen aikana lämpötila ei nouse palosuoja-aineen palon vastakkaisella puolella yli 100 °C. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 51)

Teräsrakenteita voidaan suojata palosuojamaalalla, -levytyksellä, -ruiskutteilla, -rappauksella, betonilla tai muurauksella. Teräsrakenne voidaan myös täyttää vedellä tai betonilla, mikä lisää rakenteen lämmönsitomiskykyä muuttamatta sen ulkonäköä. Palonkestävyyttä voidaan kasvattaa myös rakenteellisin keinoin, esimerkiksi alaslasketun katon avulla tai sijoittamalla pilari seinärakenteen sisään. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 51) Tässä työssä käsitellään pääasiassa palosuojamaalauksia, mutta verrataan sitä myös mineraalivilla- sekä kipsilevytykseen. Nämä menetelmät ovat yrityksessä useimmin käytössä sekä näillä menetelmillä valmistajien mitoitusaulukot ovat hyvin samankaltaisia, joten niitä on helppo vertailla. Palosuojamaalaus on yrityksessä yleisimmin käytetty palosuojaustapa, joten sen tutkimista on työssä painotettu.

Palosuojamenetelmät voidaan edelleen jakaa kuiviin ja märkiin menetelmiin työtavan perusteella. Kuivat palosuojausmenetelmät kiinnitetään usein mekaanisilla kiinnikkeillä suojattavaan teräsrakenteeseen tai koteloiksi rakenteen ympärille. Kuivia menetelmiä ovat erilaiset levyt, kasetit, tiili ja puu. Märkiin menetelmiin kuuluvat erilaiset palosuoja-ruiskutteet, -maalit, -rappaus, betoni ja vesi. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 51)

Teollisuuden kohteet ovat usein isoja ja palosuojattavaa on paljon, minkä vuoksi palosuojauksesta pitää tehdä hyvinkin tehokasta. Palosuojamaalaus mahdollistaa pääasiallisen teräsrakenteiden palosuojauksen toteuttamisen jo konepajalla, eikä työmaalla tar-

vitse enää keskittyä kuin palosuojamaalauksen korjauksiin. Esimerkiksi teollisuuskohteen teräsrakenteiden palosuojaminen levytyksellä työmaalla olisi hyvin paljon aikaa vievä prosessi ja kaikkien hankalien rakenteiden levyttäminen fiksusti ja toimivasti on hyvinkin haastavaa. Palosuojamaalaus ei juurikaan muuta teräsrakenteen ulkonäköä, joten se mahdollistaa teräsrakenteen alkuperäisen ulkomuodon säilyttämisen verrattuna esimerkiksi rakenteen kotelointiin.

Työssä käsitellään pääsääntöisesti palosuojamaalia, koska se on yleisesti käytetty palosuojausmenetelmä teollisuuden kohteissa. Lisäksi työssä esitellään kipsi- ja mineraalivillalevytykset, koska näitä käytetään myös satunnaisesti. Muut palosuojaukset rajataan pois työstä, koska ne eivät pääsääntöisesti sovellu kovin hyvin teollisiin rakennuskohteisiin.

2.1 Palosuojamaalit

Palosuojamaalin käyttö edellyttää tuotteelta voimassa olevaa tuotehyväksyntää. Palosuojamaalien valmistajat voivat hakea tuotteelleen CE-merkintää ETA-menettelyn kautta, jolloin tuotteen CE-merkintään liittyvässä suoritustasoilmoituksessa viitataan tuotteen ETA-todistukseen. Palosuojamaalit testataan polttokokeissa, joissa mitataan palosuojamaalin lämpötilasta riippuvat materiaaliominaisuudet. Nämä ominaisuudet ilmoitetaan ETA-todistuksessa. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 251)

Teräsrakenteiden palosuojaukseen sopii hyvin yleisesti käytössä olevat paisuvat palosuojamaalit. Normaaliämpötilassa ne ovat kuin tavallinen maalipinta, mutta palotilanteessa paisuvat moninkertaisiksi ja suojaavat rakennetta lämmön vaikutuksilta. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58) Paisumisreaktio tapahtuu teräksen lämpötilan ollessa 200–400 °C ja maalikerros katsotaan täysin paisuneeksi, kun teräksen lämpötila ylittää 400–450 °C tason (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58; Lucherini 2020, s. 204) Syntynyt vaahtokerros hiiltyy palon aikana ja hidastaa lämpötilan nousua alla olevassa rakenteessa. Jotkin palosuojamaalit ovat paloa häiritseviä maaleja, jotka muodostavat palossa esimerkiksi kloori- tai bromivetyä. Nämä paloa häiritsevät palosuojamaalit eivät estä teräsrakenteen lämpötilan nousua ja ovat siten vähemmän käytössä. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58)

Nykyisillä palosuojamaaleilla teräsrakenteelle voidaan saavuttaa standardipalon olosuhteissa 120 minuutin palonkestävyys. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 6). Tavallisesti palosuojamaalit eivät kestä kosteutta tai mekaanista rasitusta ja soveltuvat siten käytettäväksi ilmastorasitusluokassa C1 (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58). Teollisuuden kohteissa ilmastorasitusluokan vaatimus on yleensä huomattavasti korkeampi. Sopivalla

maalausjärjestelmällä voidaan kuitenkin päästä jopa vaativimpiin C5-I ja C5-M ilmasto-
rasitusluokkiin. Ilmatorasitusluokat on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1: Ilmatorasitusluokat ja esimerkkejä tyypillisistä ympäristöistä (SFS-EN
ISO 12944-2 2017, s.10).**

Korroosio- vaikutus- luokka	Painohäviö pinta-alayksikköä kohden/paksuushäviö (ensimmäisen altistusvuoden jälkeen)				Esimerkkejä tyypillisistä ympäristöistä (vain opastava)	
	Matalahiilinen teräs		Sinkki		Ulkona	Sisällä
	Paino- häviö g/m ²	Paksuus- häviö µm	Paino- häviö g/m ²	Paksuus- häviö µm		
C1 hyvin lievä	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Lämmitetyt rakennukset, joissa puhtaat ilmatilat, esim. toimistot, kaupat, koulut, hotellit
C2 lievä	> 10...200	> 1,3...25	> 0,7...5	> 0,1...0,7	Ilmatilat, joissa epäpuhtauksien määrä alhainen: enimmäkseen maaseutualueita	Lämmittämättömät rakennukset, joissa voi esiintyä kondensoitu- mista, esim. varastot, urheiluhallit
C3 kohtalainen	> 200...400	> 25...50	> 5...15	> 0,7...2,1	Kaupunki- ja teollisuusilmatilat, joissa kohtalainen rikkidioksidikuormi- tus, rannikkoalueet, joilla alhainen suolapitoisuus	Tuotantotilat, joissa on korkea kosteus ja hieman epäpuhtauksia ilmassa, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot, meijerit
C4 ankara	> 400...650	> 50...80	> 15...30	> 2,1...4,2	Teollisuusalueet ja rannikkoalueet, joilla suolapitoisuus on kohtalainen	Kemialliset tehtaat, uima-altaat, rannikolla sijaitsevat telakat ja veneveistämöt
C5 hyvin ankara	> 650... 1 500	> 80...200	> 30...60	> 4,2...8,4	Teollisuusalueet, joilla kosteus korkea ja ilmatila syövyttävä sekä rannikkoalueet, joilla suolapitoisuus korkea	Rakennukset tai alueet, joilla lähes jatkuvaa kondensoitumista ja saasteiden määrä korkea
CX äärimmäinen	> 1 500... 5 500	> 200... 700	> 60...180	> 8,4...25	Offshore-alueet, joilla suolapitoisuus korkea ja teollisuusalueet, joilla kosteus on äärimmäinen ja ilmatila syövyttävä sekä subtrooppiset ja trooppiset ilmastot	Teollisuusalueet, joilla kosteus äärimmäinen ja ilmatila syövyttävä

HUOM. Korroosiovaikutusluokissa käytetyt häviöarvot ovat yhtäpitävät standardin ISO 9223 arvojen kanssa.

Palosuojamaali levitetään teräsrakenteen pintaan siveltimellä, telalla tai ruiskuttamalla, kuten tavalliset korroosionestomaalit. Kuivakalvopaksuus palosuojamaaleilla on yleensä 0,3–3 mm. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58) Ennen palosuojamaalausta teräspinnoilta poistetaan epäpuhtaudet, kuten valssihilse, ruoste, vanha maalipinnoite ja muut epäpuhtaudet. Esikäsitteilyasteen pitää olla vähintään SA 2½. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 5)

Palosuojamaalilla saadaan paras suojaava vaikutus käyttämällä palosuojamaalien maa-
lausjärjestelmiä, joissa on pohja-, palosuoja- ja pintamaali. Maalausjärjestelmän valin-
nalla voidaan vaikuttaa palosuojamaalauksen ilmasto-, lämpö- ja mekaanisen rasituksen

keston. Pintamaalauksella voidaan parantaa rakenteen korroosionkestävyyttä ja ulkonäköä, mutta ensisijaisesti se suojaa palosuojamaalia mekaaniselta rasitukselta. Pohja- ja pintamaalien tulee olla palosuojamaalin kanssa yhteensopivia ja yhteensopivuuden voi tarkistaa palosuojamaalien tuoteselosteista. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 58–59)

Palosuojamaalit valmistetaan kemiallisista komponenteista, jotka ovat normaalilämpötilassa täysin stabiileja, eivätkä niiden ominaisuudet heikkene rakenteen ikääntyessä merkittävästi. Palosuojamaaleja on vesi- ja liuotinhenteisiä sekä 2- komponenttimaaleja. Erilaiset maalit sopivat erilaisiin olosuhteisiin. Maalin sopivuus tulee tarkistaa valmistajan ohjeista. Esimerkiksi vesiohenteiset maalit kestävät huomattavasti kosteutta kuin liuotinhenteiset tai 2- komponenttimaalit. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 6)

Palosuojamaalaus voidaan toteuttaa konepajalla, työmaalla asennuksen jälkeen tai erillisellä maalausasemalla. Palosuojamaalaus pitää toteuttaa Teräsrakenteiden maalaus 2017-ohjeen mukaan. Teräsrakenteiden palosuojamaalauspaikan valintaan vaikuttaa useampi tekijä. Konepajalla maalaus on helppoa ruiskumaalaamalla optimaalisissa olosuhteissa, mutta maalauksen jälkeen rakenne tulee suojata hyvin kuljetusta varten, sillä palosuojamaalit kestävät huonosti mekaanista rasitusta. Erillisellä maalausasemalla maalaus soveltuu hyvin pulttiliitoksiin koottaville rakenteille, mutta ei työmaalla hitsattaville rakenteille. Hitsiliitokset aiheuttavat palosuojamaalaukselle vaikeasti korjattavia vaurioita ja siksi työmaalla hitsattavat rakenteet olisivat hyvä palosuojamaalata vasta työmaalla. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 7)

Palosuojamaalauksessa on tärkeää, että rakenteelle vaadittu kalvopaksuus täyttyy. Palosuojattujen teräsrakenteiden kalvopaksuus varmistetaan maalauspaikalla mittaamalla. Kalvopaksuus mitataan sähkömagneettisella kuivakalvon paksuusmittarilla. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 66–67) Mittauspisteet valitaan profiiliin mukaan. Esimerkiksi avoimilla profiileilla tehdään 2 mittausta / metri sisä- ja ulkosivuilta, suorakaiteen muotoisilla putkiprofiileilla 2 mittausta / metri kaikilta sivuilta ja pyöreillä putkiprofiileilla 8 mittausta / metri tasaisesti poikkileikkauksen ympäriltä. Profiiliin nurkka-alueiden kalvopaksuus poikkeaa työteknisistä syistä yleensä pintojen kalvonpaksuudesta ja sen vuoksi nurkka-alueilta ei tarvitse mitata kalvopaksuuksia. Tämä kalvopaksuuksien ero ei vaikuta olennaisesti palosuojamaalin toimintaan. Palosuojamaalin kalvopaksuutta mitattaessa tulee ottaa huomioon mahdollinen pohjamaalaus. Pohjamaalin kalvopaksuus tulee määrittää ennen palosuojamaalin levitystä, jotta palosuojamaalin oikea kalvopaksuus voidaan määrittää. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 10)

Palosuojamaaleille tyypillisesti oletettu pitkäaikaiskestävyys on 10–25 vuotta olettaen, että ympäristön rasitus ei muutu merkittävästi. Palosuojamaalattujen rakenteiden pinnat

tulee tarkastaa vähintään kolmen vuoden välein ja havaitut vauriot tulee korjata heti. Palosuojamaalaukseen tulleet pienet (alle 5 cm² vauriot korjataan pintamaalaamalla. Suuremmat vauriot kaavitaan ja teräsharjataan esikäsitteilyasteeseen St 2 ja maalataan maalausjärjestelmän mukaisilla maaleilla vaadittuun kalvopaksuuteen. (Teräsrakenneyhdistys ry 2017, s. 6, 12)

Palosuojamaalin tärkeimpiä materiaaliparametreja ovat lämmönjohtavuus, tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja emissiviteetti/absorptiokyky. Näihin parametreihin vaikuttaa suuresti se, onko maali märkä, kuiva vai paisunut. Tämä vaikeuttaa palosuojamaalien parametrien määrittämistä, koska ei ole selkeää minkä tilan parametreja palosuojamaalauksen mitoituksessa tulisi käyttää. Lämpötilan noustessa palosuojamaali paisuu ja sen tiheys ja lämmönjohtavuus pienenevät (Lucherini 2020, s.15). Palosuojamaalin paisumisen yhteydessä myös ominaislämpökapasiteetin arvo kasvaa (Lucherini 2020, s.107). Emissiviteetti ja absorptiokyky vaikuttavat palosuojamaalin lämpösäteilyyn ja lämmön siirtymiseen. Yleensä nämä ominaisuudet kuitenkin jätetään huomioimatta, koska palosuojamaalin oletetaan olevan termisesti paksua materiaalia. Tällöin palosuojamaalin lämpötilan voidaan olettaa olevan sama kuin palokaasujen lämpötila. (Lucherini 2020, s.72)

Palosuojatun teräksen lämpötila ei ole kovin herkkä paisuvan palosuojamaalin ominaislämpökapasiteetin, tiheyden ja emissiviteetin arvojen vaihtelulle. Sen sijaan lämmönjohtavuuden vaikutus on merkittävä. (Lucherini 2020, s.181) Lämmönjohtavuutta voidaan kuvata usealla eri tavalla, mutta yleisimmin käytössä ovat tehokas lämmönjohtavuus (λ_{eff}) sekä tehokas vakio­lämmönjohtavuus ($\lambda_{eff,const}$). Tehokas lämmönjohtavuus määritetään eurooppalaisella standardin EN 13381-8 (2013) mukaisella arviointimenetelmällä. Menetelmän avulla voidaan lämmönjohtavuudelle määrittää yksinkertainen parametri, joka huomioi palosuojamaalin paisumisen sekä muut palosuojamaalissa esiintyvät ilmiöt. Tehokas vakio­lämmönjohtavuus on vastaavanlainen parametri, mutta sen arvo on määritetty teräsrakenteen palomitoituksen kannalta tärkeällä 400–600 °C lämpötila-alueella. (Lucherini 2020, s.72)

Taulukkoon 2 on koottu eri tutkimuksista kerättyjä palosuojamaalien ominaisuuksia kuvaavia parametreja ja niiden vaihteluvälejä. Lucherini (2020) esittää väitöskirjassaan taulukon, johon on koottu eri tutkimuksien käyttämiä materiaaliparametreja. Wald (2006) taas esittää teräslitosten palolämpötiloja käsittelevässä artikkelissaan vakioarvot 6,5 mm paksuisen paisuneen palosuojamaalin tiheydelle ($\rho = 200 \frac{kg}{m^3}$) ominaislämpökapasi-

teetille ($c_p = 1200 \frac{J}{kg \cdot K}$) sekä lämmönjohtavuudelle ($\lambda_{eff} = 0,1 \frac{W}{m \cdot K}$). Aghayan (2017) ilmoittaa myös vakioarvot palosuojamaalin ominaislämpökapasiteetille ($c_p = 1000 \frac{J}{kg \cdot K}$) sekä tiheydelle ($\rho = 200 \frac{kg}{m^3}$).

Taulukko 2: Palosuojamaalin ominaisuuksia kuvaavien parametrien vaihteluvälejä (Lucherini 2020, s. 71; Wald s.a, s. 5; Aghayan 2017, s. 83)

Palosuojamaalin materiaaliparametrien vaihteluvälejä	
Maalin paisuminen verrattuna kuivakalvopaksuuteen (x kuivakalvon paksuus)	7–100
Tiheys [kg/m ³]	50–1810
Ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)]	840–1884
Lämmönjohtavuus λ_{eff} [W/(m·K)]	0,01–1,6
Lämmönjohtavuus $\lambda_{eff,const}$ [W/(m·K)]	0,01–0,05

Tässä työssä käytetään Hempacore One 43600 palosuojamaalia. Palosuojamaalin tiheys on 1 300 kg/l, joka saadaan tuoteselosteesta (HEMPEL 2016). Kyseinen arvo vastaa nestemäisen paisumattoman maalin tiheyttä ja kuuluu edellä taulukoitujen materiaaliparametrien vaihteluvälille. Palosuojamaalin ominaislämpökapasiteettia ei löytynyt valmistajan tiedoista, joten tutkimuksessa on käytetty eurokoodin mukaista arvoa 1000 J/(kg·K) (SFS-EN 13381-8:2013, s. 71). Aghayan (2017) on käyttänyt vastaavaa arvoa omassa tutkimuksessaan. Valmistajan tiedoissa ei myöskään suoraan esitetty lämmönjohtavuuden arvoa, mutta palosuojamaalin Hempacore One 43600 mitoitustaulukoita vertailemalla saatiin arvioitua lämmönjohtavuuden arvo, jolla päästiin mahdollisimman lähelle mitoitustaulukoiden palosuojamaalauksen paksuuksia. Lämmönjohtavuuden arvoksi arvioitiin 0,008 W/(m·K), joka määritettiin lämpötila-alueella 400–600 °C ja vastasi näin ollen tehokasta vakiolämmönjohtavuuden arvoa ($\lambda_{eff,const}$). (ETA 12/0581) Teräsrakenneyhdistyksen varmennetussa käyttöselosteessa TRY-112-2006 (Teräsrakenneyhdistys 2006) on esitetty Firebreak 303 -nimiselle palosuojamaalille lämmönjohtavuudeksi $\lambda_{eff,const} = 0,0079 \frac{W}{m \cdot K}$, joka on hyvin lähellä Hempacore One 43600 maalille arvioitua arvoa. Arvioitu lämmönjohtavuuden arvo on hieman pienempi kuin taulukossa 2 esitetyn vaihteluvälin alaraja. Kuten edellä esitetystä käy ilmi, palosuojamaalien ominaisuuksien parametreja on vaikea saada selville. Tämän vuoksi luotettavampaa olisi käyttää valmistajien mitoitustaulukoita, etenkin tilanteessa, jossa maalin valmistajalta ei ole mahdollista saada palosuojamaalille määritettyjä tuotekohtaisia parametreja.

2.2 Palosuojalevyt

Palosuojalevyjen suojauskyky perustuu hyvään lämmöneristyskykyyn, lämmönsitomiskykyyn tai näiden yhdistelmään. Levyt kiinnitetään yleensä mekaanisilla liittimillä tai liimaamalla rakenteen pintaan. Levyt voidaan asentaa joko teräsrakennetta myötäillen tai koteloksi sen ympärille. Levytuotteiden asennus on melko vaativaa ja hidasta työtä, koska levyjen saumojen tulee olla niin tiiviitä, etteivät palokaasut ja lämpö pääse suojattavan rakenteen pintaan. (Inha & Mattila 1991, s. 67–68) Palosuojalevyt vaativat huomattavasti suuremman tilan kuin esimerkiksi palosuojamaalaus. Levytys muuttaa myös rakenteen ulkonäköä, mikä tulee huomioida etenkin arkkitehtonisesta näkökulmasta.

2.2.1 Mineraalivillalevyt

Mineraalivillaelementtien palonsuojausominaisuudet perustuvat lämmöneristyskykyyn. Mineraalivillalevy voi olla joko lasi- tai kivivillaa, jonka tiheys on yleensä 100–400 kg/m³ ja suojauksen paksuus 10–120 mm. Palosuojaukseen käytettävien mineraalivillojen sint-raantumislämpötilan tulee olla 800–1100 °C, jotta kuidut eivät sula toisiinsa kiinni jo palon alkuvaiheessa. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 52)

Levyt kiinnitetään mekaanisesti tai liimaamalla yhtenä kerroksena. Koska suojaus toteutetaan yhtenä kerroksena, tulee saumojen tiiveyteen kiinnittää erityistä huomiota. Mekaaninen kiinnitys tapahtuu teräspiikillä, joka hitsataan tai ammutaan teräsrakenteeseen. Tämän jälkeen levyt painetaan teräspiikkien läpi joko profiilia myötäilevästi tai koteloksi sen ympärille. Levyt kiinnitetään toisiinsa vielä harvakierteisillä ruuveilla, nauloilla tai hakasilla. Jos levyihin kohdistuu suurta mekaanista räsitusta, voidaan levyjen paikallaan pysyminen varmistaa vielä levyjen päälle asennettavalla teräslankaverkolla ja verhouksella. (Inha & Iso-Mustajärvi 1997, s. 41) Liimakiinnitys tehdään palamattomalla ja kuumuutta kestäväällä epäorgaanisella liimalla, kuten silikaattiliimalla. Silikaattiliima on kuitenkin vesiliukoinen, jonka vuoksi sitä ei voi käyttää olosuhteissa, joissa lämpötilojen vaihtelu voi aiheuttaa veden tiivistymistä teräksen pintaan. (Inha & Mattila 1991, s. 69–70)

2.2.2 Kipsilevyt ja -elementit

Kipsin paloneristysominaisuudet perustuvat sen sisältämään suureen kidevesimäärään. Palossa lämpöenergiaa kuluu veden lämmittämiseen ja höyrystämiseen ja palon vastakkaisen pinnan lämpötila pysyy alle 100 °C. Kideveden haihduttua levytys rikkoutuu ja

eristysvaikutus lakkaa. Kipsilevyä voidaan kuitenkin vahvistaa lisäämällä esimerkiksi lasikuituja sideaineeksi, joka edesauttaa levyn ehjänä pysymistä veden haihtumisen jälkeen. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 55)

Kipsilevyn tiheys vaihtelee 770–980 kg/m³ välillä ja sitä valmistetaan 13 tai 15 mm paksuina levyinä. Teräsrakenne voidaan suojata joko käyttämällä yhtä tai useampaa kipsilevykerrosta. Kipsilevyt asennetaan yleensä teräsohutlevyprofiilien avulla koteloksi teräsrakenteen ympärille. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 55)

Kipsielementtejä voidaan valmistaa esimerkiksi kipsin, perliitin ja lasikuidun seoksesta. Elementtien paksuudet ovat 20–40 mm ja tiheys on yleensä 670–800 kg/m³. Seoksesta voidaan valmistaa eri muotoisia elementtejä, jotka liimataan työmaalla lämmönkestävällä liimalla suojattavan rakenteen ympärille. (Inha & Iso-Mustajärvi 1997, s. 42) Kipsilevyelementtejä käytetään pääasiassa pilarien palosuojauksessa, koska elementit on helppo valaa esimerkiksi puoliympyrän muotoon ja liimata kaksi elementtiä pyöreän pilarin ympärille. (Inha & Mattila 1991, s. 76)

3. TERÄSRAKENTEEN PALOMITOITUS

Teräs on palamaton materiaali, mutta lämpötilan noustessa se menettää lujuuttansa ja jäykkyyttänsä melko nopeasti. Tämän vuoksi harvoin voidaan käyttää palosuojaamattomia teräsrakenteita kantavina rakenteina. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 221) Tässä luvussa esitetään palosuojaamattoman teräsrakenteen palomitoitus sekä palosuojauksen mitoitus ja suunnittelu.

3.1 Suunnitteluperusteet

Teräsrakenteita mitoitettaessa yleinen vaatimus on, että rakenteiden on kestävä sortumatta niille asetettu palonkesto-aika palotilanteessa (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 221). Palonkesto-aika on teräsrakenteen palonkestävyyden arviointiperuste, joka voidaan määrittää joko kokeellisesti tai laskelmien avulla. Palonkestoajalla tarkoitetaan kantavan teräsrakenteen palon alkamisesta laskettua aikaa, jolloin rakenteen kestävyys on laskenut tietyn rajan alapuolelle tai taipumat ylittävät niille määrättyt raja-arvot. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 6) Palotilanteessa kuitenkin sallitaan suuret muodonmuutokset eikä taipumia tarvitse tarkastella, jos niillä ei ole vaikutusta osastoivien rakenteiden toimintaan (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 243). Rakenteiden kestävyysvaatimukset voivat perustua rakentamismääräyskokoelman paloluokituksiin tai oletettuun palonkehitykseen. Paloluokituksiin perustuvasta kestävyydestä puhutaan standardipalomitoituksena ja oletettuun palomitoitukseen perustuvassa tavassa kyse on toiminnallisesta tarkastelusta. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 221)

Maankäyttö- ja rakennuslain tavoitteena on järjestää alueiden käyttö ja rakentaminen niin, että luodaan edellytykset hyvälle elinympäristölle sekä edistetään ekologisesti, taloudellisesti, sosiaalisesti ja kulttuurisesti kehitystä. Maankäyttö- ja rakennuslaissa määritellään rakentamista koskevat yleiset säännökset ja ohjeet, tekniset vaatimukset sekä lupamenettely ja viranomaisvalvonta. (Ympäristöministeriö 2022) Tämän työn kannalta keskeisimpiä säännöksiä ovat 117 a § rakenteiden lujuus ja vakaus ja 117 b § paloturvallisuus. Maankäyttö- ja rakennuslain rakentamista koskevat säännökset ja määräykset on edelleen koottu ja tarkennettu rakentamismääräyskokoelmaan.

Suomen rakentamismääräyskokoelma sisältää maankäyttö- ja rakennuslain rakentamista koskevat säädökset ja rakentamismääräykset, sekä tarkennuksia näihin säädöksiin ja määräyksiin esimerkiksi ministeriöltä (Ympäristöministeriö 2022). Rakentamismääräyskokoelmassa on lähes sama otsikointitaso kuin maankäyttö- ja rakennuslaissa,

joten tässä työssä keskeisimpiä kohtia ovat rakenteiden lujuus ja vakaus sekä paloturvallisuus.

Eurokoodit ovat kokoelma eurooppalaisia standardeja, jotka käsittelevät kantavien rakenteiden suunnittelua. Niissä määritellään, miten rakenteet suunnitellaan yleisistä kuormista ja periaatteista aina yksityiskohtiin asti. Eurokoodit muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden rakenteiden suunnittelua ja toteutusta varten yhdessä toteutus- ja tuotestandardien kanssa. (Eurokoodit 2021) Teräsrakenteiden palomitoituksessa tärkeimpiä käytettäviä eurokoodeja ovat SFS-EN 1990, SFS-EN 1991-1-2 ja SFS-EN 1993-1-2

Eurokoodien yksi päätehtävä on edistää Euroopan sisäistä kauppaa ja parantaa eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailukykyä. Eurokoodit mahdollistavat myös suunnittelutyön viemisen muihin eurokoodeja käyttäviin maihin helposti, koska maat käyttävät samoja suunnittelustandardeja. Eurokoodien laadinnassa ei kuitenkaan aina ole päästy yhteisymmärrykseen, joten joihinkin kaavoihin on jätetty kansallisia valintoja. Kansalliset valinnat löytyvät kunkin maan kansallisesta liitteestä. Suomessa kansalliset liitteet ovat standardeja ja koska rakentamisen ohjaus tapahtuu yleensä viranomaisten toimesta, ovat kansalliset liitteet myös viranomaisten laatimia. Ympäristöministeriö laatii Suomen kansalliset liitteet talonrakentamisen osalta. (Eurokoodit 2021)

CE-merkinnällä tuotteen valmistaja todistaa, että rakennustuotteen ominaisuudet ovat eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaiset. Rakennustuotteen valmistaja ei saa asettaa markkinoille tuotetta, joka kuuluu harmonisoidun tuotestandardin soveltamisalaan ja jolla ei ole CE-merkintää. CE-merkintä on siis pakollinen niille rakennustuotteille, joille harmonisoitu tuotestandardi on määritetty. Rakennustuotteeseen kiinnitetty CE-merkintä osoittaa, että tuote on testattu harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) mukaisesti ja että tuote on ilmoitetun suoritustason mukainen. (Ympäristöministeriö) Esimerkiksi teräsrakenteet kuuluvat harmonisoidun tuotestandardin piiriin ja siten niiltä pitää löytyä CE-merkintä. CE-merkinnästä löytyy rakennustuotteen ominaisuudet, mutta se ei kuitenkaan takaa tuotteen soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin.

CE-merkinnän tavoitteena on edesauttaa rakennustuotteiden vertailukelpoisuutta, siten että esimerkiksi suunnittelijat ja kuluttajat voivat verrata rakennustuotteiden suoritusosoilmoituksia helposti toisiinsa. Suoritusosoilmoitus on edellytys CE-merkinnän saamiselle. Suoritusosoilmoituksessa tuotteen valmistajan tulee esittää kaikki tuotteen ominaisuuksien arvot, jotka vaaditaan kansallisten viranomaissäädösten täyttämiseen. Vertailun tekee helpoksi yhtenäinen tapa ilmoittaa tuotteen ominaisuudet. Tämä helpottaa myös suomalaisten tuotteiden myymistä Eurooppaan. (Ympäristöministeriö)

ETA-merkintä tarkoittaa eurooppalaista teknistä arviointia. Jos tuotteelle ei ole harmonisoitua tuotestandardia, CE-merkintä ei ole pakollinen. Valmistaja voi kuitenkin hankkia tuotteelle CE-merkinnän ETA:n avulla. ETA on tarkoitettu etenkin uusille, innovatiivisille tuotteille. (Ympäristöministeriö) Esimerkiksi kaikilla käytettävillä palosuojamaaleilla tulee olla ETA-todistus. ETA-todistuksesta selviää esimerkiksi palosuojamaalin parametreja ja niihin on voitu lisätä taulukoita, joiden avulla palosuojamaalin kalvopaksuus voidaan helposti määrittää. Taulukon käyttäminen vaatii usein rakenteen kriittisen lämpötilan sekä poikkileikkaustekijän. Palosuojamaaleilla sekä teräsrakenteilla on siis molemmilla CE-merkintä, mutta teräsrakenteen CE-merkintä saadaan harmonisoidun tuotestandardin mukaan ja palosuojamaalin CE-merkintä ETA:n mukaan.

Rakennukset voidaan jakaa neljään eri paloluokkaan, jotka ovat P0, P1, P2 ja P3. Rakennuksen eri osat voivat kuulua eri paloluokkiin, jos leviäminen toisen paloluokan osaan on estetty palomuurilla. P1 paloluokan rakennuksille on asetettu suurimmat palotekniset vaatimukset. Teräsrakenteita käytetään yleisesti toimisto-, tuotanto- ja varastorakennuksissa, jotka kuuluvat paloluokkiin P1 ja P2. Paloluokkaan P3 kuuluu yksi- ja kaksi kerroksiset omakotitalot, joissa harvemmin käytetään terästä kantavana rakennusmateriaalina. (Ympäristöministeriö 2018)

Kantavien rakenteiden palonkestovaatimus voidaan määrittää rakennuksen palokuorman ja paloluokan perusteella. Kantavan rakennusosan paloluokka koostuu kirjaimista R, E ja I sekä numeroista 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 tai 240. R tarkoittaa kantavuutta, E tiiveyttä ja I eristävyyttä. Kirjainten perässä esitettävä numero kuvaa vaadittua palonkestoaikaa. (Ympäristöministeriö 2018)

Palokuormaa määritettäessä tulee rakennuksen palo-osastojen palokuormaryhmä määrittää. P1- paloluokan rakennuksen palokuormaryhmiä ovat alle $600 \text{ MJ} / \text{m}^2$, $600\text{--}1200 \text{ MJ} / \text{m}^2$ ja yli $1\ 200 \text{ MJ} / \text{m}^2$. Palokuormaryhmä määräytyy rakennuksen käyttötarkoituksen perusteella. Alle $600 \text{ MJ} / \text{m}^2$ ryhmään kuuluvat asunnot, majoitustilat, hoitolaitokset, työpaikatilat, autosuojat, päivähoitolaitokset ja enintään 300 m^2 kokoiset myymälät. $600\text{--}1200 \text{ MJ} / \text{m}^2$ ryhmään kuuluvat asuinrakennusten irtaimistovarastot, enintään 50 m^2 varastot, moottoriajoneuvojen korjaus- ja huoltotilat sekä yli 300 m^2 myymälätilat. Yli $1\ 200 \text{ MJ} / \text{m}^2$ ryhmään kuuluvia tiloja ovat yli 50 m^2 varastotilat, jotka ovat erillisinä palo-osastoina. Tuotanto- ja varastotilojen sekä P0 paloluokan rakennusten palokuorma määritetään kuitenkin kohdekohtaisesti. (Ympäristöministeriö 2018) Rakennuksen paloluokat P0, P1, P2 ja P3 sekä palokuorman määrä vaikuttavat kantavien rakenteiden paloluokkaan. P3-luokan rakennukselle ei ole asetettu vaatimuksia rakennusosan paloluokasta. P2- ja P1-luokan rakennusten kantaville ja runkoa jäykistäville rakenteille on annettu Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta vaatimuksia kantavien

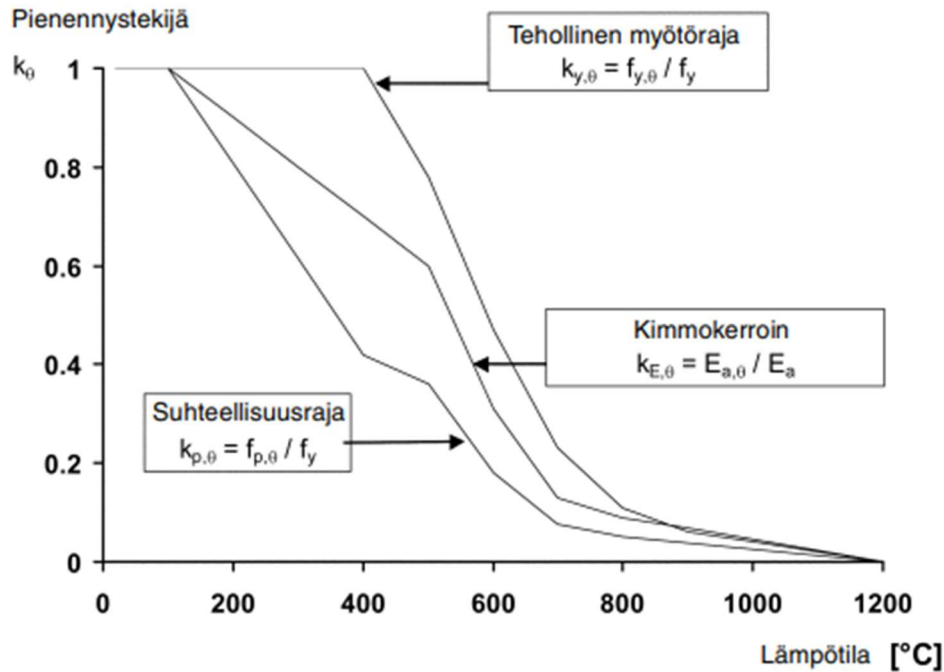
ja jäykistävien rakenteiden luokille. Esimerkiksi P2-luokan yksikerroksisen tuotantorakennuksen, jonka palokuorma on välillä $600\text{--}1\,200\text{ MJ} / \text{m}^2$, kantavien rakenteiden luokavaatimus on R60. (Ympäristöministeriö 2018)

3.2 Teräksen materiaaliominaisuudet

Teräksellä on hyvät lujuus- ja sitkeysominaisuudet verrattuna esimerkiksi puuhun tai teräsbetoniin. Teräs on myös kevyt lujuuteensa verrattuna, jolloin terästä ei tarvitse paljoa riittävän kantavuuden saavuttamiseksi. (BE Group 2020) Teräksen kantokyky heikkenee nopeasti lämpötilan noustessa, koska sen lujuus ja kimmokerroin pienenevät. Teräs myös lämpölaajenee voimakkaasti palossa, mikä johtaa teräksen lujuuden ja kimmokerroimen pienenemisen kanssa pysyviin muodonmuutoksiin. Lämpölaajeneminen voi myös aiheuttaa teräsrakenteelle haitallisia pakkovoimia, eli lisäjännityksiä. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 228–233)

Teräsrakenteen lämpötilan ollessa alle 100 °C voidaan Eurokoodin mukaisessa teräsrakenteiden suunnittelussa käyttää kimmokertoimelle arvoa $E = 210\,000\text{ Mpa}$, liukukertoimelle arvoa $G = 81\,000\text{ Mpa}$, poissonin luvulle arvoa $\nu = 0,3$ ja lineaariselle lämpölaajenemiselle arvoa $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} 1/\text{°C}$ (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 28). Teräksen tiheyden voidaan olettaa olevan riippumaton lämpötilasta ja sille voidaan käyttää arvoa $\rho = 7\,850\text{ kg/m}^3$ (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 21).

Teräksen materiaaliominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa. Esimerkiksi teräksen myötöraja, murtolujuus ja kimmomoduuli alenevat lämpötilan noustessa. Kuormitetun teräsrakenteen viruma alkaa myös kasvaa voimakkaasti, kun lämpötila nousee yli 450 °C :n (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 18) Edellä mainitut lämpötilan muutokset otetaan huomioon alentamalla laskennassa käytettyjä lujuuksia ja jäykkyyskertoimia. Pienennyskertoimien arvot on esitetty lämpötilan funktiona kuvassa 1.



Kuva 1: Lämpötilan vaikutus teräksen myötörajaan ja kimmokertoimeen (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 22).

Kuvassa 1 esitetyt tehollisen myötörajan pienennystekijä $k_{y,\theta}$ sekä kimmokertoimen pienennystekijä $k_{E,\theta}$ lasketaan kaavoilla (1) ja (2).

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}, \quad (1)$$

jossa $f_{y,\theta}$ on teräksen tehollinen myötölujuus lämpötilassa θ ja f_y on teräksen myötölujuus normaalilämpötilassa.

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}, \quad (2)$$

jossa $E_{a,\theta}$ on kimmokerroin lämpötilassa θ ja E_a on teräksen kimmomoduuli normaalilämpötilassa. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 20)

Kuvasta 1 huomataan, että teräksen ominaisuudet alkavat muuttua noin 100 °C kohdalla ja myötöraja on tippunut puoleen noin 590 °C kohdalla. Teräksen koko lujuus menetetään noin 1200 °C kohdalla.

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa kuinka paljon energiaa materiaaliin voi sitoutua. Teräksen ominaislämpökapasiteettia ja lämmönjohtavuutta käytetään teräsrakenteen lämpötilan määrittämisessä. Teräksen ominaislämpökapasiteetti muuttuu lämpötilan muuttuessa. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 229) Esitetään seuraavaksi teräksen ominaislämpökapasiteetin arvot eri lämpötilan arvoilla taulukossa 3.

Taulukko 3: Teräksen ominaislämpökapasiteetin laskenta eri lämpötiloissa (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 24).

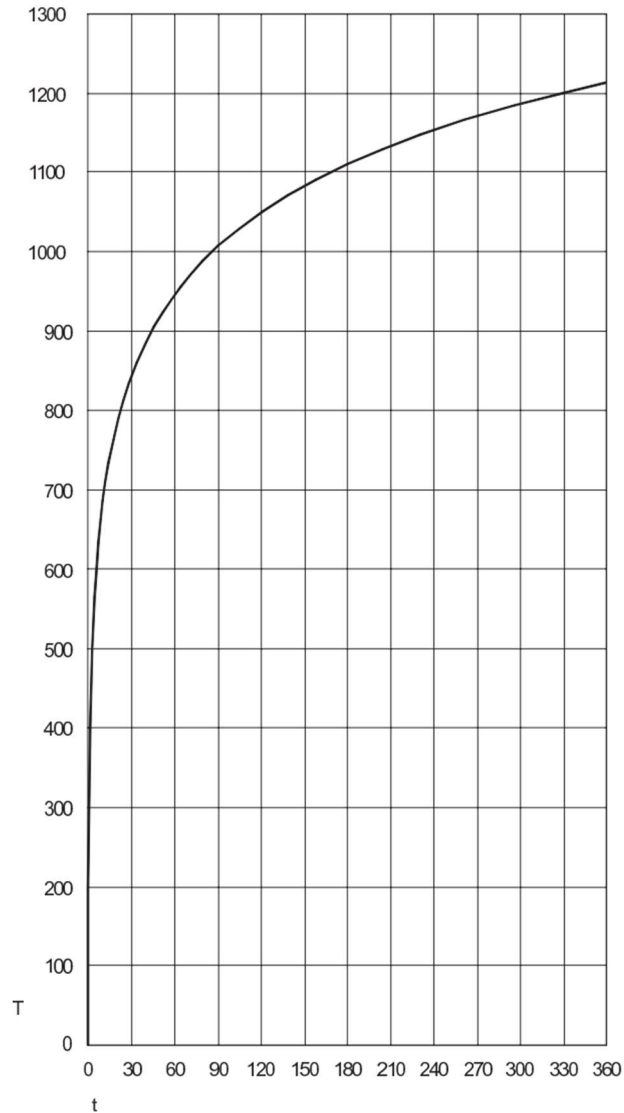
Teräksen lämpötila	Ominaislämpökapasiteetti c_a [J/kg * K]
$20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$	$425 + 7,73 * 10^{-1} * \theta_a - 1,69 * 10^{-3} * \theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6} * \theta_a^3$
$600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$	$666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$
$735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$	$545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$
$900\text{ °C} \leq \theta_a < 1\ 200\text{ °C}$	650

Teräksen lämmönjohtavuus on myös teräksen lämpötilasta riippuva suure. Teräksen lämpötilan ollessa välillä $20\text{ °C} \leq \theta_a < 800\text{ °C}$ voidaan lämmönjohtavuudelle käyttää arvoa $\lambda_a = 54 - 3,33 * 10^{-2} * \theta_a * \frac{W}{m * K}$. Kun teräksen lämpötila nousee välillä $800\text{ °C} \leq \theta_a < 1\ 200\text{ °C}$, voidaan lämmönjohtavuudelle käyttää arvoa $\lambda_a = 27,3 * \frac{W}{m * K}$. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 25)

3.3 Lämpötilan kehittyminen palossa

Tulipalot voidaan jaotella todelliseen, kokeelliseen ja mitoituspaloon. Todellinen palo kuvastaa luonnollisesti parhaiten palotilannetta, mutta sitä on hyvin vaikea mallintaa kaavamuotoon. Kokeellisessa palossa pyritään jäljittelemään todellista paloa koeolosuhteissa. Mitoituspalossa palotilan lämmönkehitys noudattaa tiettyä laskennallista mallia. Näitä malleja ovat esimerkiksi standardipalo ja huonepalo. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 11)

Suomessa teräsrakenteiden palomitoituksessa käytetään yleensä standardipaloa tai huonepaloa (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 12). Tässä työssä käsitellään vain standardipaloa, koska sitä käytetään yleisesti palosuojamaalin mitoituksessa. Standardipalossa palotilan lämpötila kehittyy testistandardin EN 1363-1 mukaisen lämpötiläkäyrän mukaan (kuva 2) (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 226).



Kuva 2: Standardipalokäyrä (SFS-EN 1363-1:2020, s. 34).

Standardipalossa palotilan lämpötila nousee koko palon ajan, eikä palokuorman loppumista ja siitä seuraavaa lämpötilan vähenemistä huomioida mitenkään. Standardipalo on kehitetty kuvaamaan tavanomaista rakennuspaloa, ja sen vuoksi se soveltuu hyvin rakennusmateriaalien ja rakenteiden testaukseen. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 12)

Palomitoituksessa on oleellista tietää palotilan lämpötilan kehitys palon aikana. Palokasujen lämpötila ajan kuluessa voidaan laskea standardipalokäyrän avulla kaavasta (3)

$$\theta_g = 20^{\circ}\text{C} + 345^{\circ}\text{C} * \log_{10}(8 * t + 1), \quad (3)$$

jossa t on aika palon syttymishetkestä minuutteina (SFS-EN 1991-1-2 2003, s. 40).

Teräsrakenteen palolle altistettujen pintojen nettolämpövuon (h_{net}) saadaan summamalla nettolämpövuon kuljettumalla ja säteilemällä siirtyvät osat yhteen. Nettolämpövuon kuljettumalla siirtyvä osa voidaan laskea kaavasta (4)

$$h_{net,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m), \quad (4)$$

jossa $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2 * \text{K}$ on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin, θ_g on palotilan kaasun lämpötila ja θ_m on teräsosan lämpötila edellisellä ajanhetkellä. (SFS-EN 1991-1-2 2003, s. 38)

Nettolämpövuon säteilemällä siirtyvä osa saadaan vastaavasti laskettua kaavalla (5)

$$h_{net,r} = \Phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_g + 237)^4 - (\theta_m + 273)^4], \quad (5)$$

jossa $\Phi = 1$ on näkyvyyskerroin, $\varepsilon_m = 0,7$ on teräsrakenteen pinnan säteilykerroin (SFS-EN 1993-1-2, s. 17), $\varepsilon_f = 1,0$ on palon säteilykerroin ja $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 * \text{K}^4$ on Stefan-Boltzmann- vakio. Kaavassa esiintyvät lämpötilat θ_g ja θ_m ovat samat kuin kaavassa 4, eli palotilan kaasun lämpötila kyseisellä hetkellä ja teräsosan lämpötila edellisellä ajanhetkellä. (SFS-EN 1991-1-2 2003, s. 40)

Suojaamattoman teräsrakenteen poikkileikkauksen lämpötilan nousu voidaan edelleen laskea kaavasta (6), kun poikkileikkauksessa vallitsee ekvivalentti tasainen lämpötilajakauma.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{A_m/V}{c_a * \rho_a} * h_{net} * \Delta t, \quad (6)$$

jossa k_{sh} on varjostusvaikutuksen korjaustekijä, mikä voidaan laskea kaavalla (7), c_a on lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti, $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ on teräksen ominaistiheys, h_{net} on palolle altistuneiden pintojen lämpövuon ja Δt on laskennan aikaväli. Suojaamattoman teräsrakenteen laskennassa on huomioitava, että aikaväli Δt pitää olla pienempi tai yhtä suuri kuin 5 s.

$$k_{sh} = \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V}, \quad (7)$$

jossa $(A_m/V)_b$ on profiilin ympärille kuvitellun kotelon poikkileikkaustekijä ja A_m/V on teräsrakenteen poikkileikkaustekijä. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 35)

Palosuojatun teräsrakenteen lämpötilaa laskettaessa kaavoissa esiintyy termi ϕ , mikä kuvaa palosuojamateriaaliin varastoitunutta lämpömäärää verrattuna teräksen varastoitamaan lämpömäärään. Tämä termi voidaan laskea kaavalla (8).

$$\phi = \frac{c_p * \rho_p}{c_a * \rho_a} * d_p * A_p/V, \quad (8)$$

jossa c_p on palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti, ρ_p on palosuojamateriaalin tiheys, c_a on lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti.

siteetti ja ρ_a on teräksen ominaistiheys. Lisäksi kaavassa esiintyy d_p , mikä on palosuojamateriaalin paksuus ja A_p/V , mikä on palosuojamateriaalilla eristetyn terässauvan poikkileikkaustekijä. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 37)

Lämpötilojen varastoitumisen suhteen laskemisen jälkeen voidaan laskea suojatun teräsrakenteen poikkileikkauksen lämpötilan nousu kaavalla (9).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p * A_p / V}{d_p * c_a * \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \frac{\phi}{3})} * \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) * \Delta\theta_{g,t}, \quad (9)$$

jossa λ_p on palosuojamateriaalin lämmönjohtavuus, Δt on laskennan aikaväli, $\theta_{g,t}$ on palotilan lämpötila ajanhetkellä t , $\theta_{a,t}$ on teräsosan lämpötila ajanhetkellä t ja $\Delta\theta_{g,t}$ on palotilan lämpötilan nousu ajanjakson Δt aikana. Palosuojatun teräsrakenteen laskennassa on huomioitava, että aikaväli Δt pitää olla pienempi tai yhtä suuri kuin 30 s. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 37) Palosuojamaalin tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus saadaan palosuojamaalin valmistajalta. Usein tiheys esitetään palosuojamaali tuotetiedoissa, mutta ominaislämpökapasiteettia ja lämmönjohtavuutta on vaikeampi saada selville. Niitä voi kysyä esimerkiksi suoraan palosuojamaalin valmistajalta. Palosuojamaalia käytettäessä kaavassa (9) esiintyvä paksuus d_p tarkoittaa palosuojamaalin kuivakalvopaksuutta.

3.4 Mitoitusmenetelmät

Palomitoitus voidaan toteuttaa kolmella eri mitoitusmenetelmällä: taulukkomitoituksella, yksinkertaisilla laskentamalleilla tai kehittyneillä laskentamalleilla. Taulukkomitoitus on standardipalotilanteessa käytetty mitoitusmenetelmä, jossa käytetään hyväksi tuotevalmistajien mitoitustaulukoita. Mitoitustaulukoista saadaan rakenteelle palonkesto aika poikkileikkaustekijän sekä kriittisen lämpötilan avulla. Taulukkomitoitus soveltuu vain hyvin yksinkertaisten rakenteiden, kuten palkin, laskentaan. Taulukkomitoitus ei sovellu puristettujen rakenneosien mitoitukseen, sillä taulukot eivät ota huomioon esimerkiksi rakenteen hoikkuutta. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 242–246)

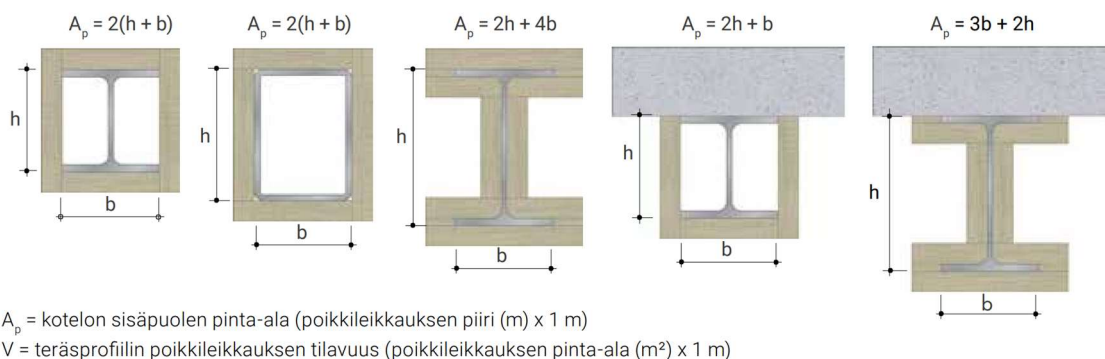
Yksinkertaiset laskentamallit perustuvat määrättyyn kriittiseen lämpötilaan. Jos rakenteen lämpötila pysyy kriittistä lämpötilaa alempana, rakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Tämä ehto toteutuu, jos kriittisen lämpötilan saavuttamisen kuluva aika on pidempi kuin vaadittu palonkesto aika. Yksinkertaisissa laskentamalleissa lämpötilajakauma oletetaan tasaisesti jakaantuneeksi koko profiilille ja on sen vuoksi soveltuva vain yksittäisten rakenneosien tarkasteluun. Yksinkertaisia laskentamalleja voidaan käyttää myös tarkentamaan taulukkomitoitusta ja saamaan siten pienempiä palosuojauspaksuuksia. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 242–246)

Kehittyneempien laskentamenetelmien, eli toiminnallisen palomitoituksen, laskennasta saadaan yleensä tulokseksi rakenteen muodonmuutokset koko palon aikana. Muodonmuutosten avulla voidaan arvioida hyvinkin tarkkaan rakenteen käyttäytymistä palon aikana. Tämä edelleen mahdollistaa tapauskohtaisten paloturvallisuuskriteerien asettamisen rajoitettujen muodonmuutosten ja rakenteen vaurioitumisen perusteella. (Teräsraakeneyhdistys 2020, s. 247–248)

3.5 Poikkileikkaustekijä

Teräsosan lämpötilan nousuun palotilanteessa vaikuttaa suuresti sen poikkileikkaustekijä A_m / V tai A_p / V . Suojaamattomilla teräsrakenteilla käytetään poikkileikkaustekijää A_m / V , jossa A_m on teräsosan palolle altis pinta-ala ja V on teräsosan tilavuus. Eli poikkileikkaustekijä on palolle alttiin pinta-alan suhde sen tilavuuteen. Palosuojattujen teräsosien poikkileikkaustekijä on A_p / V , missä A_p on palosuojauksen palon vastaisen pinnan pinta-ala. Mikäli poikkileikkaustekijä on vakio kaikissa tarkasteltavan teräsosan poikkileikkauksissa, poikkileikkaustekijä pelkistyy teräsosan poikkileikkauksen palolle alttiin piiriin ja pinta-alan suhteeseen (P / A). (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 38)





Poikkileikkaustekijän arvo riippuu siis suuresti käytetystä teräsprofiilista ja palosuojauksesta, sekä palolle altistumattomien pintojen määrästä. Yleisesti teräsprofiilin kotelointi heikentää poikkileikkaustekijää valssatuilla profiileilla. Näitä profiileja koteloidaessa teräsosan ja koteloinnin väliin jää helposti tyhjää ilmatilaa, joka palotilanteessa lämpenee ja heikentää palosuojauksen tehokkuutta. Putkiprofiilien koteloinnissa taas kulmapyöristyksillä on vaikutus poikkileikkaustekijään. Jos palosuojauksen kulmat ovat pyöristetty poikkileikkaustekijä on hieman pienempi kuin terävillä kumilla. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 38–46)



Kuva 3: Palolle alttiin pinta-alan laskeminen (Paroc 2019, s. 5).

Palosuojaus voi joko myötäillä teräsprofiilin pintaa tai muodostaa kotelon sen ympärille kuvan 3 mukaisesti. Palosuojamaalauksessa suojaus myötäilee teräsprofiilia, jolloin saadaan mahdollisimman hyvä palosuojaus sekä vaihtoehtoista paras poikkileikkaustekijä. Poikkileikkaustekijöitä on usein taulukoitu palosuojaukselle palosuojausmateriaalin sekä suojaamattomalle teräsprofiilille sen valmistajan ohjeessa. Esimerkiksi taulukossa 4 on esitetty HEA-profiilin poikkileikkaustekijöitä eri palosuojausmenetelmillä.

Taulukko 4: HEA-profiilien poikkileikkaustekijät (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 39).

HEA				
	F/V ja F _r /V [m ⁻¹]	F/V ja F _r /V [m ⁻¹]	F _r /V [m ⁻¹]	F _r /V [m ⁻¹]
100	264,8	217,6	184,9	137,7
120	267,7	220,3	185,0	137,5
140	253,0	208,4	173,9	129,3
160	233,6	192,3	160,8	119,6
180	226,1	186,4	155,0	115,2
200	211,2	174,0	145,0	107,8
220	195,2	161,0	133,7	99,5
240	178,2	147,0	122,4	91,1
260	170,9	141,0	117,5	87,6
280	164,7	136,0	113,1	84,3
300	152,6	125,9	104,9	78,2
320	141,1	117,0	98,1	74,0
340	134,4	112,0	94,4	71,9
360	128,4	107,4	91,0	70,0
400	120,2	101,4	86,8	67,9
450	113,0	96,1	83,1	66,3
500	106,8	91,6	80,0	64,8
550	104,3	90,1	79,3	65,2
600	101,9	88,6	78,6	65,3
650	99,6	87,2	77,8	65,4
700	96,1	84,6	76,0	64,5
800	94,4	83,9	76,3	65,8
900	90,4	81,0	74,3	64,9
1000	89,3	80,6	74,4	65,7

3.6 Teräsrakenteen palonkestävyys ja kriittinen lämpötila

Teräsrakenteen palonkestävyydellä tarkoitetaan rakennusosan kykyä täyttää sille asetetut kantavuus ja osastoivuus vaatimukset määrätyn ajan määritellyssä palossa. Teräsrakenteen palonkestävyys voidaan osoittaa joko tarkastelemalla lujuutta, lämpötilaa tai aikaa. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 244) Eurokoodi sallii lujuuden ja lämpötilan käyttämisen vaihtoehtoisina tarkastelusuureina ja aikaa käytettäessä joudutaan käyttämään kehittyneitä laskentamenetelmiä (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 26, 41). Teräsrakenteen palonkestävyys voidaan todeta käyttämällä lujuutta tarkastelusuurena, jolloin kaavan (10) mukainen ehto tulee olla voimassa.

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (10)$$

Missä $E_{fi,d}$ on kuormien vaikutusten mitoitusarvo palotilanteessa (esimerkiksi $M_{Ed,fi}$ tai $N_{Ed,fi}$) ja $R_{fi,d,t}$ on teräsojan vastaava kestävyys mitoitusarvo palotilanteessa ajanhetkellä t (esimerkiksi $M_{fi,t,Rd}$ tai $N_{fi,t,Rd}$). (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 244)

Kestävyyden mitoitusarvo $R_{fi,d,t}$ määritetään käyttämällä hyväksi normaalilämpötilassa laskettua kestävyys mitoitusarvoa ja ottamalla huomioon teräksen mekaanisten ominaisuuksien muuttuminen korkeissa lämpötiloissa. Kun teräsojan lämpötila θ tiedetään ajanhetkellä t voidaan kuvan 1 tai kaavojen (1) ja (2) avulla selvittää pienennyskerroimet, joiden avulla saadaan laskettua kestävyys mitoitusarvo. Esimerkiksi vetosauvan kestävyys voidaan laskea kaavasta (11).

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} * N_{Rd} * \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \quad (11)$$

Missä $k_{y,\theta}$ on teräksen myötörajan pienennyskerroin lämpötilassa θ ja N_{Rd} on poikkileikkauksen kestävyys mitoitusarvo huoneenlämpötilassa. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 244)

Käytettäessä lämpötilaa palonkestävyyden tarkastelualueena, verrataan tulipalotilanteen lämpötilaa lämpötilaan, jolloin rakenne menettää kantavuutensa. Tätä lämpötilaa kutsutaan kriittiseksi lämpötilaksi ja mitoitusehto saa muodon (kaava 12)

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}, \quad (12)$$

missä θ_d on materiaalin lämpötilan mitoitusarvo palotilanteessa ja $\theta_{cr,d}$ on materiaalin kriittisen lämpötilan mitoitusarvo. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 244)

Rakenteen kriittinen lämpötila kuvaa teräksen lämpötilaa, jossa sen myötölujuus on alentunut kuormitusten aiheuttaman jännityksen suuruisiksi. Kriittisen lämpötilan arvoon vaikuttaa rakennemalli, aineominaisuudet ja rakenteeseen kohdistuvat kuormat. Palkeille kriittinen lämpötila määräytyy usein taivutus- ja leikkauskestävyyden ja pilareille normaaliavoimakestävyyden perusteella. (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, s. 37)

Rakenteen kriittinen lämpötila voidaan laskea kaavasta (13), kun siirtymäehtoja tai stabiilisuutta ei tarvitse ottaa huomioon ja terässauvan lämpötilajakauma on tasainen.

$$\theta_{cr,d} = 39,19 * \ln\left(\frac{1}{0,9674 * \mu_0^{3,833}} - 1\right) + 482^\circ C, \quad (13)$$

jossa μ_0 on hyväksikäyttöaste. Hyväksikäyttöaste voidaan laskea kahdella eri tavalla. Poikkileikkausluokkiin 1, 2 tai 3 kuuluvien sauvojen ja kaikkien vedettyjen sauvojen hyväksikäyttöaste μ_0 ajanhetkellä $t = 0$ voidaan laskea kaavasta (14).

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \geq 0,013, \quad (14)$$

jossa $E_{fi,d}$ on kuorma palotilanteessa ja $R_{fi,d,0}$ on teräsrakenteen kestävyys ajanhetkellä $t = 0$ palotilanteessa. Poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvien ohutseinämäisten sauvojen kriittisen lämpötilan voidaan todeta ilman erillistä selvitystä olevan 350 °C (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 33–34)

Vaihtoehtoisesti varmalla puolella oleva hyväksikäyttöaste vedetyille sauvoille ja palkeille, joilla kiepahdus ei ole potentiaalinen murtumismuoto voidaan laskea kaavasta (15).

$$\mu_0 = \eta_{fi} * \left(\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right), \quad (15)$$

jossa η_{fi} on mitoituskuoman pienennystekijä palotilanteessa, $\gamma_{M,fi}$ on materiaalin osavarmuuskerroin palotilanteessa ja γ_{M0} on materiaalin osavarmuuskerroin normaalilämpötilassa. (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 34)

Kestävyyden mitoitusarvo ajan hetkellä $t = 0$ lasketaan käyttäen materiaali osavarmuuskerrointa $\gamma_{M,fi} = 1,0$. Materiaalin lujuutta ei lähtökohtaisesti pienennetä pienennystekijällä, mutta jos rakenteen stabiilisuus on mukana tarkasteluissa, tulee pienennystekijä ottaa huomioon muunnetun hoikkuuden arvoa laskettaessa. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 245) Tämä johtaa siihen, että kriittisen lämpötilan laskennasta tulee iteratiivinen prosessi, kun stabiilisuus on mukana.

Rakenteille, joille stabiilisuus tulee tarkastaa mitoittaessa, ei voida käyttää suoraan edellisen kohdan kriittisen lämpötilan laskentakaavaa. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi rakenteet, joiden kantavuuteen vaikuttavat lämpötilasta riippuva lujuus ja kimmokerroin. Esimerkiksi pilarin nurjahduskestävyys ja palkin kiepahduskestävyys lasketaan iteratiivisella prosessilla. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 245–246)

Iteratiivisessa mitoituksessa määritetään ensin kuormien vaikutusten mitoitusarvo ja määritetään poikkileikkausluokka palotilanteessa, kuten aikaisemminkin. Tämän jälkeen ensimmäinen iteraatiokierros aloitetaan määrittämällä teräsrakenteen aloituslämpötila 20 °C:een ja selvittämällä lujuuden sekä kimmokertoimen pienennystekijät ($k_{y,\theta}$ ja $k_{E,\theta}$). Pienennystekijän jälkeen saadaan laskettua taivutusnurjahduksen tai kiepahduksen pienennystekijät (χ_{fi} tai $\chi_{LT,fi}$). Nyt saadaan laskettua kestävyuden mitoitusarvo ajanhetkellä $t = 0$. Tämän jälkeen lasketaan hyväksikäyttöaste μ_0 kaavalla (14) ja edelleen kriittinen lämpötila kaavalla (13). Tämän jälkeen aloitetaan uusi iteraatiokierros asettamalla edellisen kierroksen laskettu kriittinen lämpötila teräksen lämpötilaksi ja lasketaan uudelleen pienennystekijät, kestävyys, hyväksikäyttöaste ja kriittinen lämpötila. Iterointia

jatketaan, kunnes kahden peräkkäisen iteraatiokierroksen kriittiset lämpötilat ovat riittävän lähellä toisiaan. Lopuksi voidaan todeta tämän lämpötilan olevan rakenteen kriittinen lämpötila. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 246)

3.7 Palotilanteen kuormitusyhdistelmät

Palotilanteessa käytetään kaavan (16) mukaista onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmää.

$$\sum_{j \leq 1} G_{k,j} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ tai } \psi_{2,1}) * Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,1} * Q_{k,i}, \quad (16)$$

missä $G_{k,j}$ on pysyvän kuorman ominaisarvo, A_d on onnettomuuskuorman mitoitusarvo, $\psi_{1,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ψ_1 , $\psi_{2,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ψ_2 , $Q_{k,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo ja $Q_{k,i}$ on muun samanaikaisen muuttuvan kuorman arvo. (SFS-EN 1990 2006, s. 84)

Yhdistelykerrointa $\psi_{1,1}$ käytetään, kun määräävä muuttuva kuorma on lumi-, jää- tai tuulikuorma. Muutoin käytetään yhdistelykerrointa $\psi_{2,1}$. Yhdistelykertoimien arvot löytyvät SFS EN-1990 standardin kansallisesta liitteestä ja alla taulukosta 5. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 222)

Taulukko 5: Yhdistelykertoimien arvot rakennuksille (Ympäristöministeriö 2016, s. 18).

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6 ^{**})
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3 ^{**})
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} kun			
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{***)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huomaus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. ^{**}) Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$ ^{***}) Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia			

Palotilanteen kuormien määrittämiseksi on myös yksinkertaistettu menetelmä. Yksinkertaistettu menetelmä olettaa kuormien pysyvän vakiona tulipalon aikana. Kuormien vaikutukset voidaan siten laskea kaavalla (17).

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} * E_d, \quad (17)$$

missä E_d on normaalilämpötilamitoitusta vastaavan rasituksen mitoitusarvo kuormien perusyhdistelmälle ja η_{fi} on mitoituskuorman tason pienennystekijä palotilanteessa, joka voidaan laskea kaavasta (18).

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} * Q_{k,1}}{\xi * \gamma_{MG} * G_k + \gamma_{MQ,1} * Q_{k,1}}, \quad (18)$$

missä keroimelle ψ_{fi} käytetään arvoa $\psi_{1,1}$ tai $\psi_{2,1}$ edellä esitetyn mukaisesti. Lisäksi G_k on pysyvän kuorman ominaisarvo, $Q_{k,1}$ on määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo, γ_{MG} ja $\gamma_{MQ,1}$ ovat pysyvän- ja muuttuvan kuorman osavarmuuskertoimet ja ξ on epäedullisen pysyvän kuorman pienennystekijä. (Teräsrakenneyhdistys 2020, s. 222)

3.8 Palosuojauksen suunnittelu ja mitoitus

Kantavien ja jäykistävien rakennusosien palomitoitus sekä palosuojaus tulee suunnitella siten, että osat eivät aiheuta sortumisen vaaraa määrättyinä aikana palon alusta. Kantavien rakenteiden R-luokkavaatimus määrittelee ajan, jonka rakenteen tulee kestää palossa sortumatta. Luokkavaatimus vaihtelee 30–240 minuutin välillä riippuen rakennuksen koosta, paloluokasta, ja käyttötarkoituksesta. (Ympäristöministeriö 2022)

Palosuojauksen suunnittelu voidaan aloittaa, kun tiedetään R-luokan määrittelemä vaadittu palonkestävyysaika. Tätä ajanhetkeä t vastaava palotilan lämpötila $\theta_{g,t}$ saadaan laskettua kaavasta (3), kun mitoituspalona käytetään standardipaloa. Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötila saadaan selville käyttämällä kaavaa (6) ja tätä lämpötilaa käytetään lämpötilan mitoitus arvona θ_d . Lämpötilojen selvittämisen jälkeen voidaan ratkaista teräksen mitoituslämpötilaa vastaavat lujuuden ja kimmokertoimen arvot kaavojen (1) ja (2) pienennyskertoimien avulla. Tämän jälkeen rakenneosan kestävyys voidaan laskea vetosauvalle kaavan (11) mukaan ja muun tyyppisille rakenteille standardin SFS-EN 1993-1-2 mukaan. Jos kestävyystarkasteluissa tulee huomioida stabiilisuus ilmiöt, kestävyuden laskemisessa pitää käyttää kohdan 3.6 mukaista iteratiivista menetelmää.

Teräsrakenteen kestävyuden jälkeen lasketaan kohdan 3.7 mukaisten kuormien aiheuttamien rasitusten mitoitusarvot ja verrataan kestävyyttä mitoitusarvoihin kohdan 3.6 mukaisesti. Esimerkiksi jos käytetään kriittisen lämpötilan menetelmää, lasketaan kuormitustasoa vastaava hyväksikäyttöaste μ_0 kaavan (14) mukaan. Tämän jälkeen ratkaistaan kriittinen lämpötila $\theta_{cr,d}$ kaavasta (13) ja verrataan sitä rakenneosan lämpötilaan θ_d . Teräsrakenne kestää suojaamattomana, jos kohdan 3.6 mitoitusehto täyttyy. Jos mitoitusehto ei täyty, tulee rakenne palosuojata tai profiilia kasvattaa.

Jos teräsrakenne pitää palosuojata, valitaan ensin palosuojausmenetelmä. Palosuojautavan valinnan jälkeen pitää laskea teräksen lämpötila uudestaan palosuojattuna rakenteena. Palosuojatun profiilin poikkileikkaustekijä sekä palosuojausmateriaalin ominaisuudet vaikuttavat nyt teräsrakenteen lämpötilan nousuun. Suojatun teräsrakenteen lämpötila saadaan laskettua kaavan (9) avulla. Kun palosuojatun teräsrakenteen lämpötila on saatu selville, voidaan sitä verrata taas rakenteelle määritettyyn kriittiseen lämpötilaan. Jos suojatun rakenteen lämpötila jää alle kriittisen lämpötilan vaaditun palonkestoaajan aikana, suojaus voidaan hyväksyä. Jos taas rakenteen lämpötila nousee yli kriittisen lämpötilan vaaditun palonkestoaajan aikana, tulee palosuojaukseen parantaa.

Haastattelujen perusteella teräsrakenne mitoitetaan yleensä ensin normaalilämpötilassa, minkä jälkeen selvitetään rakenteen palotilanteen kuormituksia vastaava kriittinen

lämpötila. Tämän jälkeen normaalilämpötilassa mitoitettujen rakenteiden piirustukset ja palomitoituksesta saatu kriittisen lämpötilan arvo lähetetään konepajalle, joka määrittää edelleen rakenteeseen palosuojauksen. Tämä ei kuitenkaan ole välttämättä taloudellisin keino määrittää palosuojaus. Palosuojamaalaus saattaa edustaa huomattavan suurta osaa teräsrakenteen valmistuskustannuksista, jolloin voi olla taloudellisempaa kasvattaa teräsprofiilin kokoa kuin palosuojamaalauksen paksuutta. Tämä tosin kasvattaa rakenteen painoa, mikä voi olla ongelma joissakin tapauksissa. Voisikin olla taloudellisesti kannattavampaa keskittyä jo rakenteen normaalilämpötilassa tapahtuvan mitoituksen ja kriittisen lämpötilan määrittämisen ohella palosuojamaalauksen optimointiin kuin antaa konepajan määrittää suoraan palosuojamaalaus annetun profiilin ja kriittisen lämpötilan avulla.

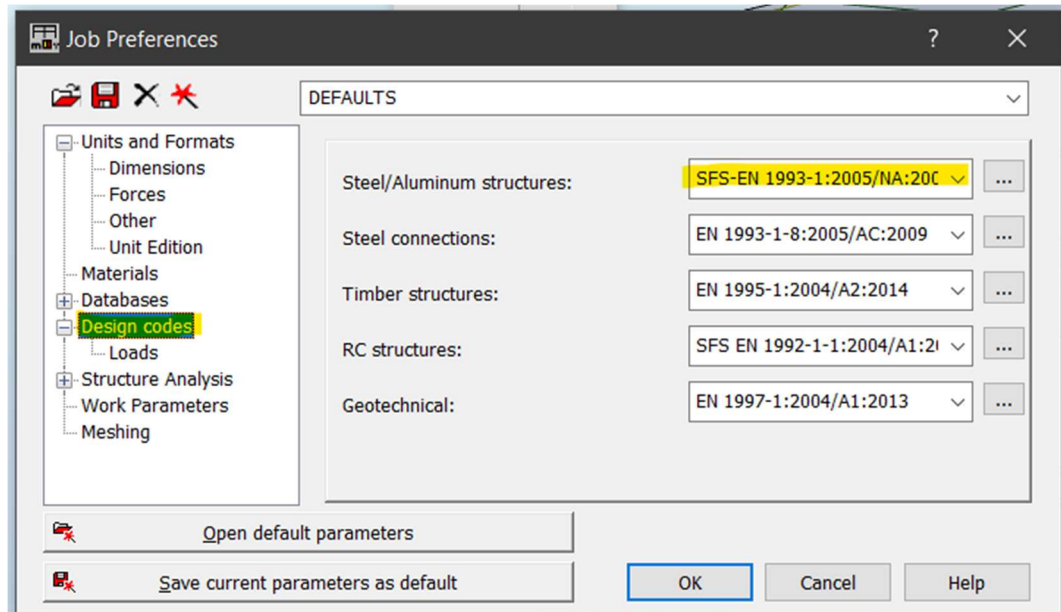
3.9 Teräsrakenteiden palomitoitus Autodeskin Robot Structural Analysis Professional -ohjelmalla

Robot on laskenta- ja mitoitusohjelma, jolla voidaan tehdä lujuusanalyysiä ja rakenteiden mitoitusta. Ohjelma on rakennesuunnittelijoille tarkoitettu ja se soveltuu teräs-, puu- ja betonirakenteiden mitoittamiseen. Robotilla voidaan mitoittaa lähes kaikkea aina pienistä yksittäisistä rakenneosista kokonaiisiin rakennuksiin. (Autodesk 2014) Robotin teräsrakenteiden palomitoitus perustuu joko Eurokoodiin SFS-EN 1993-1-2 tai ECCS:n (European Convention for Constructional Steelwork) TC3 standardiin (Autodesk 2020a).

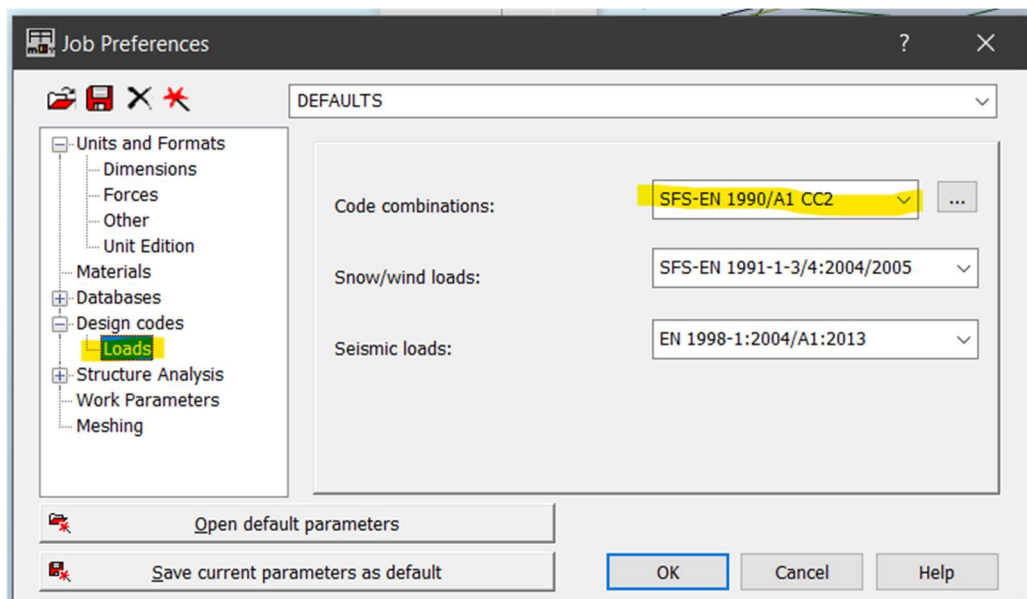
Robotilla kannattaa lähtökohtaisesti tehdä palomitoitus vain silloin, kun palomitoitettava rakennuksesta on tehty jo rakennemalli Robotilla. Robotilla tehtävän palomitoituksen lähtökohtana voisi siis pitää tilannetta, jossa rakennemalli on jo luotu ja malliin on syötetty tarvittavat kuormat sekä normaalilämpötilan mitoitus suoritettu. Tämä normaalilämpötilassa oleva malli kannattaa kopioida omaksi tiedostokseen palomitoitusta varten, koska joitakin rakenneosien parametreja joudutaan muuttamaan palomitoitusta varten.

Kun lähdetään tekemään palomitoitusta Robotilla, ensimmäisenä on hyvä tarkistaa, että oikeat standardit ovat käytössä. Standardit voi tarkistaa Tools-välilehdeltä Job Preferences kohdasta. Täältä tulee tarkistaa, että kuvissa 4 ja 5 esitetyt kohdat ovat oikein. Robotista saadaan valittua käyttöön maakohtaiset vaatimukset painamalla eurokoodin kohdan oikealla puolella olevaa kolmea pistettä. Täältä voidaan valita käyttöön esimerkiksi Ruotsin kansalliset vaatimukset. Tässä työssä käytetään Suomen kansallisia ohjeita. Kuormia määräävän standardin voi myös muuttaa esimerkiksi Ruotsissa käytettävien standardien mukaiseksi valitsemalla kuvan 5 code combinations -alasvetovalikosta

more. Tämän jälkeen avautuu ruutu, josta voidaan edelleen etsiä Ruotsin standardeja vastaava standardi.

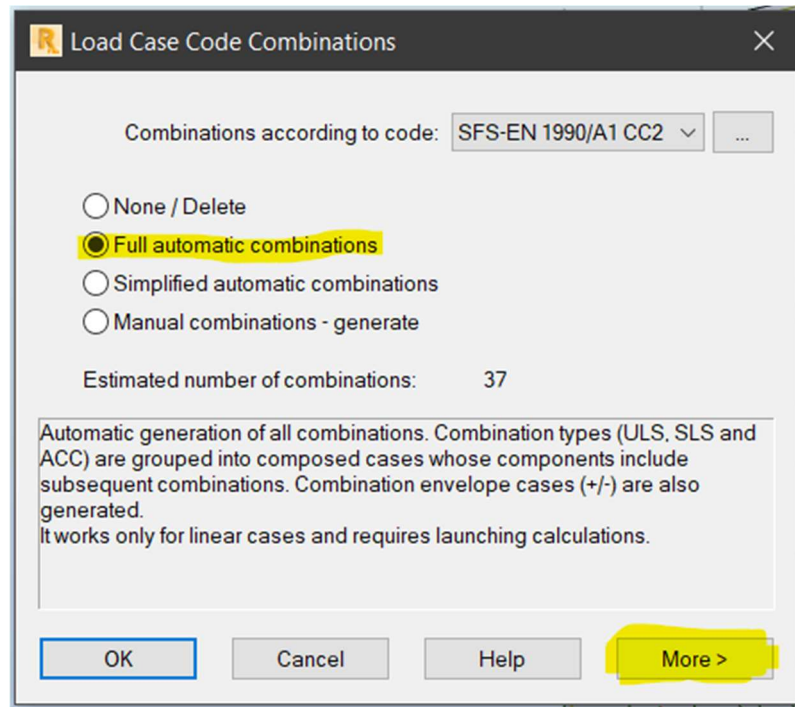


Kuva 4: Teräs/Alumiini rakenteiden laskentastandardin valinta.

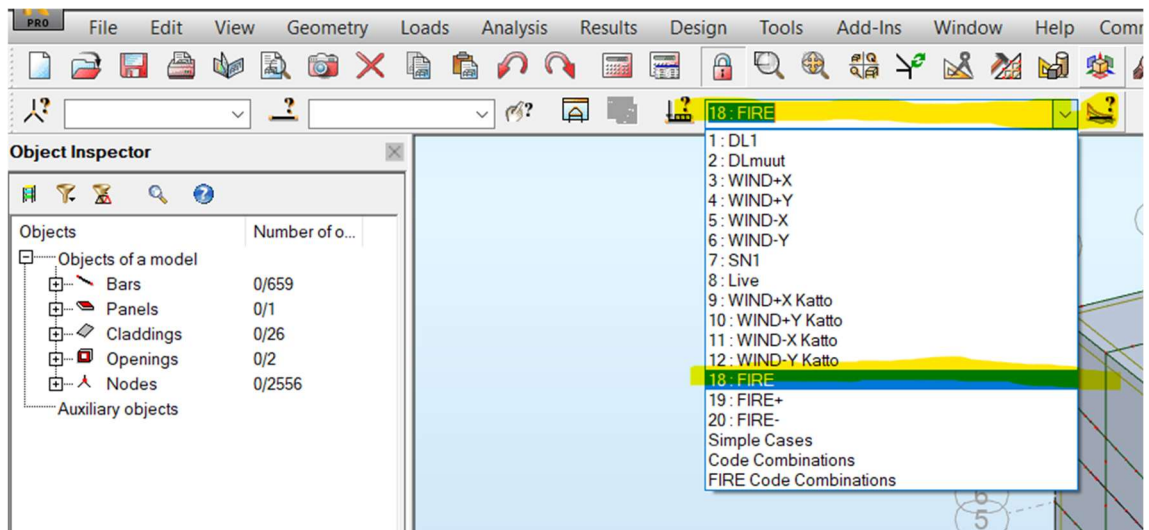


Kuva 5: Kuormitusyhdistelyjä määrävän standardin valinta.

Seuraavaksi voidaan luoda palotilanteen kuormitusyhdistelyt. Kuormitusyhdistelyt löytyvät Loads-välilehden alta, josta valitaan Automatic Combinations. Aukeavasta valikosta valitaan edelleen Full Automatic Combinations (kuva 6), joka luo automaattisesti kaikki kuormitusyhdistelmät. Nyt More-valikosta voidaan karsia kaikki muut kuormitusyhdistelmät pois paitsi palo. Tämän jälkeen painetaan Generate, jolloin Robot luo palotilanteen kuormitusyhdistelmät automaattisesti. Kaikki luodut kuormitusyhdistelmät löytyvät nyt Robotin yläpalkin alavetovalikosta (kuva 7).



Kuva 6: Automaattisten kuormitusyhdistelmien valintaikkuna.



Kuva 7: Lista kaikista luoduista kuormitustapauksista ja kuormitusyhdistelyistä.

Kuormitusyhdistelmien määrittämisen jälkeen voidaan siirtyä Steel / Aluminium designvälilehdelle. Nyt oikeasta reunasta saadaan auki Steel Member Type -valikko. Tässä valikossa voidaan määrittää rakenneosien parametreja. Nämä parametrit tulisi olla määritettynä jo oikein normaalilämpötilassa tapahtuvan mitoituksen takia. Jos teräsrakenteelle halutaan määrittellä palomitoitukseen liittyviä parametreja, nämä annetaan aktivoimalla kuvassa 8 esitetyn Member Definition -valikon alareunassa sijaitseva valinta Fire analysis parameters. Tämän jälkeen Fire-painikkeella pääsee muokkaamalla palotilanteen parametreja.

Member Definition - Parameters - SFS-EN 1993-1:2005/NA:2007/...

Member type: VV_Pääpilari

Buckling (y axis) Member length ly: 5,000 m

Buckling (z axis) Member length lz: 5,000 m

Buckling length coeff. y: Auto Sway

Buckling length coeff. z: Auto Sway

Buckling curve y: auto

Buckling curve z: auto

Flexural-torsional buckling

Lateral buckling parameters

Lateral buckling

Load level: Upper flange Lower flange

Critical moment: Auto

Lateral buckling curve: auto

General method [6.3.2.2] Lambda LT,0 = 0.4

Detailed method [6.3.2.3] Beta = 0.75

Simplified method for beams with lateral restraints [6.3.2.4] kfl = 1.1

Additional sets of member parameters

Limit deflections and displacements: Service

Complex sections: Complex

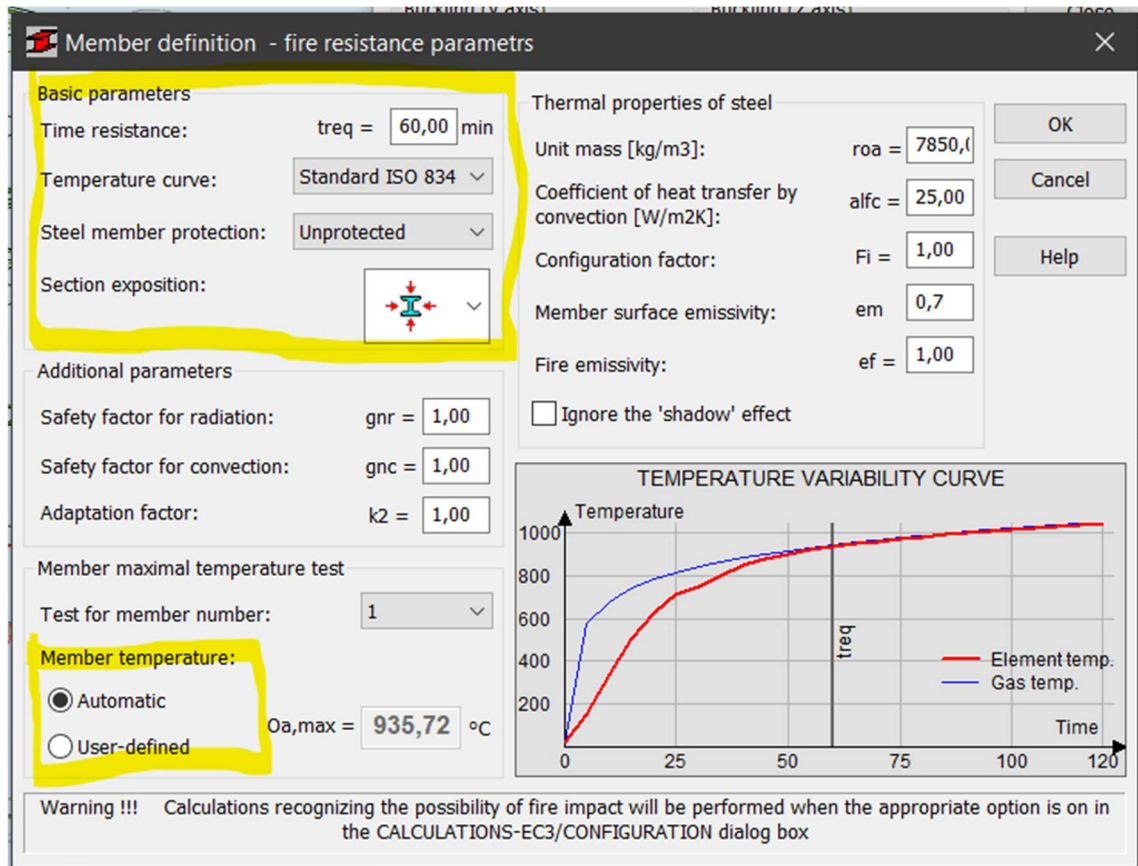
Thin-walled sections: Thin-walled

Fire analysis parameters: Fire

Kuva 8: Member Definition -valikko, jossa voidaan säätää rakenteiden parametreja.

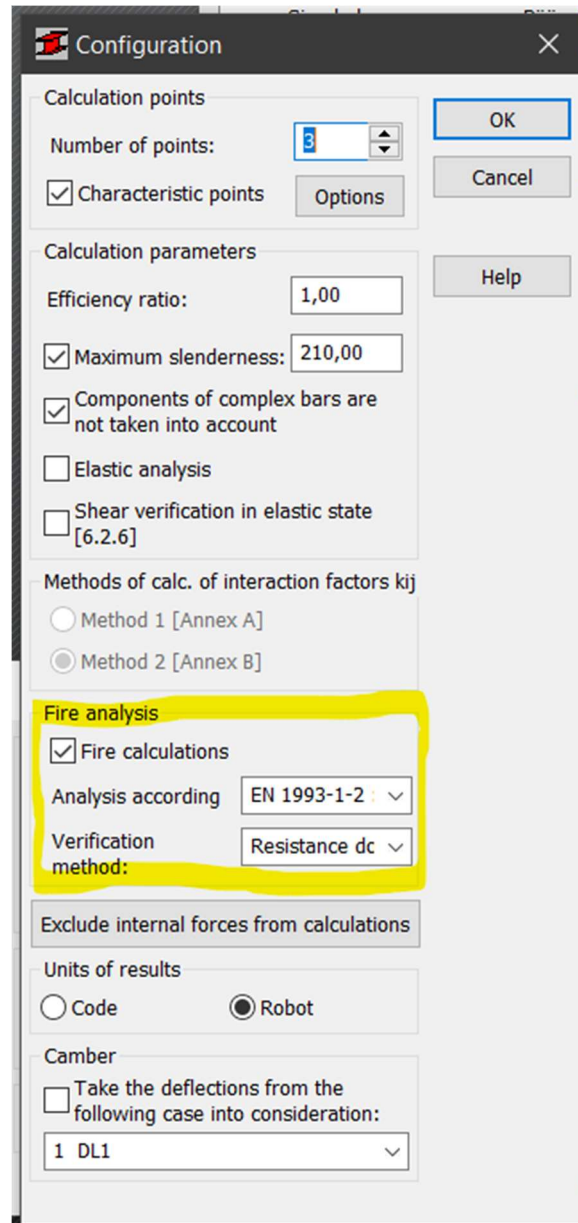
Kuvan 9 valikosta päästään määrittelemään rakenneosalle vaadittu palonkesto-aika, lämpötilakäyrä, suojaus ja palolle altistettujen sivujen lukumäärä. Valikossa on myös mahdollista määrittää manuaalisesti teräksen korkein lämpötila, mutta Robot osaa myös laskea sen itse. Lisäksi ikkunassa voidaan määrittellä teräksen termisiä ominaisuuksia. Säteilykerroin kuvaa tietyn pinnan kykyä absorboida säteilemällä siirtyvää lämpöä verrattuna mustan kappaleen pinnan kykyyn absorboida lämpöä. Palon säteilykertoimelle käytetään arvoa 1,0. (SFS-EN 1991-1-2 2005, s. 24, 40). Teräksen pinnan säteilykertoimena voidaan käyttää arvoa 0,7 (SFS-EN 1993-1-2 2005, s. 17). Jos rakenteelle valitaan palosuojaus, tulee palosuojauksen parametrit määrittää ikkunan oikeaan reunaan tulevaan

valikkoon. Palosuojausten tarkempi määrittäminen on esitetty myöhemmin tässä luvussa.



Kuva 9: Valikko palotilanteeseen liittyvien parametrien määrittelylle.

Seuraavaksi voidaan määrittää palomitoituksen tarkastelusuuret Calculations-ikkunassa. Painamalla Configuration-painiketta päästään valikkoon, josta palomitoitus voidaan aktivoida (kuva 10). Tämän jälkeen valitaan alavetovalikoista haluttu standardi, jonka mukaan palomitoitus tehdään, sekä tarkastelusuure, jonka mukaan Robot laskee rakenteen kestävyden.

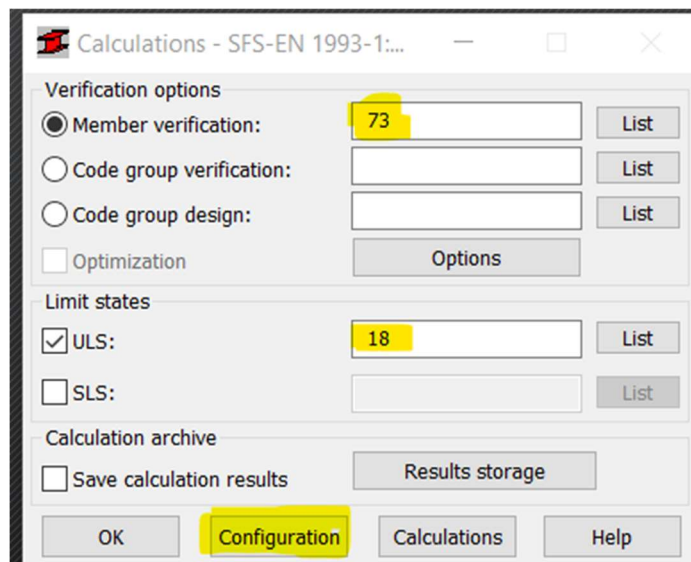


Kuva 10: Valikko laskentastandardin ja tarkastelusuureen valintaan.

Robotilla on mahdollista suorittaa palomitoitus perustuen kolmeen eri laskentamenetelmään (verification method). Vaihtoehtoiset laskentamenetelmät ovat kestävyteen, lämpötilaan/aikaan ja aikaan perustuvat menetelmät. Kestävyteen perustuva menetelmä perustuu Eurokoodin SFS-EN 1993-1-2 kohtaan 4.2.3. Menetelmässä lasketaan elementin maksimilämpötila määriteltyjen paloparametrien ja vaaditun palonkeston avulla. Rakenteen maksimilämpötilan avulla voidaan määrittää pienennystekijät teräksen lämpötilasta riippuville ominaisuuksille. Nyt teräksen lujuuden pieneneminen huomioiden, saadaan laskettua rakenteen lujuus halutussa lämpötilassa ja verrattua sitä palotilanteen rasitukseen. Lämpötilaan/aikaan perustuva menetelmä perustuu kriittisen lämpötilan laskemiseen. Menetelmässä lasketaan kriittinen lämpötila Eurokoodin SFS-EN 1993-1-2 kohdan 4.2.4 mukaan suorasti tai iteroiden, riippuen siitä tarvitseeko stabiilisuutta ottaa

rakenteelle huomioon. Rakenteen kriittistä lämpötilaa verrataan rakenteen maksimilämpötilaan, joka on laskettu kuten edellä kestävyys kohdassa. Kolmas Robotissa oleva menetelmä on aikaan perustuva menetelmä. Aikaan perustuvassa menetelmässä lasketaan maksimi aika, jonka rakenne kestää palossa, käyttäjän asettamien parametrien avulla. Tämän jälkeen saatua palonkestoaikaa verrataan vaadittuun palonkesto aikaan. (Autodesk 2021a)

Laskentaparametrin valinnan jälkeen Calculations-ikkunan Member Verification kohtaan (kuva 11) listataan rakenneosat, joille palomitoitus halutaan suorittaa ja kuvan 7 mukainen palotilanteen kuormitusyhdistelmän numero asetetaan ULS kohtaan. Tällöin palomitoitus tulee tehtyä vain palotilanteen kuormitusyhdistelyillä. SLS mitoituksen voi palomitoituksessa ottaa kokonaan pois. Tämän jälkeen voidaan suorittaa palomitoitus painamalla Calculations-näppäintä.

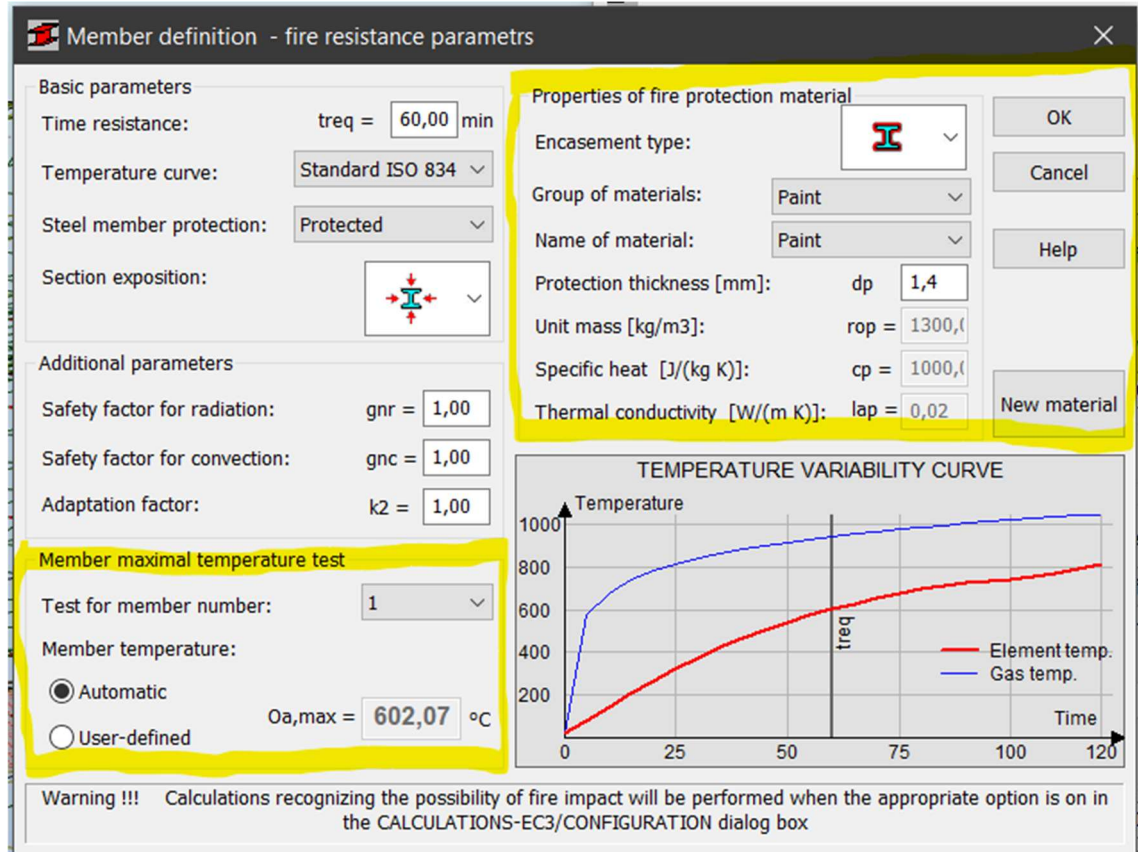


Kuva 11: Palomitoitettavien rakenneosien ja kuormitusyhdistelmien valinta.

Mitoituksen tulokset tulevat siten esiin uuteen ikkunaan. Tuloksista nähdään kestääkö rakenne palomitoituksessa kuvan 10 mukaisen tarkastelusuureen suhteen. Jos esimerkiksi halutaan selvittää rakenteen kriittinen lämpötila palomitoituksen yhteydessä, kannattaa valita laskentamenetelmäksi lämpötila/aika menetelmä. Tämä menetelmä antaa suoraan vastaukseksi kriittisen lämpötilan verrattuna rakenteen lämpötilaan palossa. Detailed results -kohdasta nähdään vielä kattavammin mitoituksen tulokset.

Robot-laskentaohjelmaan on mahdollista syöttää palosuojamaaliin ominaisuudet sekä kalvopaksuus. Tämän jälkeen Robot osaa laskea, kestääkö rakenne kyseisellä kalvopaksuudella vai ei. Palosuojamaali voidaan määrittää Robottiin kuvan 9 valikosta. Valikosta tulee ensin asettaa rakenne suojatuksi, minkä jälkeen oikeaan reunaan avautuu

kuvan 12 mukainen valikko. Valikosta voidaan valita, onko rakenne suojattu profiilia myötäillen vai kotelolla. Tästä valikosta muutetaan myös palosuojamateriaalin paksuutta. Valikosta voidaan myös lisätä uusi palosuojaus, tässä tapauksessa palosuojamaali, painamalla New material -painiketta.



Kuva 12: Rakenteen asettaminen palosuojatuksi Robotissa.

Uutta palosuojamaalia lisättäessä aukeaa kuvan 13 mukainen valikko. Valikosta tulee asettaa haluttu nimi ja parametrit palosuojamaalille. Tämän jälkeen uusi materiaali on hyvä tallentaa Robottiin Add to database -painikkeesta, jotta se on jatkossakin helposti käytettävissä. Yleensä palomitoitus tehdään ensin suojaamattomalle rakenteelle, jolloin saadaan tietoon rakenteen kriittinen lämpötila. Kriittistä lämpötilaa voidaan tässä hyödyntää palosuojauksen paksuutta määrittäessä. Kuvan 12 Member maximal temperature test -kohdasta voidaan haarukoida minkä suuruisia lämpötiloja rakenteille tulee. Alasvetovalikosta voidaan valita esimerkiksi aikaisemmin selvitetty rasiitetuin sauva, jonka kriittinen lämpötila tunnetaan. Tämän jälkeen palosuojauksen paksuus määritellään siten, että valikossa näkyvä maksimilämpötila jää alle kriittisen lämpötilan. Kun palosuojamateriaalin parametrit ovat määritetty, voidaan teräksen palomitoitus suorittaa loppuun aikaisemmin esitetyn mukaisesti.

Member definition - New insulating materials

Properties of fire protection material

Group of materials: Paint

Name of material: Paint

Unit mass [kg/m³]: rop = 1300,0

Specific heat [J/(kg K)]: cp = 1000,0

Thermal conductivity [W/(m K)]: lap = 0,008

OK
Cancel
Help
Add to database
Delete from database

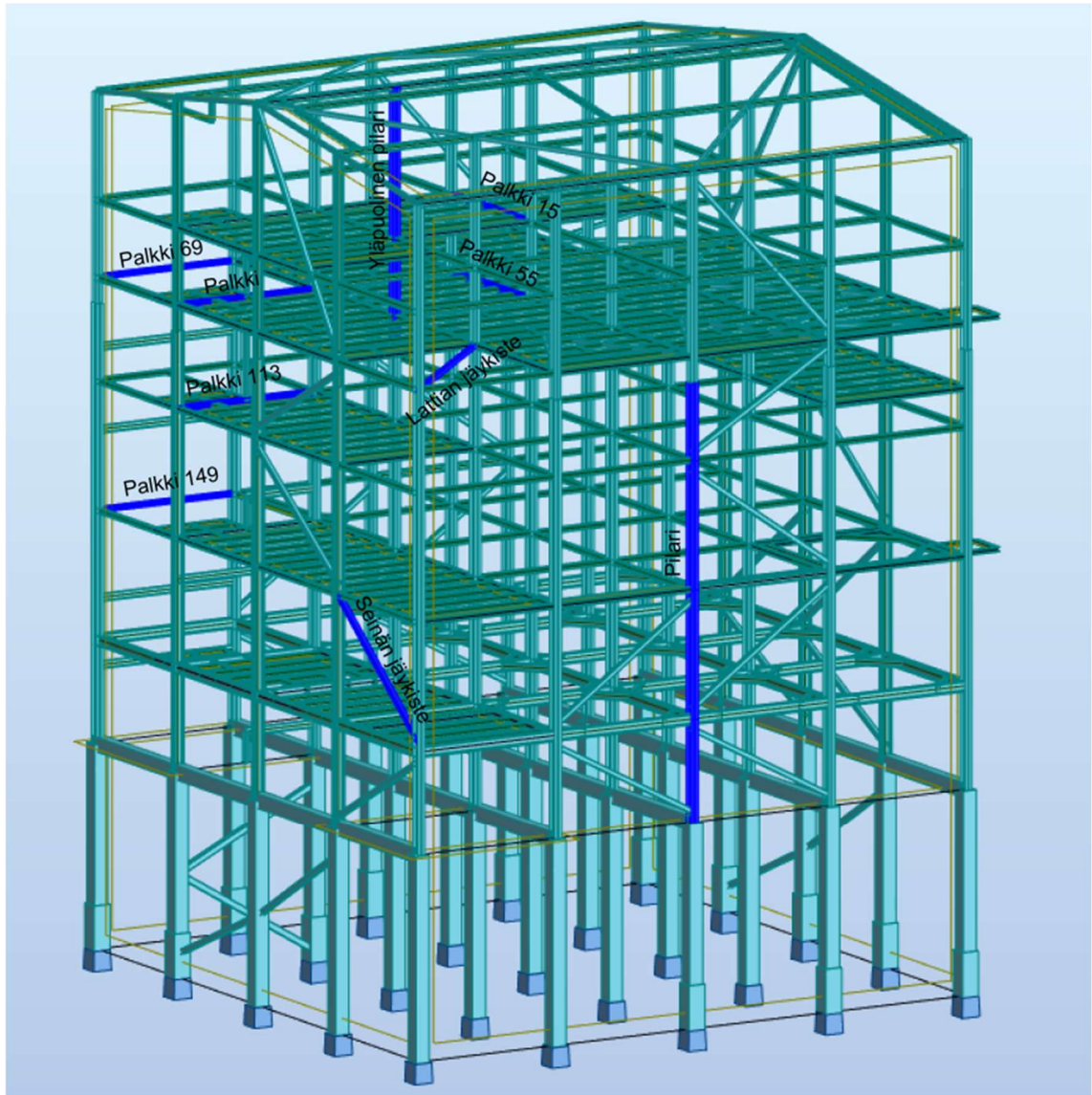
Kuva 13: Palosuojamaalin parametrien määrittäminen.

Palosuojamaalin ominaisuudet määritellään Robotissa kolmen parametrin avulla: tiheys (ρ), ominaislämpö (c_p) ja lämmönjohtavuus (λ). Lisäksi Robottiin määritellään palosuojamaalauksen kuivakalvon paksuus (d_p). Robotin verkkosivuilla oleva ohjeistus ei kuitenkaan määrittele tuleeko lähtötietojen olla paisuneen maalin parametreja vai kuivan maalin parametreja. Käyttöohjeet eivät myöskään ohjeista tuleeko lämmönjohtavuudelle käyttää tehokasta vai tehokasta vakio lämmönjohtavuuden arvoa. Robot ilmeisesti käyttää samaa menetelmää kaikkien palosuojausmenetelmien laskemiseen, eikä siten ole määrittänyt palosuojamaalaukseen liittyviä parametreja erikseen (Autodesk 2021b). Tässä työssä käytettiin kuivan palosuojamaalin tiheyttä, eurokoodin mukaista lämmönjohtavuutta ja tehokasta vakio lämmönjohtavuutta. Parametrit ja niiden valintaperusteet on esitetty tarkemmin luvussa 2.1. Suunnittelijan tulee siis tietää palosuojamaalin tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus, jotta ohjelmistoa voidaan käyttää rakenteen palomitoituksessa ja palosuojamaalauksen suunnittelussa.

4. ERI LASKENTAMENETELMIEN SOVELTAMINEN TERÄSRAKENTEIDEN PALOMITOITUKSESSA

Teräsrakenteiden palomitoitusta voidaan tehdä kehittyneillä laskentamalleilla, yksinkertaisilla laskentamalleilla tai taulukkomitoituksella. Robot-laskentaohjelma käyttää yksinkertaisia laskentamenetelmiä ja vaihtoehtoina on kolme eri laskentamenetelmää. Nämä menetelmät ovat kestävyys, lämpötila/aika ja aika menetelmät. Jos halutaan laskea palomitoitus käsin yksinkertaisilla laskentamenetelmillä, voidaan käyttää Eurokoodin mukaan joko kestävyteen tai kriittiseen lämpötilaan perustuvaa mitoitustapa menetelmää. Robotin laskentatuloksissa on huomattu vaihtelevuutta riippuen käytettävästä menetelmästä. Tämän vuoksi selvitetään seuraavaksi, miten Robotin eri laskentamenetelmien tulokset eroavat toisistaan ja verrataan vielä tuloksia käsin laskettuihin tuloksiin.

Tehdään palomitoitus yksinkertaisille pilarille ja palkille. Luvuissa 4.1 ja 4.2 esitetään palosuojaamattoman ja palosuojatun rakenteen mitoitustapa prosessit ja analysoidaan tuloksia. Luvussa 4.3 vertaillaan edellä mainituissa luvuissa saatuja tuloksia ja kootaan tulokset taulukoihin. Rakenteet on otettu case-kohteesta, jonka Robot-laskentamalli oli jo valmiina ja kaikki rakenteiden rasitukset ovat myös otettu Robotista. Case-kohde on betonisten pilarien päälle tehty teräksinen pilari-palkkirunkoinen teollisuusrakennus. Rakennuksen kuormaluokka on E. Alla kuva 14 case-kohteen Robot-mallista, jossa nimettynä kaikki tarkastellut rakenteet.



Kuva 14: Case-kohteen Robot malli

Robot on laskenut rasitukset käyttäen annettuja kuormia ja taulukon 5 yhdistelykertoimia, jotka löytyvät Robotista. Yhteensä eri kuormitustapauksia saatiin 37. Kuormia ei ole tässä esitetty, sillä niitä on huomattavan paljon suuressa Robot mallissa. Pilariksi valikoitui monikerrospilari, joka on alapäästään jäykästi kiinnitetty betonipilariin ja yläpäästään myös jäykästi kiinnitetty toiseen teräspilariin. Pilarin profiili on HEA 400, jonka nurjahduspituus on 4 m. Pilari sijaitsee rakennuksen ulkoseinälinjalla, joten sitä kuormittaa pääosin pystysuuntaiset kuormat ja tuulikuorma. Tuulikuorma aiheuttavat pientä leikkaus- ja momenttirasitusta pilarille. Tarkasteltava palkki on molemmista päistään nivellisesti tuettu palkki, joka on kuormitettu tasaisella pystysuuntaisella viivakuormalla. Tasainen kuorma koostuu rakenteiden omasta painosta sekä hyötykuormista. Palkki on profiililtaan HEA 200, jonka pituus on 6 m ja kiepahduspituus 3 m. Molemmat rakenteet

on valmistettu lujuusluokan S355J2G3 teräksestä, ja ne altistuvat palolle kaikilta neljältä sivulta. Tarkemmat lähtötiedot on vielä esitetty alla taulukossa 6.

Taulukko 6: Yksinkertaisten rakenteiden palomitoituksen lähtötietoja

Palomitoituksen lähtötietoja	Palkki (HEA 200)	Pilari (HEA 400)
Teräksen lujuus [Mpa]	355	355
Kimmomoduuli [Gpa]	210	210
Liukkerroin [GPa]	81	81
Nurjahdus/kiepahduspituus y-suunta [m]	3	4
Nurjahdus/kiepahduspituus z-suunta [m]	3	3,19
Rasitukset		
Rasitetuin kuormitustapaus	1,0*oma paino + 0,9*hyötykuorma	1,0*oma paino + 0,2*lumikuorma + 0,8*hyötykuorma +0,2*tuulikuorma
Normaalivoima [kN]	0,68	651,28
Momentti y-suunta [kNm]	61,37	27,09
Momentti z-suunta [kNm]	0	7,45
Leikkausvoima [kN]	18	10,86

Kyseiset rakenteet valittiin tarkasteltavaksi, koska niiden käyttöasteet palotilanteessa olivat korkeimmat ja ne edustivat sellaisia rakenteita, jotka toistuvat usein rakennuksessa. Rakenteita mitoitettaessa käytettiin standardipaloa, jonka parametrit on esitetty luvussa 3.3 lämpötilan kehittyminen palossa.

4.1 Palosuojaamaton teräsrakenne

Kantavat teräsrakenteet eivät yleisesti kestä palotilanteessa palosuojaamattomana, jos vaadittu palonkestoluokka on vaativampi kuin R15. Tässä luvussa tutkitaan aikaisemmin esitettyjen yksinkertaisten rakenteiden avulla miten eri laskentamenetelmien tulokset eroavat toisistaan, kun rakenne on palosuojaamaton ja rakenne kuululuu palonkestoluokkaan R15.

4.1.1 Käsinlaskenta

Teräsrakenteiden palomitoituksen käsinlaskentamenetelmiä voidaan soveltaa sekä kestävyystarkasteluun että kriittisen lämpötilan määrittämiseen. Käsinlaskenta kestävyysmenetelmällä suoritettiin käyttämällä Mathcad-laskentapohjaa, joka tarvitsee lähtötiedoiksi rakenteen ominaisuudet ja mitat, sekä rasitukset ja teräsrakenteen lämpötilan. Palkin käsinlaskenta kestävyysmenetelmällä on esitetty liitteessä D. Käsinlaskentaa varten tarvittavat rasitukset luettiin Robotista. Lisäksi palosuojaamattoman teräsrakenteen

lämpötila laskettiin erillisellä Excel-laskentapohjalla (Liite B). Lämpötilan avulla saadaan edelleen teräksen lujuuden pienennystekijät kuvasta 1. Tämän jälkeen lasketaan pienennyskertoimilla redusoidut puristus-, nurjahdus-, taivutus-, kiepahdus-, leikkaus- ja yhdistetty taivutuksen ja aksiaalisen voiman kestävyys. Näitä lujuuksia verrataan edelleen rakenteen rasituksiin. Kiepahdusta laskettaessa oletetaan, että puristetussa laipassa oleva lämpötila on yhtä suuri, kuin tasan jakautunut lämpötila, jolloin voidaan teräksen myötörajan pienennystekijänä käyttää suoraan tasan jakaantuneella lämpötilan arvolla laskettua pienennystekijää.

Palkki laskettiin kestävyysmenetelmää käyttäen ja tulokset on esitetty taulukossa 7. Tuloksista raportoitiin rakenteen käyttöasteet. Tuloksista huomataan, että rakenteen käyttöasteet ovat selvästi korkeampia kuin 1,0 eli rakenne ei kestä R15 palonkestoluokassa palosuojaamatta. Suurimmat käyttöasteet tulivat kiepahdukselle sekä yhdistetylle taivutukselle ja puristukselle. Määrääväksi kestävyudeksi tuli yhdistetty taivutus- ja puristuskestävyys.

Lasketaan seuraavaksi palkki käsin kriittiseen lämpötilaan perustuvalla menetelmällä. Rakenteen kriittiseen lämpötilaan ei vaikuta palonkestoluokka, joten kriittistä lämpötilaa ei tarvitse laskea erikseen eri palonkestoluokissa. Lasketaan seuraavaksi palkin kriittinen lämpötila liitteen F mukaisesti. Iteraatiokierroksia tulee tarkasteltaville rakenteille vain 4–8, joten tähän ei luotu automaattista iteraatioprosessia, vaan iteraatio tehtiin käsin. Palkin merkitseväksi kestävyudeksi tuli yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys ja kriittisen lämpötilan arvoksi käsin laskien saatiin 510,51 °C. Palkin kriittisen lämpötilan laskemisen jälkeen selvitetään palosuojaamattoman teräsrakenteen lämpötila palonkestoluokassa R15. Teräksen lämpötilan nousu laskettiin Excel-tilukolla (Liite B) käyttäen palolle aikaisemmin määritettyjä parametreja ja palkin poikkileikkaustekijää. Palosuojaamattoman teräsrakenteen lämpötilannousu voidaan laskea kaavalla (6). Palkin lämpötila kirjattiin taulukkoon 9. Tuloksista huomataan, että palkki ei kestä edes 15 minuuttia palossa, koska teräsrakenteen lämpötila nousee yli kriittisen lämpötilan.

Seuraavaksi tehtiin palomitoitus palosuojaamattomalle pilarille. Käsinlaskennalla ja kestävyysmenetelmällä saadut tulokset kirjattiin taulukkoon 8. Pilarin käsinlaskenta kestävyysmenetelmällä on esitetty liitteessä E. Tuloksista huomataan, että Pilari kestää suojaamattomana palonkestoluokassa R15. Käyttöasteet jäivät hyvin maltilliseksi, sillä suuri käyttöaste 0,29 saatiin yhdistetylle taivutus- ja puristuskestävyydelle. Kun palonkestoluokkaa nostettiin luokkaan R30, rakenne ei enää kestänyt suojaamattomana.

Lasketaan seuraavaksi pilarin kestävyys kriittisen lämpötilan menetelmällä. Pilarin kriittisen lämpötilan laskenta on esitetty liitteessä G. Kestävyys menetelmän laskennasta

huomataan, että yhdistetty taivutus- ja puristuskestävyys tulee selkeästi kriittisimmäksi kestävyudeksi, joten lasketaan pilarin kriittinen lämpötila yhdistetyn taivutus- ja puristuskestävyyden avulla. Lasketaan jälleen ensin kriittinen lämpötila, jonka jälkeen verrataan sitä teräsrakenteen lämpötilaan. Pilarille saadut tulokset on esitetty taulukossa 10. Kriittisen lämpötilan menetelmän tuloksista huomataan myös, että pilari kestää palosuojamattomana R15 palonkestoluokassa. Käsien laskennalla kriittisen lämpötilan arvoksi pilarille saatiin 703,27 °C ja teräspilarin lämpötila nousee 15 minuutin palossa 504,70 °C:n.

4.1.2 Robot

Tarkastellaan yksinkertaisen pilarin ja palkin mitoitusta Robotilla. Mitoitetaan aikaisemmin esitetyt palkki ja pilari palosuojamattomina rakenteina R15 palonkestoluokassa. Mitoitustarkastelut tehdään kaikilla kolmella luvussa 3.9 esitetyllä eri mitoitusmenetelmällä.

Eri menetelmillä laskettuja tuloksia tarkasteltaessa huomataan heti, että Robotin antamat käyttöasteet ovat kaikilla menetelmillä huomattavasti erilaiset. Tämä johtuu siitä, että Robot vertailee eri suureita eri menetelmiä käytettäessä. Tästä seuraa se, että eri menetelmien välisiä käyttöasteita ei voi vertailla. Yleensä kriittisen lämpötilaan ja aikaan perustuvissa menetelmissä ei lasketa käyttöasteita vaan verrataan suoraan lämpötilan ja ajan arvoja. Robot kuitenkin laskee käyttöasteet myös näillä menetelmillä. Käyttöasteita tarkisteltaessa voidaan kuitenkin huomata, että palonkestoluokkaa kasvatettaessa kaikilla menetelmillä rakenteiden käyttöasteet kasvavat. Tämä on seurausta teräksen lujuuden heikkenemisestä lämpötilan noustessa, jonka jokainen laskentamenetelmä huomioi.

Verrattaessa kestävyys menetelmällä saatuja rakenteen kestävyksiä lämpötila/aika ja aika menetelmiin huomataan, että eroja ei juuri menetelmien välillä ole R15 palonkestoluokassa. Lämpötila/aika ja aika menetelmät antavat täysin samat kestävyden arvot. Ainut ero näiden kahden menetelmän tuloksissa on, että lämpötila/aika menetelmä vertaa kriittisiä lämpötiloja ja aika menetelmä palonkestoajoja. Voidaankin todeta, että valittaessa käytettävää menetelmää näiden kahden väliltä, valinta riippuu käyttäjän omasta mielipiteestä, kumpaa suureta haluaa vertailla. Jos halutaan rakenteen kriittinen lämpötila helposti esille tuloksiin, on suositeltavaa käyttää lämpötila/aika menetelmää. Robotin kestävyysmenetelmällä lasketut tulokset palkille kirjattiin taulukkoon 7 ja lämpötila/aika menetelmän tulokset taulukkoon 9.

Mitoitettaessa pilaria Robotilla kestävyys menetelmää käyttäen huomataan, että jos palonkestoluokkaa kasvatetaan niin, että käyttöasteet menevät reilusti yli 1,0, Robot alkaa

muuttamaan tarkasteltavaa kuormitustapausta sekä poikkileikkausta. Tämä johtuu mahdollisesti Robotin laskemasta yhdistetystä puristus- ja taivutuskestävyyden laskemisesta. R30 ja R120 luokissa huomataan, että Robot ilmoittaa Eurokoodin SFS-EN-1993-1-1 mukaisen plastisuusteorian mukaisen pienennetyn taivutuskestävyyden arvon (kaava 19). R30 luokassa tästä arvosta ei tule kriittistä, mutta R120 luokassa momentti-kestävyyden arvo pienenee lähes olemattomiin, koska normaalivoiman ja normaalivoimakestävyyden suhde on lähes 1. Pienennetty taivutuskestävyys lasketaan kaavasta

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} [1 - (N_{Ed}/N_{pl,Rd})^2], \quad (19)$$

jossa $M_{pl,Rd}$ on plastinen momenttikestävyys, N_{Ed} on normaalivoimakuormitus ja $N_{pl,Rd}$ on plastinen normaalivoimakestävyys (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 58).

R60 luokassa huomataan, että Robot laskee edelleen pienennetyn taivutuskestävyyden arvon, mutta ei ilmoita arvoa tuloksissa eikä siten käytä kyseistä arvoa kestävyyttä tarkasteltaessa. Tarkemmin asiaa tutkittaessa käsin laskien huomattiin, että pienennetyn taivutuskestävyyden arvoksi tässä tapauksessa tulisi negatiivinen arvo. Näin tapahtuu, koska normaalivoima on suurempi kuin normaalivoimakestävyys. Tällaisissa ylikuormitustapauksissa Eurokoodin kaavat eivät enää toimi oikein. Tästä voidaan todeta, että suojaamattomalla rakenteella, jolla käyttöasteet ovat reilusti yli yhden, käyttöasteiden suuruudet eivät ole olennaisia pienennetyn taivutuskestävyyden laskennan takia. Tästä johtuu Robotin tarkasteleman poikkileikkauksen ja kuormitustapauksen muutokset eri palonkestoluokissa. Robottia voidaan siis soveltaa turvallisesti myös kyseisissä tilanteissa, koska rakenne ei näissä tapauksissa kestä. Kun käyttöasteet laskevat alle 1,0 kyseinen tarkastelu toimii jälleen oikein.

Lämpötila/aika menetelmää käytettäessä samanlaista tarkasteltavan poikkileikkauksen ja kuormitustapauksen muutosta ei tapahdu. Tällä menetelmällä Robotin käyttämä kuormitustapaus ei muutu, vaikka palonkestoluokkaa muutettaisiinkin. Tämä selittyy normaalivoiman kestävyyksien laskennalla. Kestävyysmenetelmää käytettäessä normaalivoimakestävyys lasketaan kaavalla 11. Lämpötila/aika menetelmää eli kriittisen lämpötilan menetelmää käytettäessä normaalivoimakestävyys lasketaan taas kaavasta 20.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (20)$$

jossa A on profiilin pinta-ala, f_y on teräksen lujuus ja γ_{M0} on poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 52) Tämä arvo on huomattavasti suurempi kuin kestävyysmenetelmällä laskettu pienennyskertoimella pienennetty arvo. Tästä seu-

raa edelleen se, ettei pienennetty momenttikestävyys tule mitoittavaksi tekijäksi lämpötila/aika menetelmää käytettäessä ja Robotin käyttämä rasi-tuoin poikkileikkaus ja kuormitusyhdistelmä eivät muutu palonkestoluokan muuttuessa.

4.2 Palosuojamaalattu teräs rakenne

Tässä luvussa määritellään yllä esitetyille rakenteille palosuojamaalaus ja mitoitetaan se käsin sekä Robot-laskentaohjelmalla. Palosuojamaalina käytetään Hempacore one 43600 maalia. Palosuojamaalin tiheyden, ominaislämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuden arvot on esitetty luvussa 2.1.

4.2.1 Käsinlaskenta

Mitoitetaan seuraavaksi yksinkertaisten rakenteiden palosuojamaalaus käyttäen hyväksi kohdassa 4.1.1 saatuja kriittisen lämpötilan arvoja. Palosuojamaalauksen mitoitus perustuu palosuojatun rakenteen lämpötilan sekä kriittisen lämpötilan vertailuun. Jos palosuojamaalattun rakenteen lämpötila on alle kriittisen lämpötilan, kestävä rakenne palotilanteessa, muuten palosuojamaalauksen kalvopaksuutta pitää kasvattaa. Palosuojatun teräs rakenteen lämpötila lasketaan kaavalla (9) ja laskemiseen tarvitaan palosuojamaalin parametrit, jotka löytyvät yltä. Palosuojamaalin paksuus valittiin siten, että palosuojatun rakenteen lämpötila tuli mahdollisimman lähelle kriittistä lämpötilaa. Kuivakalvopaksuudet määritettiin 5 µm tarkkuudella. Palosuojamaalattun rakenteen lämpötila laskettiin ensin palkille Excel-laskentapohjalla (Liite C) ja tulokset kirjattiin taulukkoon 10.

Kriittisen lämpötilan menetelmällä saaduista tuloksista huomataan, että 0,590 mm kuivakalvopaksuus riittäisi palosuojamaan esimerkin palkin 30 minuutin palossa. Palosuojamaalattun palkin käyttöasteeksi tulee lähes 100 %. Palonkestoluokassa R120 palosuojauksen paksuudeksi saatiin 3,245 mm. Koko maalausjärjestelmän paksuus on yleensä 0,2–5,0 mm, jossa on mukana pohja- sekä pintamaalaus (Teräs rakenneyhdistys ry 2017, s. 6). Tästä voidaan päätellä, että palosuojamaalaus olisi mahdollista toteuttaa myös palonkestoluokassa R120 näillä palosuojamaalin parametreilla.

Määritettäessä palosuojauksia palkille kestävyysmenetelmällä huomataan, että teräs rakenne ei kestä läheskään yhtä korkeassa lämpötilassa kuin kriittisen lämpötilan menetelmällä. Tämä johtaa suoraan huomattavasti suurempiin palosuojamaalin kalvopaksuuksiin. Nämä erot johtuvat todennäköisesti käsinlaskuissa tehdystä oletuksesta lämpötilan tasan jakautumisesta profiilissa. Tämän ilmiön syitä on tarkasteltu tarkemmin vielä luvussa 4.3, jossa vertaillaan Robotin sekä käsinlaskennan tuloksia.

Seuraavaksi määritettiin palosuojamaalaus pilarille samalla tavalla kuin yllä palkille. Kestävyyssmenetelmällä saadut kalvopaksuudet vastaavat nyt huomattavasti paremmin kriittisen lämpötilan menetelmällä saatuja tuloksia kaikissa palonkestoluokissa. Kriittisen lämpötilan arvo laskettiin liitteen G mukaisesti ja saadut tulokset kirjattiin taulukkoon 11. Kestävyyssmenetelmällä saadut tulokset saatiin liitteen E mukaisesti ja kirjattiin taulukkoon 13. Pilarin käsinlaskennan tuloksista eri menetelmillä huomataan, että kestävyyssmenetelmällä saadut kalvopaksuudet ovat hieman suurempia kuin kriittisen lämpötilan menetelmällä saadut paksuudet. Tämä voi johtua siitä, että kestävyyssmenetelmällä ei saatu yhtä suuria käyttöasteita kuin kriittisen lämpötilan menetelmällä.

Palosuojamaalin paksuus voidaan myös määrittää palosuojamaalin valmistajien taulukoita käyttämällä. Usein palosuojamaalin ETA-todistuksissa on liitteenä taulukoita, joista pystyy lukemaan poikkileikkaustekijän ja kriittisen lämpötilan perusteella rakenteelle tarvittavan palosuojauksen paksuuden. Tämä on helppo ja luotettava tapa, jos taulukot ovat saatavilla, sillä palosuojamaalin parametreja ei tällöin tarvitse tietää.

4.2.2 Robot

Seuraavaksi mitoitetaan Robotin avulla palosuojamaalaus samoissa tapauksissa kuin kohdassa 4.1.2. Kriittisen lämpötilan menetelmällä laskettaessa Robot vertaa kriittisen lämpötilan arvoa palosuojatun rakenteen lämpötilaan. Taulukossa 11 on esitetty Robotiin asetetut palosuojamaalin paksuudet sekä Robotin laskemat teräksen lämpötilat palkille eri palonkestoluokissa kriittisen lämpötilan menetelmää käyttäen. Palosuojamaalaus laskettiin vielä Robotin kestävyyssmenetelmää käyttäen palkille. Tulokset kestävyyssmenetelmää käytettäessä on esitetty taulukossa 13. Kestävyyssmenetelmää käytettäessä huomataan, että kriittiset kestävydet ovat myös tässä tapauksessa rakenteen kiepahdus ja yhdistetty taivutus ja puristus. Kestävyyssmenetelmällä saatiin sama kalvopaksuus kuin kriittisen lämpötilan menetelmällä palonkestoluokissa R30 ja R60. Luokassa R120 palosuojamaalin kalvopaksuutta jouduttiin kasvattamaan kuitenkin 5 µm:llä, jotta rakenne saatiin kestäväksi.

Laskettiin vielä pilarille samat kestävydet kuin palkille. Kriittisen lämpötilan menetelmän tulokset kirjattiin taulukkoon 12 ja kestävyyssmenetelmän tulokset taulukkoon 14. Tuloksista huomataan, että Robotin laskennalla saadaan samat kalvopaksuudet molemmilla menetelmillä. Kriittiseksi kestävydeksi saatiin myös palosuojatussa tilanteessa Robotilla yhdistetty taivutus- ja puristuskestävyys. Pilarin ja palkin laskentatuloksista voidaan päätellä, että Robotilla eri menetelmillä määritettyjen palosuojamaalausten kalvopaksuuksissa ei juuri ole eroja.

4.3 Tulosten vertailu

Palosuojaamattoman teräsrakenteen käsinlaskennan ja Robotin kestävyysmenetelmän tuloksia vertaillaessa huomataan, että molemmat antavat lähes saman suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan. Tämä on loogista, koska lämpötilan laskemisessa on käytetty standardipalokäyrää ja samoja parametreja. Lämpötilojen ollessa näin lähellä toisiaan myös teräksen lujuuden pienennyskerroimista tulee yhtä suuret. Kaikki taulukoidut kestävydet ovat myös käsinlaskiessa ja Robotilla lähes samansuuruiset. Ainoat poikkeukset tulevat kiepahduskestävyyttä ja yhdistettyä taivutus- ja puristuskestävyyttä laskiessa.

Taulukko 7: Palosuojaamattoman palkin tulokset kestävyysmenetelmällä.

Palkki Kestävyysmenetelmä	Käsin	Robot
Palonkestoluokka	R15	R15
Suojaamattoman rakenteen lämpötila [°C]	623,30	622,32
Pienennystekijät		
$k_{y,\theta}$	0,41	0,42
$k_{E,\theta}$	0,27	0,27
Kestävyydet		
Puristus	0,0009	0,0009
Nurjahdus y-akseli	0,001	0,001
Nurjahdus z-akseli	0,002	0,002
Taivutus y-akseli	1,07	1,07
Leikkaus	0,12	0,12
Kiepahdus	2,34	1,94
Yhdistetty taivutus ja puristus	1,07	1,07
Yhdistetty taivutus ja puristus (kiepahdus huomioitu)	2,39	1,94
Suurin käyttöaste	2,39	1,94

Käsinlaskiessa tehdään oletus, että lämpötila jakautuu tasaisesti koko profiilin alalle, jolloin kiepahdusta laskiessa voidaan käyttää tasaisen lämpötilajakauman antamaa teräksen myötörajan pienennyskerrointa. Robot kuitenkin ottaa mahdollisesti huomioon lämpötilan muuttumisen puristetussa laipassa. Tämä johtaa siihen, että Robot antaa pienemmän käyttöasteen kiepahdukselle ja myös yhdistetylle taivutus- ja puristuskestävyydelle. Kiepahdukseen liittyvää kriittistä momenttia laskiessa huomataan myös, että Robot ja käsinlaskenta antavat hieman toisistaan poikkeavat arvot. Tämä aiheuttaa myös eroavaisuutta kiepahduksen käyttöasteisiin Robottia ja käsinlaskentaa verrattaessa. Ero johtuu vääntöjäyhyyden arvon poikkeavuudesta käsinlaskennassa käytetyssä taulukkoarvossa ja Robotin käyttämässä arvossa. Robot käyttää vääntöjäyhyyden (I_t) arvona

HEA 200 palkille 186000 mm^4 , jolloin kriittisen momentin arvoksi saadaan $272,96 \text{ kNm}$. Käsin laskiessa käytetään taulukkoarvoa 204300 mm^4 (Eurocode applied), jolloin kriittisen momentin arvoksi saadaan $279,24 \text{ kNm}$. Pilarin tuloksia vertailtaessa huomataan, että Robot antaa kestävyysmenetelmällä lähes samat käyttöasteet R15 palonkestoluokassa kuin käsinlaskenta.

Taulukko 8: Palosuojaamattoman pilarin tulokset kestävyysmenetelmällä.

Pilari Kestävyysmenetelmä	Käsin	Robot
Palonkestoluokka	R15	R15
Suojaamattoman rakenteen lämpötila [°C]	504,70	503,44
Pienennystekijät		
$k_{y,\theta}$	0,77	0,77
$k_{E,\theta}$	0,59	0,59
Kestävyydet		
Puristus	0,15	0,15
Nurjahdus y-akseli	0,18	0,18
Nurjahdus z-akseli	0,22	0,22
Vääntönurjahdus	0,22	0,22
Taivutus y-akseli	0,04	0,04
Taivutus z-akseli	0,03	0,03
Leikkaus	0,01	0,01
Pienennetty taivutuskestävyys	0,04	0,04
Yhdistetty taivutus ja puristus	0,29	0,29
Yhdistetty taivutus ja puristus (kiepahdus huomioitu)	0,29	0,30
Suurin käyttöaste	0,29	0,30

Kriittisen lämpötilan menetelmällä laskettuja tuloksia Robotin ja käsinlaskennan välillä vertaillaessa huomataan, että saadut kriittiset lämpötilat ovat hyvin lähellä toisiaan. Kriittisimmäksi kestävyudeksi sekä Robotilla, että käsin tuli yhdistetty taivutus- ja puristuskestävyys. Molemmilla menetelmillä lasketut suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilat ovat myös hyvin lähellä toisiaan, mikä johtaa samansuuruisiin käyttöasteisiin. Pilarille saaduissa kriittisissä lämpötiloissa on hieman enemmän eroa.

Taulukko 9: Palosuojaamattoman palkin tulokset kriittisen lämpötilan menetelmällä.

Palkki Kriittisen lämpötilan menetelmä	Käsin	Robot
Kriittinen lämpötila [°C]	510,51	507,19
Palonkestoluokka	R15	R15
Teräsrakenteen lämpötila [°C]	623,30	622,33

Taulukko 10: Palosuojaamattoman pilarin tulokset kriittisen lämpötilan menetelmällä.

Pilari		
Kriittisen lämpötilan menetelmä	Käsin	Robot
Kriittinen lämpötila [°C]	703,27	695,02
Palonkestoluokka	R15	R15
Teräsrakenteen lämpötila [°C]	504,70	503,44

Robotin eri mitoitusmenetelmiä vertailtaessa huomataan, että lämpötila/aika ja aikamenetelmät antavat identtiset arvot kestävyyksille. Kestävyys- ja lämpötila/aika menetelmillä laskettuja tuloksia on vaikea vertailla keskenään, koska ne vertailevat eri suureita. Robotista kuitenkin löytyy suojaamattoman rakenteen lämpötila sekä joitain käyttöasteita, jotka saadaan kaikilla menetelmillä. Nämä tulokset olivat yhden desimaalin tarkkuudella samat R15 palonkestoluokassa. Käsin eri menetelmillä laskettuja tuloksia ei myöskään pysty kovin helposti vertailemaan, koska eri menetelmät vertailevat eri suureita. Palosuojaamattomien rakenteiden tuloksien perusteella voidaan kuitenkin todeta, että käsinlaskenta menetelmillä ja Robotilla saadut tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan ja siten Robot toimii hyvin ainakin kriittisen lämpötilan laskemiseen.

Palosuojattu teräsrakenne mitoitettiin siten, että se kestää juuri ja juuri palossa. Yleisesti palosuojausta ei kuitenkaan mitoiteta näin lujille vaan 70–80 % käyttöasteeseen. Aikaisempien laskujen perusteella tiedettiin jo rakenteen kriittinen lämpötila, johon verrattiin palosuojatun teräsrakenteen lämpötilaa. Käsin ja Robotilla laskettuja kalvopaksumuksia vertailtaessa huomataan, että Robot antaa hieman paksummat kalvopaksumukset palkille. Kalvopaksumuksien ero voi johtua siitä, että Robotin laskema kriittinen lämpötila on himan käsin laskettua arvoa pienempi. Erot palkin palosuojamaalauksen kalvopaksumudessa olivat kuitenkin suurimmillaan noin 2 % luokkaa.

Taulukko 11: Palosuojatun palkin tulokset kriittisen lämpötilan menetelmällä.

Palkki						
Kriittisen lämpötilan menetelmä	Käsin			Robot		
Kriittinen lämpötila [°C]	510,51			507,19		
Palonkestoluokka	R30	R60	R120	R30	R60	R120
Palosuojauksen paksuus [mm]	0,590	1,425	3,245	0,595	1,435	3,260
Teräsrakenteen lämpötila [°C]	508,56	508,68	508,59	506,48	506,83	507,15

Pilarin tuloksista huomataan, että käsin laskettu kriittinen lämpötila on hieman Robotilla saatua arvoa suurempi. Tämän seurauksena teräsrakenteen lämpötila voi nousta käsinlaskuissa hieman Robotin arvoa korkeammalle ja siten kalvopaksuus on käsin laskuissa hieman Robotilla saatuja paksuuksia pienempi.

Taulukko 12: Palosuojatun pilarin tulokset kriittisen lämpötilan menetelmällä.

Pilari						
Kriittisen lämpötilan menetelmä	Käsin			Robot		
Kriittinen lämpötila [°C]	703,27			695,02		
Palonkestoluokka	R30	R60	R120	R30	R60	R120
Palosuojauksen paksuus [mm]	0,135	0,385	0,985	0,140	0,400	1,020
Teräsrakenteen lämpötila [°C]	699,78	701,78	702,81	694,65	694,35	694,76

Taulukko 13: Palosuojatun palkin tulokset kestävyysmenetelmällä.

Palkki						
Kestävyysmenetelmä	Käsin			Robot		
Palonkestoluokka	R30	R60	R120	R30	R60	R120
Palosuojatun rakenteen lämpötila [°C]	454,55	454,80	454,62	506,48	506,83	506,66
palosuojamaalin paksuus [mm]	0,725	1,725	3,845	0,595	1,435	3,265
Pienennystekijät						
$k_{y,\theta}$	0,88	0,88	0,88	0,76	0,76	0,76
$k_{E,\theta}$	0,65	0,65	0,65	0,58	0,58	0,58
Kestävyydet						
Puristus	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005
Nurjahdus y-akseli	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
Nurjahdus z-akseli	0,0008	0,0008	0,0008	0,0009	0,0009	0,0009
Taivutus y-akseli	0,51	0,51	0,51	0,59	0,59	0,59
Leikkaus	0,06	0,06	0,06	0,10	0,11	0,11
Kiepahdus	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Yhdistetty taivutus ja puristus	0,51	0,51	0,51	0,59	0,59	0,59
Yhdistetty taivutus ja puristus (kiepahdus huomioitu)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Suurin käyttöaste	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Kestävyysmenetelmällä palosuojamaalauksen kalvopaksuuksia määritettäessä huomataan, että käsinlaskenta antaa huomattavasti suuremmat kalvopaksuudet palkille kuin

Robotin kestävyysmenetelmä. Palosuojatun palkin lämpötila käsin laskettuna on noin 50 °C pienempi kuin Robotin antama arvo. Tämä tarkoittaa yli 20 % eroa saaduissa lämpötiloissa. Tämän ilmiön syytä on vaikea todentaa, koska Robotin käyttämää täydellistä laskentamenetelmää ei ole saatavilla. Robotin ja käsinlaskennan tuloksia tutkimalla voidaan kuitenkin huomata, että kaikki muut käyttöasteet ovat hyvin lähellä toisiaan paitsi kiepahdus. Syytä tähän voi olla esimerkiksi käsinlaskuissa tehty oletus lämpötilan tasan jakautumisesta tai mahdollisesti Robotin tarkemmasta kiepahduksen tarkastelusta sekä vääntöjäyhyyden arvojen erosta. Pilarille saadut kalvopaksuudet käsin sekä Robotin kestävyysmenetelmällä ovat hyvin lähellä toisiaan, eikä palkin kaltaista 50 °C eroa huomattu.

Taulukko 14: Palosuojatun pilarin tulokset kestävyys menetelmällä.

Pilari Kestävyysmenetelmä	Käsin			Robot		
	R30	R60	R120	R30	R60	R120
Palonkestoluokka						
Palosuojatun rakenteen lämpötila [°C]	694,44	696,70	696,92	694,41	694,10	694,49
palosuojamaalin paksuus [mm]	0,140	0,395	1,010	0,140	0,400	1,020
Pienennystekijät						
$k_{y,\theta}$	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$k_{E,\theta}$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Kestävyys						
Puristus	0,5	0,49	0,49	0,47	0,47	0,47
Nurjahdus y-akseli	0,59	0,61	0,61	0,59	0,59	0,59
Nurjahdus z-akseli	0,76	0,78	0,78	0,76	0,76	0,76
Vääntönurjahdus	0,79	0,81	0,81	0,79	0,78	0,79
Taivutus y-akseli	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12
Taivutus z-akseli	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10
Leikkaus	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
Pienennetty taivutuskestävyys	0,16	0,16	0,16	0,20	0,20	0,20
Yhdistetty taivutus ja puristus	0,94	0,96	0,96	0,94	0,93	0,94
Yhdistetty taivutus ja puristus (kiepahdus huomioitu)	0,95	0,97	0,97	0,99	0,99	0,99
Suurin käyttöaste	0,95	0,97	0,97	0,99	0,99	0,99

Tuloksista voidaan todeta, että kovin merkittäviä eroavaisuuksia käsinlaskuissa ja Robotin tuloksissa ei ole muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Suurimmat erot syntyivät yleensä alhaisessa R30 palonkestoluokassa ja mitä suurempaan palonkestoluokkaan

mentiin, sitä lähempänä tulokset olivat toisiaan. Poikkeustapauksia oli kuitenkin palosuojatun palkin laskenta käsin kestävyysmenetelmällä mikä antoi merkittävästi eri tuloksia kuin muut menetelmät.

5. PROFIILIKOON VAIKUTUS PALOSUOJAMAALAUKSEN TARPEESEEN PALONKESTOLUOKISSA R30-R120

Palosuojamaalaus voi edustaa huomattavaa osaa koko teräsrakenteen hinnasta. Tämän vuoksi palosuojamaalauksen optimoinnin sisällyttäminen teräsrakenteen mitoitukseen voi alentaa rakenteen kustannuksia. Usein normaalilämpötilassa määritetyille profiilille lisätään vain palosuojamaalaus palomitoituksen perusteella. Tämä kuitenkin antaa usein paksuja palosuojamaalin kalvopaksuuksia, jotka voivat tulla kalliiksi. Tässä luvussa tutkitaan olisiko kustannusten kannalta järkevämpää kasvattaa profiilikokoa, jolloin teräsrakenne saadaan suojattua pienemmillä palosuojamaalauksen kalvopaksuuksilla.

Tutkimusta palosuojamaalauksen optimoinnista putkiprofiileista tehdyille kattoristikolle on jo tehty. Tutkimuksessa verrattiin R30 ja R60 paloluokissa ETA:n ja FCSA:n (Finnish Constructional Steelwork Association) mukaan laskettuja ristikon kustannuksia. Tutkimuksessa tehtiin kustannusoptimointia käyttäen teknistä ja edistynyttä laskentatapaa. Tekninen lähestymistapa on usein käytetty normaalilämpötilan mukaan määritetyn profiiliin palosuojaminen. Edistyneessä laskentatavassa otettiin palosuojamaalin optimointi mukaan jo profiilikokoja määritettäessä. Tutkimuksessa huomattiin, että tekninen lähestymistapa johtaa usein paksumpaan kalvopaksuuteen, kuin edistynyt laskentatapa. Edistyneellä laskentatavalla saatiin jopa 12 % säästö kustannuksissa verrattuna tekniseen lähestymistapaan. Tällöin kuitenkin rakenteen paino nousee merkittävästi. Tutkimuksessa todettiin, että edistyneempää laskentamenetelmää olisi hyvä käyttää kaikissa tapauksissa putkiristikoita mitoittaessa. Tutkimuksessa huomattiin myös, että säästö R30 luokassa oli hyvin pientä ja vasta R60 luokassa kustannusten erot tulivat selkeästi näkyviin. (Jokinen et al. 2016)

Tutkitaan seuraavaksi luvussa 4 esitettyjen yksittäisten rakenneosien kustannuksia ja miten ne muuttuvat, kun profiilikoot kasvavat. Pyritään myös laajentamaan tarkastelua koskemaan koko case kohdetta ja yritetään löytää joitain sääntöjä, milloin esimerkiksi profiilikokoa kannattaa kasvattaa ja kuinka paljon.

5.1 Kustannusten erittely

Palosuojamaalauksen kustannukset koostuvat pohja-, palosuoja- ja pintamaalin hankinta sekä asennuskustannuksista. Lisäksi esikäsittely ja muut liittyvät työt aiheuttavat

lisäkustannuksia. Hankintakustannuksiin vaikuttaa suuresti mitä palosuojamaalia käytetään. Lisäksi ilmastorasitusluokka ja maalin lämpö- ja mekaanisen rasituksen kestävyys vaikuttavat valittavaan maalausjärjestelmään ja siten hankintakustannuksiin. (Rakennustieto 2015, s. 1–5) Valitaan tässä tutkimuksessa maalausjärjestelmäksi yksinkertainen ratkaisu, jossa on esikäsitteily sekä pohja- ja palosuojamaali. Käytetään esikäsitteilyn ja pohjamaalauksen hintana yksinkertaistettua kokonaisarvoa 7 €/m², joka sisältää esikäsitteilyn luokkaan SA2,5 ja 80 µm alkydipohjamaalauksen. Vaativimmissa olosuhteissa tähän järjestelmään pitäisi vielä lisätä pintamaalaus. Palosuojamaaliksi valittiin kuvitteellinen maali, jonka hinnaksi arvioitiin 30 €/l. Edellä esitetyssä tutkimuksessa palosuojamaalin hintana oli käytetty 40 €/l (Jokinen et al. 2016). Toisessa tutkimuksessa palosuojamaalin hinnaksi oli saatu 7–15 €/kg (Johansson 2013). Kyseinen hinta vastaa noin 9–20 €/l hintaa, jos palosuojamaalin tiheys on 1300 kg/m³. Lisäksi kustannuksissa huomioidaan materiaalihukka, joka avoprofiileilla on 40 % ja putkiprofiileilla 35 % (Rakennustieto 2015, s. 6).

Asennuskustannukset koostuvat työn tuntihinnasta sekä työmenekistä. Työn tuntihinnaksi arvioitiin 40 euroa tunnilta, joka vastaa Saksan hintatasoa vuodelta 2022 (Jactio). Palosuojamaalaustyö koostuu aloittavista töistä, ympäristön suojauksesta, maalauksesta ja lopettavista töistä. Näille kaikille saatiin työmenekit Ratu-kortista 0439. Ratu-kortissa annetaan työmenekit erikseen alle 1 mm ja 1 mm tai yli 1 mm paksuisille maali-kerroksille. (Rakennustieto 2015, s. 4) Kustannuksia laskettaessa otetaan huomioon, kuinka monta maalikerrosta maalataan ja minkä paksuisia kerrokset ovat. Laskuissa oletetaan, että maksimi kuivakalvopaksuus, jonka voi maalata kerralla on 0,75 mm. Palosuojamaalin kuiva-ainepitoisuuden ollessa 68 %, tämä kuivakalvopaksuus vastaa 1,1 mm paksuista märkäkalvopaksuutta. Lisäksi laskuissa käytettiin suoritemääräkerrointa, joka vastaa yli 600 m² maalattavaa alaa (Rakennustieto 2015). Taulukossa 15 on esitetty palosuojamaalauksen työmenekit, jos maalataan yksi alle 1 mm tai yksi yli 1 mm palosuojamaalikerros.

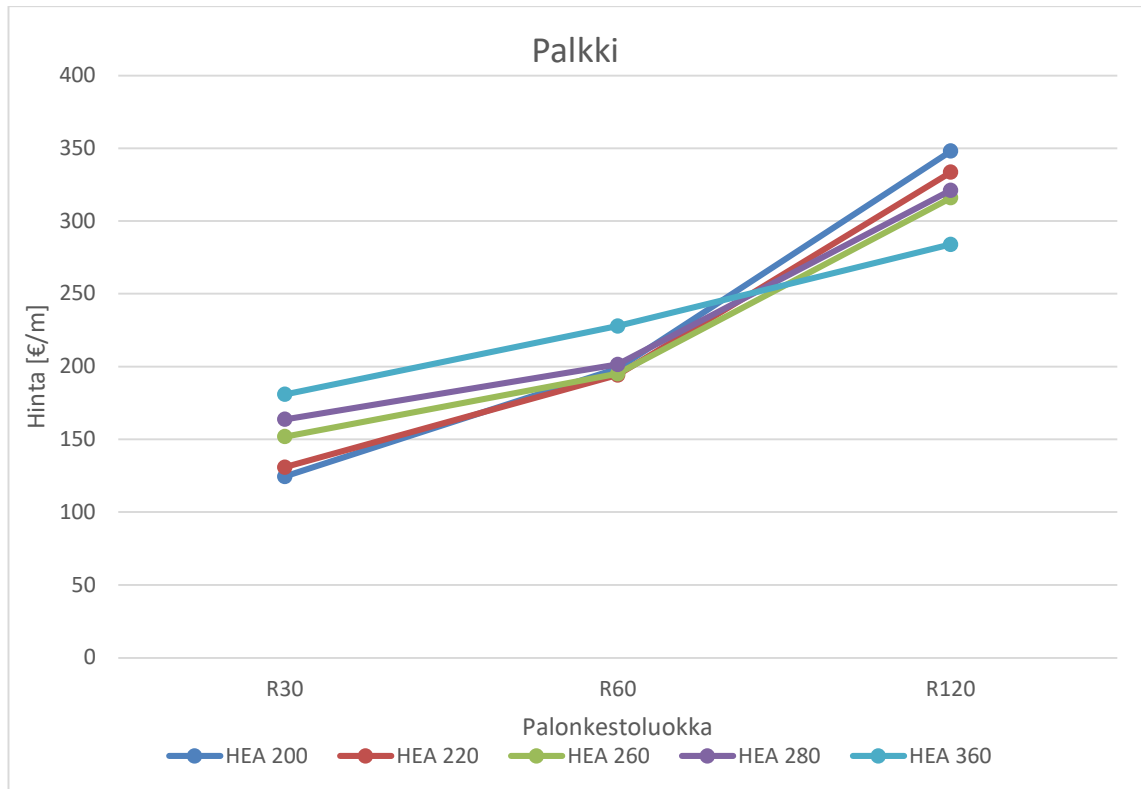
Taulukko 15: Ratu-kortin mukaiset työmenekit (Rakennustieto 2015, s. 4)

Työmenekit	Palosuojamaali <1 mm	Palosuojamaali ≥ 1 mm
Aloittavat työt	0,02	0,02
Ympäristön suojaus	0,04	0,04
Maalaus (yksi kerros)	0,20	0,27
Lopettavat työt	0,02	0,02
Suoritemäärän vaikutuskerroin	0,9	0,9
Yhteensä [tth/m ²]	0,252	0,315

Maalaustyön menekeistä huomataan, että jos vaadittu palosuojamaalauksen paksuus on niin suuri, että se joudutaan maalaamaan useassa kerroksessa, seuraavalle kerrokselle siirryttäessä työmenekki kasvaa aina vähintään 0,2 tth/m². Tämä aiheuttaa 100 m² maalattavalla pinta-alalla ja 40 €/h työtuntihinnalla 800 € lisäkustannukset siirryttäessä uudelle kerrokselle. Palosuojamaalauksen lisäksi teräsprofiilin hinta laskettiin selvittämällä profiilin paino ja teräksen hintana käytettiin EU:n materiaalikustannusten keskihintaa 1,5 €/kg vuodelta 2022 (Jactio). Palosuojamaalin sekä teräksen hinnoille tehtiin myös herkkyystarkastelua, jolla selvitettiin mihin hinnan muutokset vaikuttavat.

5.2 Profiilikokojen vertailu

Lasketaan seuraavaksi yksinkertaisen pilarin ja palkin kustannukset eri palonkestoluokissa käyttäen luvussa 5.1 esitettyjä kustannuksia. Palosuojamaalin kalvopaksuuksina käytettiin luvussa 4.2.2 Robotin lämpötila/aika menetelmällä laskettuja kalvopaksuuksia. Palkin alkuperäinen profiili oli HEA 200, jonka kriittinen lämpötila oli 507,19 °C ja kalvopaksuudeksi saatiin 0,595 mm palonkestoluokassa R30. Tämän jälkeen profiili vaihdettiin HEA 220, jolloin kriittinen lämpötila nousi arvoon 565,69 °C ja kalvopaksuus pieneni arvoon 0,435 mm. Profiilia kasvatettiin vielä HEA 260, jolloin kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 646,40 °C ja kuivakalvopaksuudeksi luokassa R30 saatiin 0,265 mm. Lisättiin tarkasteluun vielä HEA 280 profiili, jonka kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 673,94 °C ja kalvopaksuudeksi 0,22 mm. Lopuksi lisättiin vielä profiili, joka kestää R30 palonkestoluokassa palosuojamattomana. Ensimmäinen tällainen profiili oli HEA 360, jonka kriittisen lämpötilan arvoksi saatiin 755,11°C. Samat laskut suoritettiin eri palonkestoluokissa ja tulokset on esitetty kuvaajassa 1.

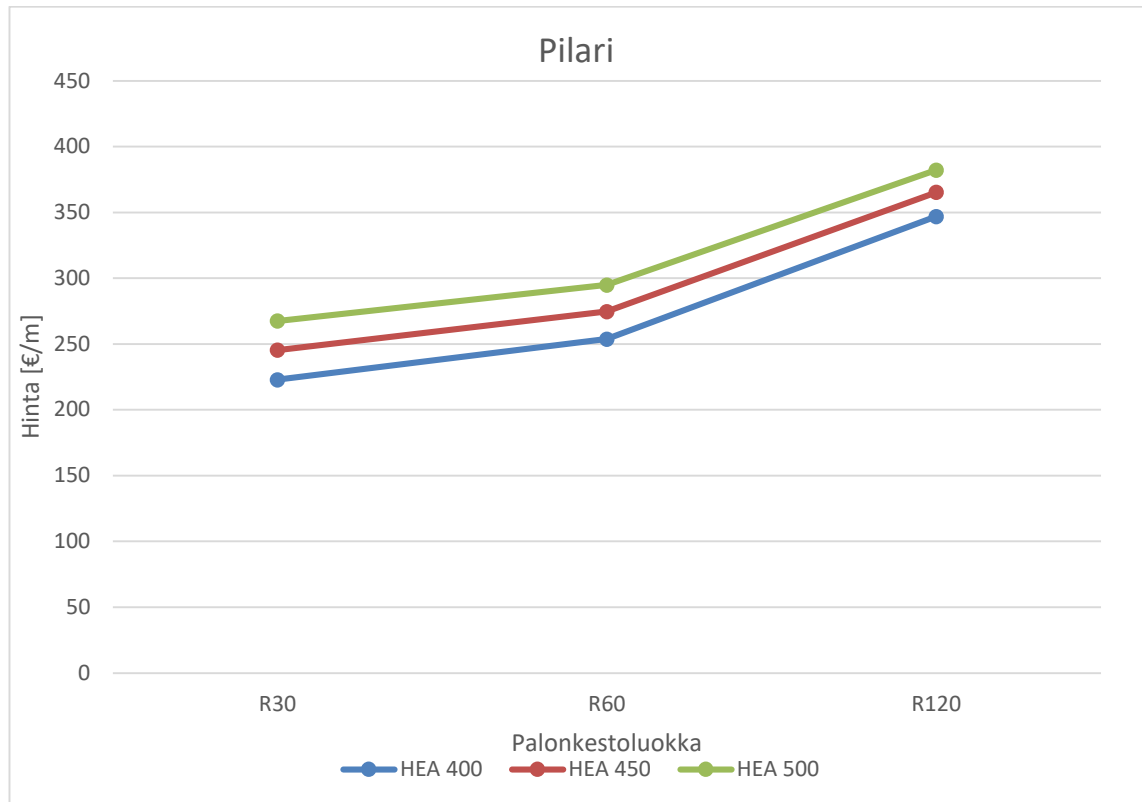


Kuvaaja 1: Palkin kustannukset.

Kuvaajan pystyakselilla on rakenteen hinta verrattuna yhteen metriin valmista rakennetta. Vaaka-akselilla taas on palonkestoluokat R30, R60 ja R120. Kuvaajasta 1 huomataan, että R30 luokassa alkuperäinen HEA 200 profiili on kustannuksiltaan halvin ratkaisu ja palosuojamatton HEA 360 profiili kaikkein kallein. Palonkestoluokkaa kasvatettaessa kuitenkin HEA 200 profiilin vaatima palosuojamaalin kalvopaksuus on niin suuri, että profiilin kasvattamisella päästään halvempaan lopputulokseen. R60 luokassa HEA 220 näyttää halvimmalta ratkaisulta. Tämä johtuu siitä, että HEA 220 profiililla palosuojamaalauksen kalvopaksuus on pienempi ja päällimmäinen kerros voidaan maalata alle 1 mm paksuisella kalvolla. HEA 200 ratkaisussa kaikki kerrokset ovat yli 1 mm, joka vaikuttaa työmenekkiin. Mitä suuremmaksi palonkestoluokka nousee, siitä kannattavammaksi myös profiilin kasvatus näyttää tulevan. R120 luokassa huomataan, että HEA 360 tulisi huomattavasti halvimmaksi ratkaisuksi, mutta tämä profiilin kasvatus tuo jo niin paljon lisäkiloja rakennukseen, että kyseinen ratkaisu ei ole tästä näkökulmasta kannattava. R120 luokassa HEA 260 olisi kustannuksiltaan sekä painoltaan järkevä ratkaisu.

Lasketaan seuraavaksi kustannukset pilarille. Pilarin alkuperäinen profiili oli HEA 400, jonka kriittinen lämpötila oli 695,02 °C. Tällöin palosuojamaalauksen kalvopaksuudeksi saatiin R30 luokassa 0,140 mm. Tämän jälkeen kasvatettiin profiili HEA 450, jonka kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 705,22 °C ja kalvopaksuudeksi 0,125 mm. Kasvatettiin profiili vielä HEA 500, jonka kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 719,28 °C ja kalvopaksuudeksi 0,105

mm. Samat laskut tehtiin myös palonkestoluokassa R60 ja R120 ja tuloksista piirrettiin kuvaaja 2.



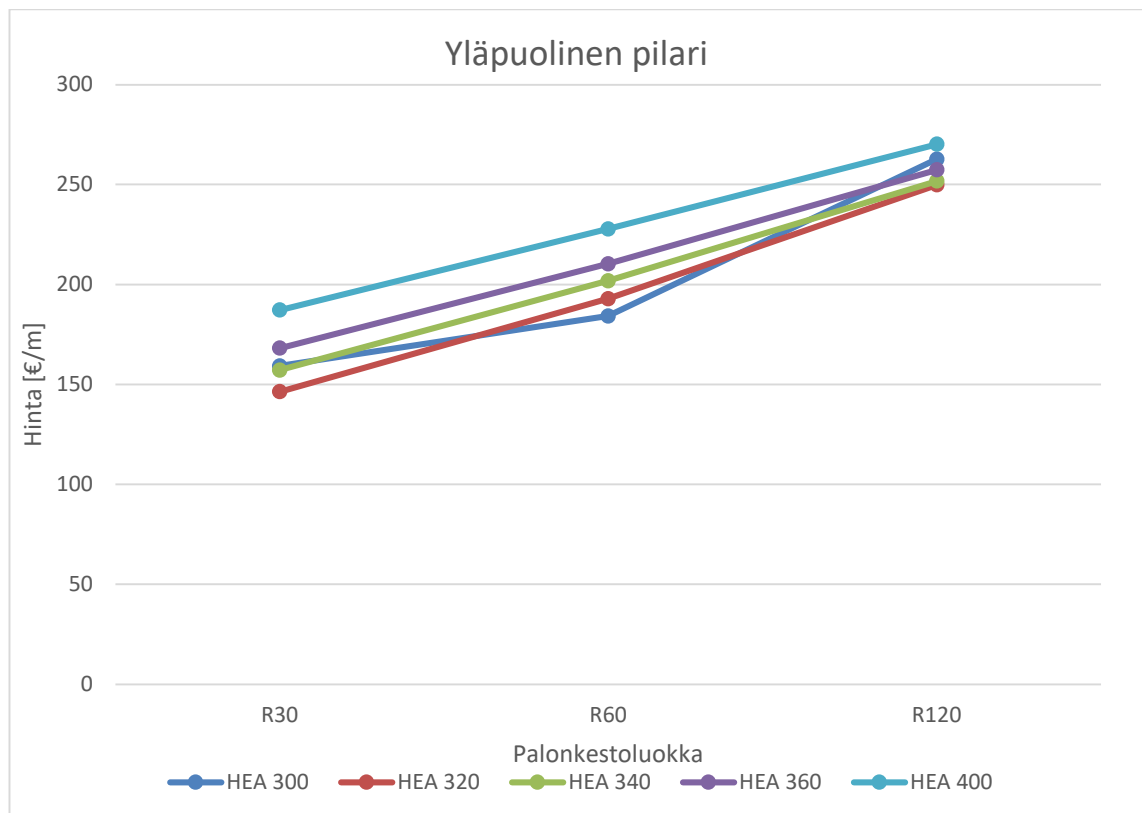
Kuvaaja 2: Pilarin kustannukset.

Tuloksista huomataan, että pilarin profiilin kasvattamisella ei saada halvempaa rakennetta. Palonkestoluokkaa kasvatettaessa kustannukset lähenevät toisiaan, mutta suuremmat profiilikoot ovat silti kalliimpia. Pilarin profiilikoko on jo huomattavan suuri verrattuna esimerkiksi aikaisemmin tarkasteltuun palkkiin. Koska profiili on niin iso, myös seuraava vakioprofiili on suhteessa suurempi kuin seuraava profiilikoko pienemmillä profiileilla. Tämä aiheuttaa rakenteessa suuremman massan kasvun ja koska profiilin hinta lasketaan rakenteen massayksikköä kohden profiiliin hinta kasvaa merkittävästi. Suuri rakenne ei myöskään tarvitse suurta kalvopaksuutta ja siten palosuojamaalin kustannuksista ei tule kovin merkittäviä. Tuloksista huomataan, että HEA 400 ja HEA 500 profiilien vaadittujen kalvopaksuuksien ero on vain 0,035 mm palonkestoluokassa R30. Tämä kalvopaksuuksien ero on kustannuksissa hyvin pieni osa. Jos palonkestoluokkaa kasvatettaisiin vielä suuremmaksi, jossakin kohtaa HEA 450 tulisi kuitenkin halvemmaksi ratkaisuksi kuin HEA 400 profiili.

Seuraavaksi laajennettiin kustannustarkasteluja case-kohteen muihin rakenteisiin. Rakenteet luokiteltiin palomitoituksen kannalta mielekkäisiin ryhmiin siten, että koko ryhmälle voitaisiin määritellä sama palosuojamaalaus. Ryhmät muodostuivat yläpuolisista

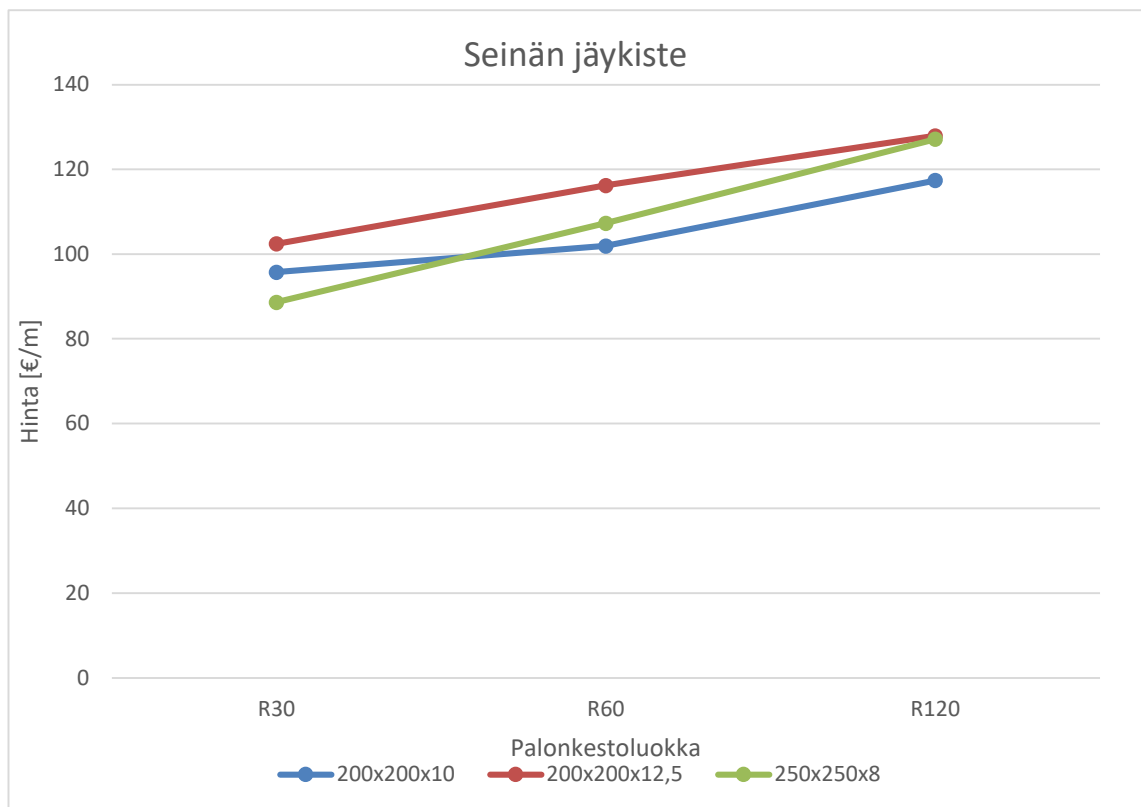
sekä alapuolisista pilareista, koska profiilikoko muuttui siirryttäessä ylempiin pilareihin. Jokaisen kerroksen palkit ryhmiteltiin erikseen ja nämä vielä jaettiin profiilin mukaan omiksi ryhmikseen, jotta palosuojamaalaus voitaisiin määrittää jokaiselle profiilille erikseen. Lisäksi siteet muodostivat oman ryhmänsä. Palosuojaus ja siten kustannukset laskettiin jokaisen ryhmän rasitetuimmalle rakenteelle. Tarkastellut rakenteet on esitetty case-kohteen rakennemallissa (kuva 14) ja kaikkien tarkasteltujen rakenteiden kustannuskuvaajat, joita ei tässä luvussa ole esitelty, on esitetty liitteessä A.

Kaikissa palkeissa huomataan, että profiilin kasvatus R30 luokassa ei tuota halvempaa ratkaisua. Kuitenkin jo R60 luokassa löydettiin tilanteita, joissa alkuperäinen profiili ei enää ollut halvin ratkaisu. Palonkestoluokassa R120 profiilin kasvatus toi parhaimmillaan jopa 14 % halvemmän rakenteen verrattuna alkuperäiseen rakenteeseen. Rakennuksen HEA 300 pilaria tarkasteltaessa huomataan taas, että halvin ratkaisu R30 palonkestoluokassa saadaan pienimmällä ilman palosuojamaalauksella kestäväällä profiililla (HEA 320). R60 luokassa alkuperäinen profiili tuli kuitenkin halvimmaksi, sillä profiili saatiin suojattua yhdellä maalikerroksella samoin kuin suuremmatkin profiilit. R120 luokassa taas alkuperäinen profiili nousi kaikkein kalleimmaksi ratkaisuksi, koska profiilille jouduttiin tekemään muita profiileja enemmän maalauksia. R120 luokassa halvimmaksi ratkaisuksi tuli taas HEA 320 pilari. Tämän pilarin tuloksista piirrettiin kuvaaja 3.



Kuvaaja 3: Yläpuolisen pilarin kustannukset.

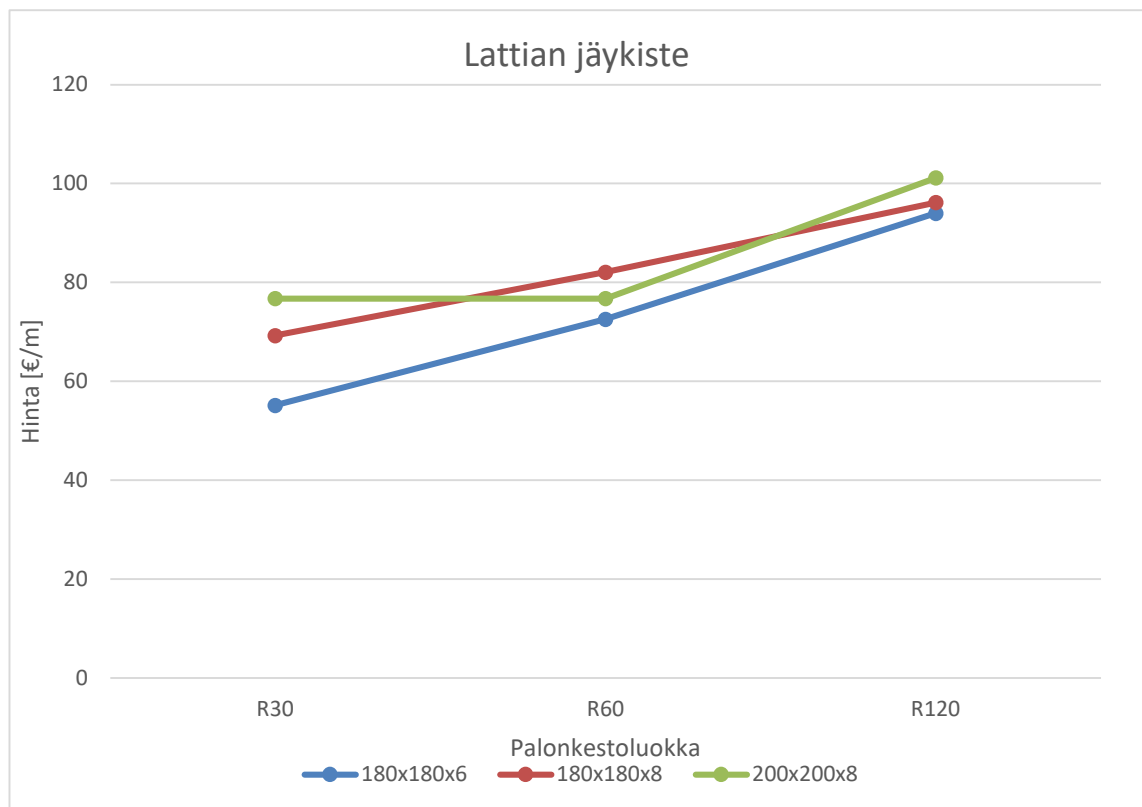
Tarkastellaan seuraavaksi rakennuksessa olevia rakenneputkista valmistettuja jäykisteitä. Jäykisteet laskettiin samalla menetelmällä eli Robotin lämpötila/aika menetelmällä kuin aikaisemmatkin rakenteet. Rakennuksesta tarkasteltavaksi valikoitui seinän vino-side, jonka alkuperäinen profiili oli 200x200x10. Tälle jäykisteelle saatiin kriittiseksi lämpötilaksi 792,16 °C ja se piti palosuojata 0,05 mm palosuojamaalikerroksella R30 palonkestoluokassa. Tämän jälkeen profiilia kasvatettiin profiiliin 200x200x12,5, jonka kriittisen lämpötilan arvoksi saatiin 825,85 °C ja rakennetta ei tarvinnut suojata R30 luokassa. Kasvatettiin vielä profiilia kokoon 250x250x8, jolloin kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 874,68 °C ja myöskään tätä profiilia ei tarvinnut palosuojata R30 luokassa. Laskettiin kustannukset myös muissa palonkestoluokissa jäykisteelle ja luotiin tuloksista alla oleva kuvaaja 4.



Kuvaaja 4: Seinän jäykisteen kustannukset.

Jäykisteen kuvaaja on hieman vaikeatulkintaisempi kuin edellä esitettyjen pilarin ja palkin. R30 luokassa huomataan, että 250x250x8 profiili tulee halvimmaksi ratkaisuksi ja 200x200x12,5 kalleimmaksi, vaikka molemmat toteutetaan ilman palosuojausta. Kustannusten ero johtuu suoraan rakenteiden painosta. 250x250x8 profiili on 9,2 kg/m kevyempi kuin 200x200x12,5 profiili. R60 ja R120 luokassa huomataan kuitenkin, että alkuperäinen profiili tulee halvimmaksi. Näissä luokissa alkuperäisen profiilin vahvempi seinämävahvuus johtaa siihen, että palosuojamaalin paksuus on pienempi kuin 250x250x8 profiililla ja siten alkuperäinen profiili kustannuksiltaan halvin.

Tarkastellaan vielä toinen putkiprofiilista valmistettu jäykiste. Jäykisteen alkuperäinen profiili oli 180x180x6, jonka kriittinen lämpötila oli 833,34 °C. Rakenne kesti 30 minuutin palon suojaamattomana mutta R60 luokassa vaadituksi palosuojauksen paksuudeksi saatiin 0,255 mm. Seuraavaksi profiilin seinämävahvuutta kasvatettiin 8 mm, jolloin kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 890,78 °C ja kalvopaksuudeksi R60 luokassa 0,14 mm. Profiilin kokoa yritettiin kasvattaa 200x200x5 ja 200x200x6 profiileiksi, mutta Robot tulkitse näiden kuuluvan poikkileikkausluokkaan 4, jolloin kriittiseksi lämpötilaksi tuli 350 °C. Tämä johtaisi huomattavasti suurempiin kalvopaksuuksiin ja rakenteisiin, joten näitä ei otettu mukaan kuvaajaan. Lopuksi tarkasteltiin vielä 200x200x8 profiili, jonka kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 961,14 °C ja rakenne kesti palosuojaamatta vielä R60 luokassa. Vaa- katason jäykisteen tuloksista piirrettiin kuvaaja 5.



Kuvaaja 5: Lattian jäykisteen kustannukset.

Kuvaajasta 5 huomataan, että alkuperäinen profiili on selvästi halvin R30 palonkestoluokassa, koska kaikki profiilit toimivat palosuojaamattomana ja 180x180x6 profiili on kevein tarkastelluista profiileista. R60 ja R120 luokissa huomataan, vaihtoehdot lähestyvät toisiaan, mutta alkuperäinen profiili säilyy halvimpana ratkaisuna.

5.3 Johtopäätökset

Palosuojamaalin kalvopaksuuksia ja teräsrakenteiden eri profiileja optimoitaessa on tärkeää tietää palosuojamaalin parametreja tai vähintään saada selville käytettävän palosuojamaalin hinta ja mitoitusaulukot. Kyseisiä tietoja voi olla välillä vaikea saada, jolloin on luotettavampaa käyttää valmistajien antamia mitoitusaulukoita. Lisäksi teräksen ja työn hinnat pitää olla tiedossa.

Tutkimuksessa huomattiin, että R30 palonkestoluokassa kaikissa tutkituissa pilareissa ja palkeissa alkuperäinen normaalilämpötilassa mitoitettu profiili tuli halvimmaksi ratkaisuksi. Palonkestoluokan noustessa tilanne muuttui ja alkuperäinen ratkaisu ei enää ollut aina halvin vaihtoehto. Palkkien alkuperäiset profiilit olivat HEA 200, HEA 220 tai HEA 240. R60 palonkestoluokassa halvimmaksi ratkaisuksi tuli joko alkuperäinen profiili tai profiili, jota kasvatettiin yksi tai kaksi profiilikokoa. Profiilikoon kasvatus tuli kannattavaksi silloin kun maalauskerroja saatiin vähennettyä. Eli esimerkiksi tilanteessa, jossa alkuperäinen profiili oli HEA 200 ja palonkestoluokka R60, saatiin profiilia kasvattamalla kokoon HEA 220 halvempi ratkaisu, koska maalauskerrojen määrä laski yhdellä. Tästä johtopäätöksenä voisi todeta, että R30 luokan rakenteilla tutkimuksen mukaista kustannusoptimointia ei kannata lähteä tekemään I-profiileille. Kuitenkin kaikille yli R30 paloluokan rakenteille, jotka ovat HEA 300 tai tätä pienempää kokoluokkaa, kustannusoptimointi kannattaa ehdottomasti tehdä. Lisäksi palkeilla huomattiin, että maalauskerrojen määrällä on vaikutusta kustannuksiin. Jos pystyttiin yhdellä profiilikoon nostolla vähentämään maalauskerrojen tarvetta, oli tämä ratkaisu usein halvempi.

Case-kohteen pilarit olivat HEA 400 profiilisia pilareita. Pilarin tuloksista huomattiin, että alkuperäinen profiili oli kaikissa tarkastelluissa palonkestoluokissa halvin. Tästä voidaan päätellä, että suurilla profiilikoilla ei välttämättä ole kannattavaa lähteä tekemään kustannusoptimointia. Tämä johtuu siitä, että profiilin kasvattamisella ei saatu kovin suurta hyötyä kriittisen lämpötilan arvoon eikä siten palosuojamaalauksen kalvopaksuuteen. Siten profiilin koko ja samalla hinta kasvoivat ilman suurta vaikutusta palosuojamaalin kustannuksiin. Kuitenkin tilanteissa, joissa on suuri profiilikoko ja kriittinen lämpötila on huomattavan pieni, voi kustannusoptimoinnista olla hyötyä.

Putkiprofiileja tarkasteltaessa huomattiin, että jo R30 palonkestoluokassa päästään mahdollisesti halvempaan ratkaisuun kasvattamalla teräsrakenteen profiilia. Esimerkissä alkuperäistä putkiprofiilia 200x200x10 kasvatettiin ensin niin, että sen seinämävahvuus muutettiin 12,5 mm:iin. Tämä toi kuitenkin kalliimman ratkaisun, vaikka rakenne toimi palosuojamattomana. Tämän jälkeen profiilikoko muutettiin 250x250x8, jolloin ra-

kenne toimi myös palosuojaamattomana. 250x250x8 profiilista tuli kuitenkin halvin tarkastelluista ratkaisusta, koska se oli kevyempi kuin 200x200x12,5 eikä tarvinnut palosuojausta. Tästä voidaan päätellä, että putkiprofiileilla seinämävahvuuden kasvattaminen ei ole kustannusnäkökulmasta kannattavaa, vaan ennemmin profiiliin ulkomittoja kannattaa kasvattaa ja vahvuutta pienentää. Sama ilmiö huomattiin toisella tarkastellulla jäykisteellä, vaikka alkuperäinen profiili pysyikin halvimpana ratkaisuna kaikissa palonkestoluokissa.

Tutkimuksessa huomattiin myös, että mitä lähempänä itse teräsrakenteen ja palosuojausmaalauksen kustannukset olivat, sitä kannattavampi ratkaisusta tuli. Tarkastelluille rakenteille tehtiin lisäksi herkkyystarkastelua, jotta tuloksia voisi helpommin vertailla todellisiin palosuojamaaleihin. Herkkyystarkastelua tehtiin muuttamalla palosuojamaalin hintaa, lämmönjohtavuutta sekä teräksen hintaa. Palosuojamaalin hintaa muuttamalla huomattiin, että mitä kalliimpi maali on, sitä kannattavammaksi kustannusoptimointi tulee. Jos taas palosuojamaalin hintaa laskettiin, alkuperäinen profiili säilyi halvimpana vaihtoehtona myös suuremmissa palonkestoluokissa. Palosuojamaalin lämmönjohtavuuden kasvattaminen taas heikentää palosuojamaalin toimintaa ja kasvattaa teräsrakenteen lämpötilaa. Tämä vaikuttaa taas siihen, että palosuojamaalin kalvopaksuudet kasvavat ja kustannuksista tulee kalliimmat. Optimoinnin kannalta käy samalla tavalla kuin palosuojamaalin hintaa muutettaessa. Jos taas teräksen hintaa lasketaan, palosuojausmaalauksen osuus kokonaiskustannuksista kasvaa. Tällöin profiiliin kasvattamisesta tulee taas kannattavampaa.

6. YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää miten rakennesuunnittelija voisi kehittää ja optimoida teräsrakenteiden palosuojausratkaisua rakennesuunnittelun yhteydessä kustannuskulmasta. Lisäksi työssä selvitettiin, miten Robot-laskentaohjelmaa voidaan käyttää hyväksi palosuojamaalauksen määrittämiseen. Tutkimuksessa selvitettiin ensin eri palosuojaustapoja sekä miten teräsrakenteen palomitoitus tehdään. Tämän jälkeen selvitettiin, miten Robotilla voidaan tehdä palomitoitusta sekä miten palosuojauksen voi laskea Robotilla. Laskentamenetelmien selvittämisen jälkeen valittiin case-kohteesta yksinkertaiset rakenteet, joille suoritettiin palomitoitus sekä käsin kriittisen lämpötilan- ja kestävyysmenetelmällä sekä Robotilla kestävyys-, lämpötila/aika- ja aikamenetelmillä. Lopuksi case-kohteen rakenteille tehtiin vielä kustannustarkastelua, jossa selvitettiin, olisiko kustannusten kannalta optimaalisempaa kasvattaa profiilikokoa vai palosuojamaalin paksuutta.

Tutkimuksen aikana selvitettiin haastattelemalla, miten palomitoitus tehdään tällä hetkellä. Vastaukseksi saatiin, että palomitoitus tehdään usein normaalilämpötilassa mitoitetuille rakeenteille, joille sitten määritetään kriittinen lämpötila. Kriittinen lämpötila merkitään edelleen piirustuksiin, jotka lähetetään konepajalle ja konepaja määrittää rakenteelle palosuojauksen. Tutkimuksessa selvisi kuitenkin, että tämä menetelmä ei kustannuksien kannalta ole optimaalinen vaihtoehto. Kustannusten kannalta edullisempaan vaihtoehtoon päästään, kun otetaan palomitoituksessa huomioon myös mahdollisuus profiilikoon kasvattamiselle.

Teräsrakenteiden palomitoitus tehtiin työssä usealla eri menetelmällä sekä käsinlaskien, että Robottia käyttäen. Robotilla onnistuttiin laskemaan palomitoitus sekä suojaamattomana että suojattuna vaivattomasti. Tarkastelujen perusteella voidaankin todeta, että Robot on hyvä työkalu teräsrakenteiden palomitoitukseen ja palosuojauksen määrittämiseen. Ainut ongelma Robottia käytettäessä on, että palosuojausta mitoitettaessa Robot tarvitsee palosuojamaalien parametreja, joita voi olla vaikea saada selville. Yleensä rakennesuunnittelijan on helpompi löytää palosuojamaalin mitoitustaulukoita, kuin näitä taulukoita. Tässä tapauksessa Robotilla saadaan helposti laskettua rakenteen kriittinen lämpötila ja selvittää sen avulla palosuojauksen paksuus mitoitustaulukoiden avulla.

Robotilla pystytään laskemaan palomitoitus kolmella eri menetelmällä. Nämä menetelmät ovat kestävyteen, lämpötilaan/aikaan ja aikaan perustuvat menetelmät. Lämpötila/aika ja aika menetelmät erosivat toisistaan vain tarkasteltavan suureen osalta, eli

kestävyydet olivat näillä menetelmillä täysin samat. Lämpötilaan/aikaan perustuva menetelmä käytti vertailusuurena kriittistä lämpötilaa, kun taas aikaan perustuva menetelmä aikaa. Lämpötilaan/aikaan ja kestävyysperustuvien menetelmien välillä kestävyksien arvoissa oli pieniä eroja, mutta palosuojamaalauksen paksuuksissa rakenteille oli suurimmillaan 5 μm ero.

Ainut ongelma Robottia käytettäessä tuli suojaamattomalle pilarille, jonka käyttöasteet nousivat suuriksi korkeissa palonkestoluokissa. Tämä johti kestävyysmenetelmää käytettäessä siihen, että Robot alkoi vaihtaa tarkasteltavaa poikkileikkausta sekä kuormitus-tapausta. Tämä johtui plastisuusteorian mukaan pienennetyn taivutuskestävyyden arvosta. Koska rakenteen normaalivoiman käyttöaste nousi reilusti yli yhden, aiheutti se juuri pienennetyn taivutuskestävyyden laskennan kanssa ongelmia. Tämän vuoksi Robotin kestävyysmenetelmää käytettäessä suuria käyttöasteita kannattaa tarkastella kriittisesti. Lämpötila/aika menetelmään tämä ilmiö kuitenkin ei vaikuttanut. Eurokoodini kaavat eivät sovellu näin ylikuormitettuihin tapauksiin, joten suojaamattoman rakenteen tarkastelu rajattiin lopulta R15 palonkestoluokkaan.

Käsinlaskuissa käytettiin kahta eri menetelmää. Kestävyysmenetelmää, joka vastasi Robotiin kestävyysmenetelmää sekä kriittisen lämpötilan menetelmää, joka taas vastasi Robotin Lämpötila/aika menetelmää. Palosuojaamattomien rakenteiden tarkasteluissa käsinlaskennan ja Robotin välillä oli hyvin vähän eroja. Saadut palosuojamaalauksen kalvopaksuudet vastasivat myös hyvin Robotilla saatuja arvoja. Kriittisen lämpötilan menetelmää käytettäessä käsin laskien saatiin hieman suurempi kriittinen lämpötila ja siten pienemmät kalvopaksuudet kuin Robotilla. Käsin laskuissa ongelmaksi muodostui palkin palosuojatun rakenteen laskenta kestävyysmenetelmällä. Tässä rakenne kesti vasta noin 50 °C pienemmässä lämpötilassa kuin muilla menetelmillä laskettuna. Tuloksia tarkasteltaessa huomattiin, että muut kestävyudet vastasivat hyvin toisiaan, paitsi kiepahdus. Tämä johtui mahdollisesti käsinlaskuissa tehdystä oletuksesta, että lämpötila jakaantuu tasaisesti profiilissa. Myös Robotin käyttämä vääntöjäyhyyden arvo oli eri kuin taulukkoarvo käsin laskiessa, joka aiheutti kiepahduskestävyyden arvoon eroja.

Yleisesti voidaan siis todeta, että Robot ja käsinlaskenta antoivat varsin samansuuruisia tuloksia muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Lisäksi saadut palosuojauksen paksuudet olivat hyvin lähellä toisiaan käsin kestävyysmenetelmällä laskettua palkkia lukuun ottamatta. Robotin molemmat menetelmät ovat siis hyviä vaihtoehtoja, mutta kestävyysmenetelmää käytettäessä kannattaa olla tarkkana suurien käyttöasteiden kanssa. Siksi suosisin itse lämpötilaan/aikaan perustuvan menetelmän käyttöä.

Kustannuksia tutkittaessa käytettiin Hempacore one 43600 palosuojamaalia. Palosuojamaalien parametreja on kuitenkin vaikea saada selville. Tapauksissa, joissa niitä ei saada selvitettyä on parempi käyttää valmistajan antamia valmiita mitoitusaulukoita. Näiden taulukoiden käyttämiseen tarvitsee usein kriittisen lämpötilan, joka saadaan helposti määritettyä Robotilla, sekä profiilin poikkileikkaustekijän. Kustannusten laskemiseen käytettiin Robotin lämpötilaan/aikaan perustuvalla menetelmällä laskettuja palosuojamaalin paksuuksia. Palosuojamaalin paksuudet sekä profiilitiedot kirjattiin Exceliin, jossa laskettiin rakenteelle kustannukset. Kustannuksista piirrettiin edelleen kuvaajia, joista nähdään helposti eri palonkestoluokissa halvin ratkaisu.

Ennen kustannusten laskemista rakenteet ryhmiteltiin palomitoituksen kannalta järkevästi Robottiin. Ideana oli, että yhdelle ryhmälle saataisiin määriteltyä sama palosuojamaalauksen paksuus ja ryhmiä pyrittiin muodostamaan mahdollisimman vähän. Palosuojauksen mitoituksessa on tärkeää profiilin muoto sekä kuormitus. Näistä määräytyy rakenteen poikkileikkaustekijä sekä kriittinen lämpötila. Rakenteet ryhmiteltiin siten, että jokaisen kerroksen palkit ryhmiteltiin omiksi ryhmikseen. Lisäksi nämä ryhmät jaettiin vielä profiilikokojen mukaan pienempiin ryhmiin. Rakennuksen pilarit ryhmiteltiin alasekä yläpuolisiin pilareihin, sillä niiden profiilikoot olivat erit. Lisäksi vinositeet ryhmiteltiin omaksi ryhmikseen. Ryhmittely on siten kannattavaa, että voidaan aina valita yhden ryhmän rakenteet ja tehdä niille palomitoitus. Tämän jälkeen voidaan valita rasitetuin profiili, jolle määritetään palosuojaus ja samaa palosuojausta voidaan edelleen käyttää muille ryhmän profiileille.

Kustannuksista huomattiin, että R30 palonkestoluokassa alkuperäinen normaalilämpötilassa mitoitettu profiili oli halvin vaihtoehto lähes kaikissa rakenteissa. Yhdessä pilarissa ja jäykisteessä R30 luokassa löytyi alkuperäisestä profiilista poikkeava halvin ratkaisu. R60 luokassa taas löydettiin useammin alkuperäisestä profiilista poikkeava ratkaisu, joka oli halvin. Näistä poikkeavana rakenteena löydettiin pilari, joka oli HEA 400 profiilia. Tällä rakenteella alkuperäinen profiili oli halvin aina R120 palonkestoluokkaan asti. Tämä johtui siitä, että rakenne oli itsessään suuri, eikä profiiliin kasvattamisella saatu kriittisen lämpötilan arvoon juuri muutosta. Tällöin palosuojamaalin kustannukset eivät myöskään juuri muuttuneet samalla kun profiiliin koko ja hinta kasvoivat. Tämän tutkimuksen kaltainen kustannusoptimointi kannattaa siis ottaa mukaan teräsrakenteiden suunnittelu-prosessiin etenkin, jos ylitetään 30 minuutin palonkestovaatimus. Mitä suuremmaksi vaadittu palonkesto aika menee, sitä kannattavammaksi profiilin kasvatus yleensä tulee. Nyrkkisääntönä ainakin HEA profiileille voisi sanoa, että R60 luokassa pienemmillä profiileilla kuin HEA 400 kannattaa profiilia yrittää kasvattaa 1 tai 2 kokoa suuremmaksi, tällöin voidaan helposti päästä kustannuksilta halvempaan ratkaisuun kuin alkuperäinen

profiili. Profiilikokoa kannattaa myös aina kasvattaa vähintään yksi koko suuremmaksi R60 palonkestoluokassa, jos maalikerroksien määrää saadaan vähennettyä. Lisäksi putkiprofiileilla seinämävahvuuden kasvattaminen ei usein tuo halvempaa ratkaisua, mutta profiiliin ulkomittojen kasvattamisella voidaan päästä halvempaan ratkaisuun.

Kustannuksista huomattiin myös, että jos joudutaan maalaamaan yksi uusi palosuojamaalikerros, kustannukset nousevat merkittävästi. Tällöin profiili, joka pystyttiin maalamaan vähemmällä maalauskerroilla tuli halvemmaksi. Lisäksi mitä lähempänä itse teräsprofiilin ja palosuojamaalauksen kustannukset olivat toisiaan, sitä halvempi ratkaisu saatiin. Rakennesuunnittelija pystyy siis ottamaan kustannusoptimoinnin mukaan suunnitteluprosessin, jos tiedossa on palosuojamaalin parametrit tai mitoitustaulukot sekä palosuojamaalin hinta. Jos parametrit tiedetään, voidaan ne syöttää suoraan Robottiin, josta saadaan vaadittu palosuojamaalauksen kalvopaksuus. Jos taas parametreja ei tiedetä, voidaan Robotilla laskea rakenteen kriittinen lämpötila ja tarkastella vaadittu palosuojamaalauksen kalvopaksuus valmistajan mitoitustaulukosta. Tämän jälkeen voidaan laskea aina rakenteelle kustannukset ja vertailla eri profiileja.

Palosuojamaalauksen optimointi voisi olla hyvin osa teräsrakenteiden suunnittelua, mutta palosuojamaalien parametrien löytämisen vaikeus tekee prosessista hyvin haastavaa. Tämän vuoksi olisikin hienoa, jos palosuojamaalien valmistajat jakaisivat omien maaliensa tietoja avoimemmin. Kustannuksia voisi vielä tutkia useammilla palosuojamaaleilla, jos saataisiin tietoon enemmän parametreja sekä mitoitustaulukoita. Tällöin valmistajien tarjoamista mitoitustaulukoista voitaisiin merkitä rajat, jolloin palosuojauksessa joudutaan aloittamaan uusi maalauskerros. Siten kustannuksiltaan halvempaa ratkaisua voitaisiin edelleen hakea näiden rajojen alapuolelta. Jos kustannusoptimointiin haluaisi perehtyä vielä syvemmin, voisi Robottiin kehittää esimerkiksi lisäosan, joka osaisi ottaa kustannukset huomioon ja optimoida rakenteet kustannusten perusteella palosuojaus huomioiden.

LÄHTEET

Aghayan, H. (2017) Experimental and Numerical Modelling of Intumescent Protected Flooring Cellular Steel Beams Subjected to Extreme Fire Conditions. Ulster: Ulster University. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy.

Autodesk (2021a) About fire resistance for steel members (EC3). Saatavissa (viitattu 7.2.2023) <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2021/ENU/?guid=GUID-02B30F64-0944-4A1B-BBF9-A5FD1132C9D1>

Autodesk (2021b) Rules of Fire Resistance Calculations. Saatavissa (viitattu 27.4.2023) <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2021/ENU/?guid=GUID-53AEA3CB-0A1A-426C-808B-09B3A5D1E156>

Autodesk (2020a) How to run a steel design with fire analysis for Eurocode 3 based codes in Robot Structural Analysis. Saatavissa (viitattu 3.2.2023) <https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-professional/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ROBOT-Steel-design-How-to-run-a-fire-analysis.html>

Autodesk (2014) Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Verification manual for EU codes. Saatavissa (viitattu 3.2.2023) https://help.autodesk.com/sfdcarticles/attachments/Verification_Manual_Eurocodes.pdf

BE Group Oy Ab (2020) Teräsrakentajan käsikirja. Saatavissa (viitattu 10.1.2023) <https://www.begroup.fi/storage/50DF70DB27B273C31A577A2353FADFC29DA972AEA4D47289A795979393B51158/6d68254c1ffa48348d96d72388782379/pdf/media/c543eac1527f4652b496429bdbd666cf/BE-Group-Terasrakentajan-kasikirja-web.pdf>

Comité Européen de Normalization (CEN). EN 13381-8:2013 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 8: Applied reactive protection to steel members. Brussels, Belgium, 2013.

ECCS TC 3 (2001) Model Code on Fire Engineering. European Convention for Constructional Steelwork.

Eurocode applied. Eurocode 3. Table of design properties for flanged steel profiles (IPE, HEA, HEB, HEM, UB, UC, UBP). Saatavissa (viitattu 27.2.2023) <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/ipe-hea-heb-hem-design-properties>

Eurokoodit (2021) Eurokoodien tarkoitus. Saatavissa (viitattu 21.12.2022) <https://www.eurocodes.fi/eurokoodit-tarkoitus/>

European Technical Approval No. ETA-12/0581.

Hempel (2016) Product Data. Hempacore one 43600. saatavissa (viitattu 24.4.2023) <https://www.hempel.com/products/hempacore-one-43600>

Inha, T. & Iso-Mustajärvi, P. (1997) Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus, Tampereen teknillisen korkeakoulun julkaisu 72.

Inha, T. & Mattila, J. (1991) Teräsrakenteiden palosuojauksen suunnittelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laitos. TTKK Offsetpaino. Tampere.

Iso-Mustajärvi, P. & Inha, T. (1999) Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus. Teräsrakenneyhdistys ry. Rakennustieto Oy. Helsinki.

Johansson, J. (2013) Teräsrakenteiden palosuojamenetelmien kustannusvertailu. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 27.4.2023) <https://www.theseus.fi/bitstream/10024/66127/1/Terasrakenteiden%20palosuojausmenetelmien%20kustannusvertailu.pdf>

Jokinen, T., Mela, K., Tiainen, T. & Heinisuo, M. (2016) Optimization of tubular trusses using intumescent coating in fire. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 27.2.2023) http://rmseura.tkk.fi/rmllehti/2016/nro4/RakMek_49_4_2016_1.pdf

Lucherini, A. (2020) Fundamentals of thin intumescent coatings for the design of fire-safe structures. Queensland: The University of Queensland. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy.

Paroc (2019) Palosuojausopas 1/teräs: Kantavat teräspalkit ja -pilarit, profiilipeltikatot ja väliseinät. Paroc. Saatavissa (viitattu 26.1.2023) <https://www.paroc.fi/kayttokohteet/-/media/F26AFF339E104736AD9ACD4C9508B606.ashx>

Rakennustieto (2015) Ratu 0439. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 27.2.2023) <https://korkistot-rakennustieto-fi.libproxy.tuni.fi/kortit/Ratu%200439?navref=Search>

Robot Structural Analysis Professional 2021. 34.0.7777. April 2020. Autodesk.

SFS-EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 8: Applied reactive protection to steel members. Suomen standardisointiliitto. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 24.4.2023) <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/236716.html.stx>

SFS-EN 1993-1-1 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisointiliitto. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 10.1.2023) <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9344.html.stx>

SFS-EN 1993-1-2 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–2: Rakenteen palomitoitus. Suomen standardisointiliitto. Saatavissa rajoitetusti (viitattu 10.1.2023) <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9350.html.stx>

SFS-EN ISO 12944-2:2017. 2017. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojaamaliyhdistelmillä. Osa 2: Ympäristöolosuhteiden luokittelu. Suomen Standardisointiliitto SFS.

SFS-EN ISO 1363-:2020. 2020. Fire resistance tests. Part 1: General requirements. Suomen Standardisointiliitto SFS.

Teräsrakenneyhdistys ry (2006). TRY-112-2006. Varmennettu käyttöseloste. Saatavissa (viitattu 24.4.2023) <http://www.pyromaster.fi/PDF/TRY-112-2006.pdf>

Teräsrakenneyhdistys ry (2017) Teräsrakenteiden palosuojamaalaus 2017. Teräsrakenneyhdistys ry. Helsinki. Saatavissa (viitattu 12.12.2022) https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/974/90d3a9c/Terasrakenteiden_palosuojamaalaus_TRY_2017.pdf

Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2020, Eurokoodi 3 -oppikirja. Helsinki. Teräsra-
kenneyhdistys ry.

Jactio. The cost of structural steel 2022. Saatavissa (viitattu 11.4.2023) <https://jactio.com/en/the-cost-of-structural-steel-per-kg-in-2022/>

Wald, F. et al. (2006) On bolted connection with intumescent coatings. Praha: Czech
Technical University in Prague.

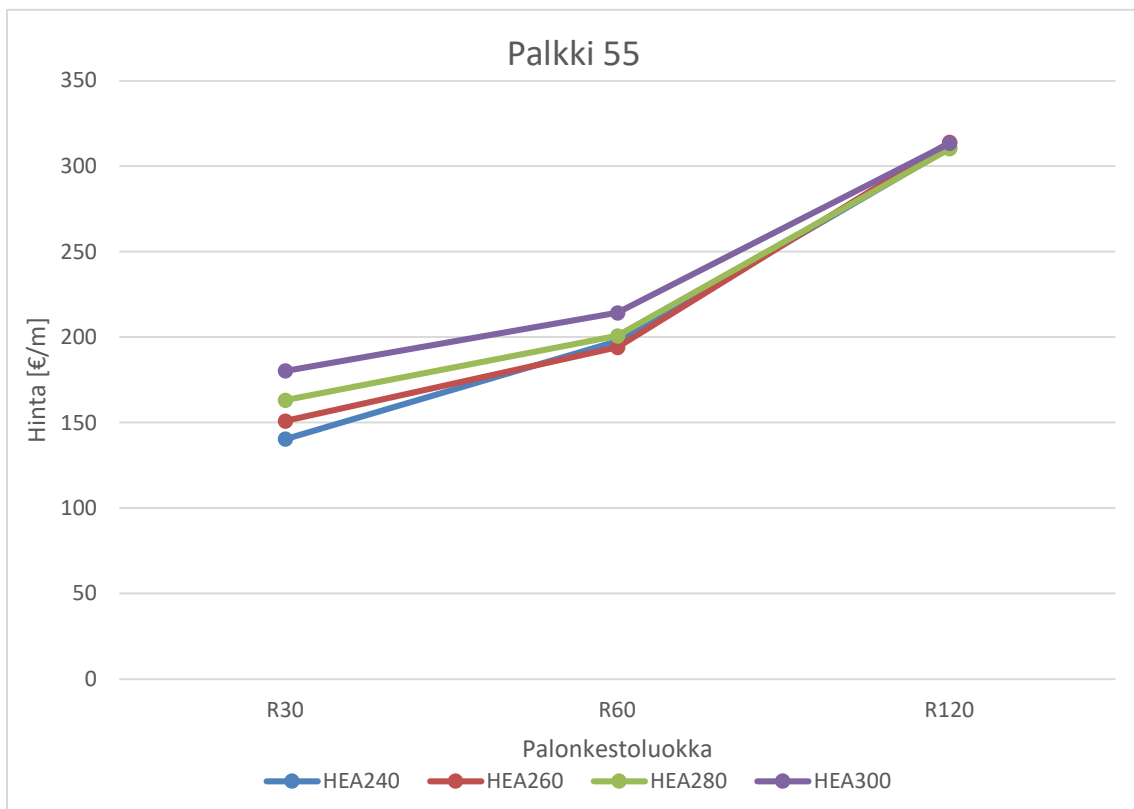
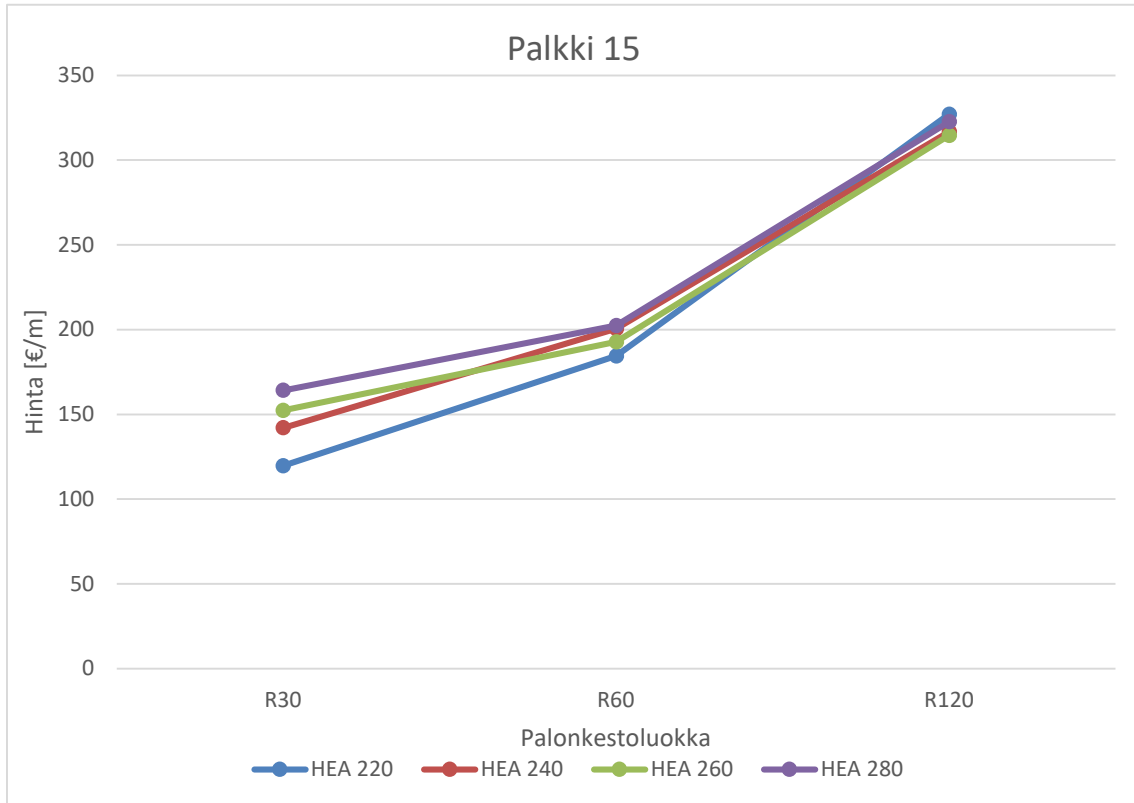
Ympäristöministeriö (2022) Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

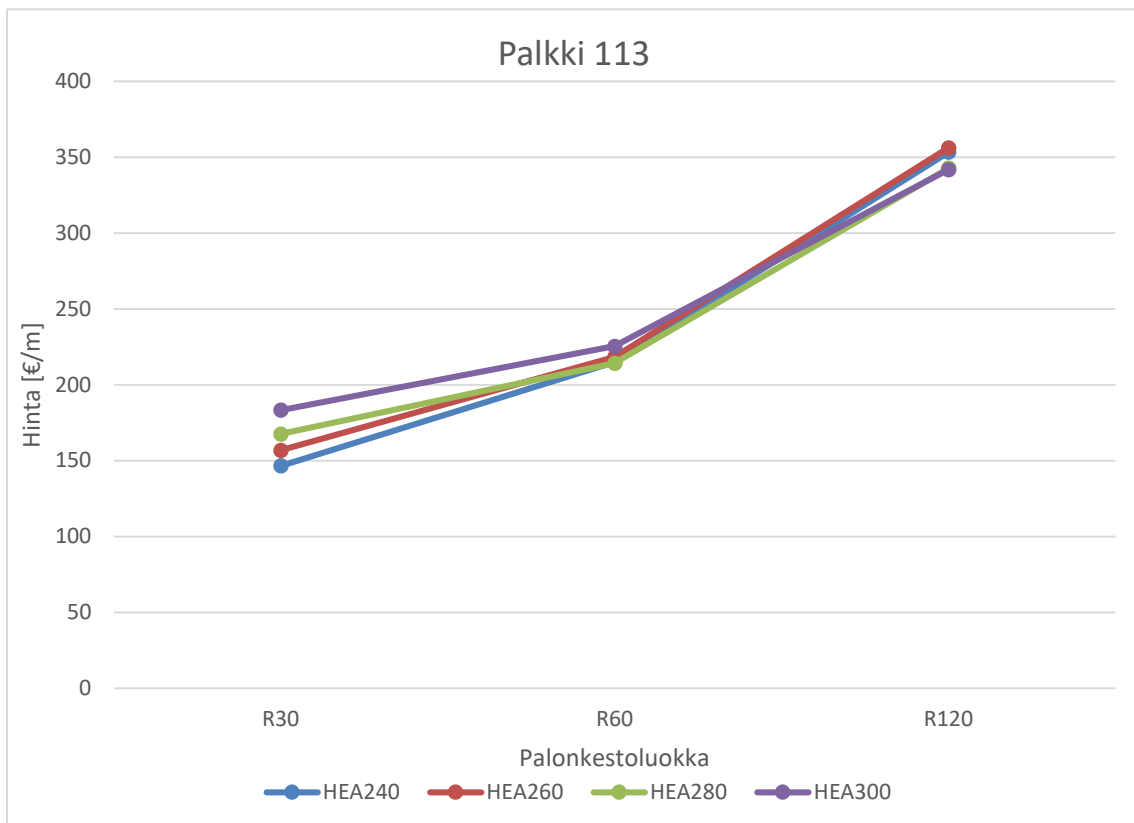
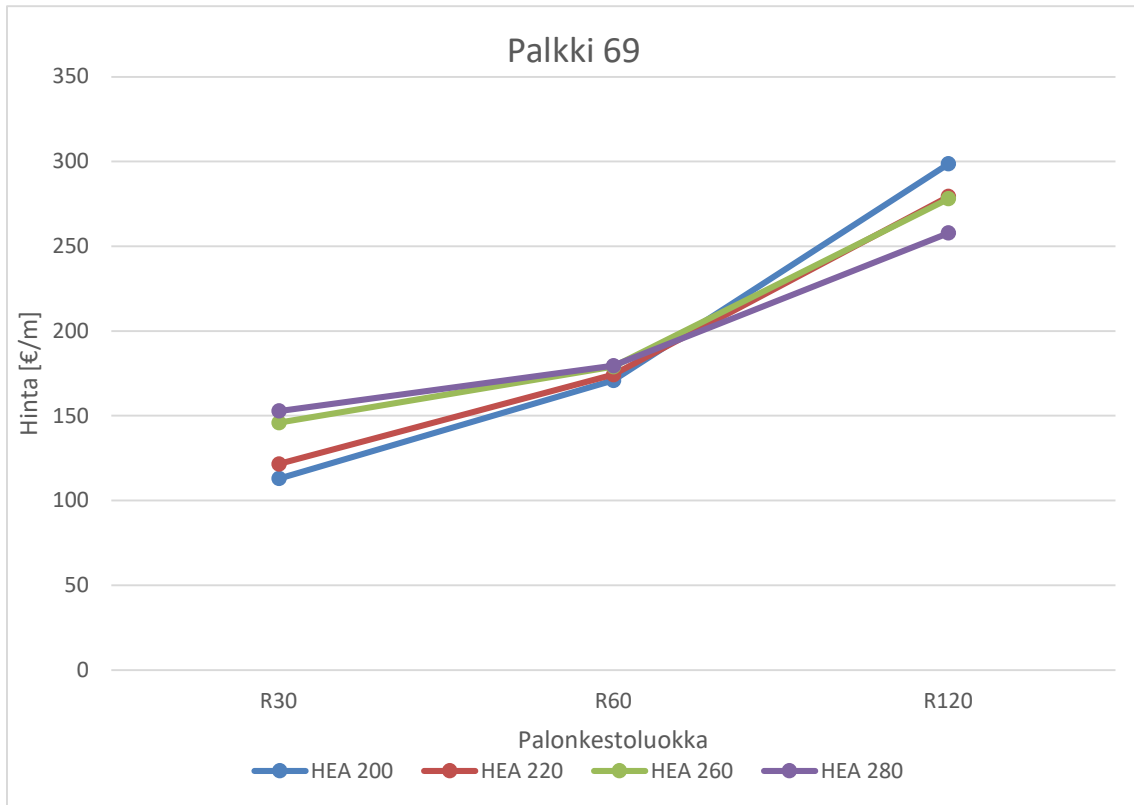
Ympäristöministeriö (2018) Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017. Ympäristöministeriö. Saatavissa (viitattu 17.1.2023) <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170848>

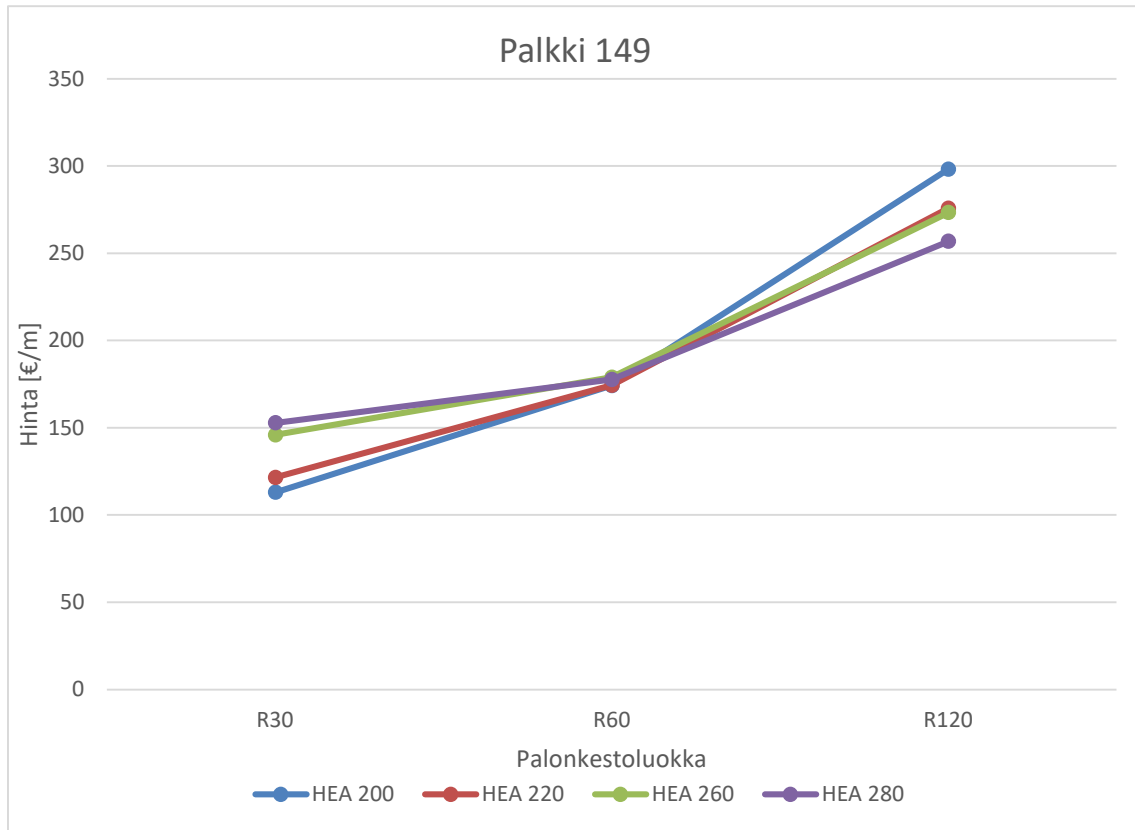
Ympäristöministeriö. CE-merkintä. Saatavissa (Viitattu 13.1.2023) <https://ym.fi/ce-merkinta>

LIITE A: KUSTANNUSKUVAAJAT

Liitteessä A on esitetty kustannuskuvaajat loppuista tarkastelluista rakenteista, joita ei esitetty runkotekstissä.







LIITE B: PALOSUOJAAMATTOMAN RAKENTEEN LÄMPÖTILAN LASKEMINEN

Liitteessä B on esitetty palosuojaamattoman rakenteen lämpötilan laskeminen HEA 400 pilarille. Samaa laskentapohjaa sovellettiin myös muille rakenteille muuttamalla parametreja.

HEA 400

Lähtötiedot:

$\Delta t=5s=$	0,08 [min]	Aika-askel	1993-1-2 (4.2.5.1)
b	0,30 m	Poikkileikkauksen leveys	
h	0,39 m	Poikkileikkauksen korkeus	
p	1,91 m	Poikkileikkauksen piiri	
A	0,02 m ²	Poikkileikkauksen pinta-ala	
[Am/V]	120,27 >10 l/m	Poikkileikkaustekijä	
[Am/V]b	86,80	Profiilin ympärille kuvitellun kotelon poikkileikkaustekijä	
ksh	0,65	Varjostusvaikutuksen korjaustekijä	
αc	25,00 W/m ² K	Kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin	
Φ	1,00	Näkyvyyskerroin	
ϵm	0,70	Pinnan säteilykerroin	
ϵf	1,00	Palon säteilykerroin	
σ	5,67E-08 W/m ² K ⁴	Stefan-Boltzmann- vakio	
ρ	7850,00 kg/m ³	Ominaisihteys	

t [min]	$\theta_{g,t}$ [°C]	$h_{net,c}$ [W/m ²]	$h_{net,r}$ [W/m ²]	h_{net} [W/m ²]	c_a [J/kg°C]	$\Delta\theta_{a,t}$ [°C]	$\theta_{a,t}$ [°C]
0	20						20,0
0,08	96,53782	1913	448	2361,072898	440	0,267	20,3
0,17	146,952	3167	941	4108,003369	440	0,465	20,7
0,25	184,6068	4097	1445	5541,83554	440	0,626	21,4
0,33	214,6736	4833	1947	6779,819355	441	0,765	22,1
0,42	239,7036	5440	2441	7880,915832	441	0,889	23,0
0,50	261,1447	5953	2926	8879,431556	442	1,000	24,0
0,58	279,898	6397	3400	9797,322453	443	1,101	25,1
0,67	296,5632	6786	3863	10649,61691	443	1,195	26,3
0,75	311,5588	7131	4316	11447,12848	444	1,282	27,6
0,83	325,1893	7440	4758	12197,94395	445	1,364	29,0
0,92	337,6825	7718	5190	12908,29908	446	1,440	30,4
1,00	349,2137	7970	5613	13583,12362	447	1,512	31,9
1,08	359,9205	8200	6026	14226,39605	448	1,580	33,5
1,17	369,913	8411	6431	14841,38339	449	1,645	35,1
1,25	379,2805	8604	6827	15430,80832	450	1,706	36,8
1,33	388,0966	8781	7215	15996,96902	451	1,764	38,6
1,42	396,4228	8946	7596	16541,82691	452	1,819	40,4
1,50	404,3105	9097	7970	17067,07236	454	1,872	42,3
1,58	411,8036	9238	8336	17574,17471	455	1,923	44,2
1,67	418,9398	9368	8696	18064,42092	456	1,971	46,2
1,75	425,7515	9489	9050	18538,94595	457	2,017	48,2
1,83	432,2669	9602	9397	18998,75686	459	2,062	50,3
1,92	438,5108	9706	9739	19444,75219	460	2,104	52,4
2,00	444,5049	9803	10074	19877,73767	461	2,145	54,5
2,08	450,2683	9894	10405	20298,43915	462	2,184	56,7
2,17	455,8183	9978	10729	20707,51319	464	2,222	58,9
2,25	461,17	10056	11049	21105,55602	465	2,258	61,2
2,33	466,3371	10129	11364	21493,11095	466	2,293	63,5
2,42	471,332	10197	11674	21870,67465	468	2,326	65,8
2,50	476,1657	10259	11979	22238,70255	469	2,359	68,2

2,58	480,8483	10317	12280	22597,6134	471	2,390	70,5
2,67	485,389	10371	12577	22947,79321	472	2,420	73,0
2,75	489,7961	10421	12869	23289,59866	473	2,449	75,4
2,83	494,0773	10467	13157	23623,36004	475	2,477	77,9
2,92	498,2396	10509	13441	23949,38387	476	2,504	80,4
3,00	502,2893	10547	13721	24267,95511	477	2,530	82,9
3,08	506,2325	10583	13997	24579,3392	479	2,555	85,5
3,17	510,0745	10615	14269	24883,78378	480	2,579	88,1
3,25	513,8205	10644	14537	25181,52026	481	2,602	90,7
3,33	517,4751	10670	14802	25472,76519	483	2,625	93,3
3,42	521,0427	10694	15064	25757,72152	484	2,647	95,9
3,50	524,5273	10715	15322	26036,57967	486	2,668	98,6
3,58	527,9327	10733	15576	26309,51856	487	2,689	101,3
3,67	531,2624	10749	15827	26576,70646	488	2,708	104,0
3,75	534,5198	10763	16075	26838,30182	490	2,728	106,7
3,83	537,7078	10775	16320	27094,45398	491	2,746	109,5
3,92	540,8294	10784	16561	27345,30384	492	2,764	112,2
4,00	543,8873	10791	16800	27590,98448	494	2,781	115,0
4,08	546,884	10797	17035	27831,62165	495	2,798	117,8
4,17	549,822	10800	17267	28067,33431	496	2,814	120,6
4,25	552,7035	10802	17496	28298,23507	498	2,830	123,5
4,33	555,5306	10802	17723	28524,43063	499	2,845	126,3
4,42	558,3053	10800	17946	28746,02213	500	2,860	129,2
4,50	561,0296	10797	18166	28963,1055	501	2,874	132,0
4,58	563,7052	10792	18384	29175,77184	503	2,888	134,9
4,67	566,3339	10785	18599	29384,10764	504	2,901	137,8
4,75	568,9173	10777	18811	29588,19513	505	2,914	140,7
4,83	571,4569	10768	19020	29788,11249	507	2,926	143,7
4,92	573,9541	10757	19227	29983,9341	508	2,938	146,6
5,00	576,4104	10745	19431	30175,73077	509	2,950	149,6
5,08	578,8271	10732	19632	30363,56993	510	2,961	152,5
5,17	581,2055	10717	19830	30547,51586	511	2,972	155,5
5,25	583,5466	10701	20026	30727,62981	513	2,982	158,5
5,33	585,8518	10685	20219	30903,97022	514	2,992	161,5
5,42	588,122	10666	20410	31076,59284	515	3,002	164,5
5,50	590,3583	10647	20598	31245,55091	516	3,011	167,5
5,58	592,5618	10627	20784	31410,89527	517	3,020	170,5
5,67	594,7333	10606	20967	31572,67451	519	3,029	173,5
5,75	596,8738	10584	21147	31730,93508	520	3,037	176,6
5,83	598,9841	10561	21325	31885,72142	521	3,045	179,6
5,92	601,0651	10536	21501	32037,07603	522	3,053	182,7
6,00	603,1176	10511	21674	32185,03964	523	3,060	185,7
6,08	605,1424	10486	21844	32329,65124	524	3,067	188,8
6,17	607,1402	10459	22012	32470,94822	526	3,074	191,9
6,25	609,1117	10431	22178	32608,96642	527	3,080	194,9
6,33	611,0576	10403	22341	32743,74024	528	3,086	198,0
6,42	612,9785	10374	22502	32875,30272	529	3,092	201,1
6,50	614,8752	10344	22660	33003,6856	530	3,098	204,2
6,58	616,7481	10313	22816	33128,91939	531	3,103	207,3
6,67	618,5979	10282	22969	33251,03346	532	3,108	210,4

6,75	620,4251	10250	23120	33370,05607	534	3,112	213,5
6,83	622,2303	10217	23269	33486,01448	535	3,117	216,7
6,92	624,0141	10184	23415	33598,93497	536	3,121	219,8
7,00	625,7768	10150	23559	33708,84291	537	3,125	222,9
7,08	627,5191	10115	23700	33815,76281	538	3,128	226,0
7,17	629,2413	10080	23839	33919,71841	539	3,131	229,2
7,25	630,9439	10045	23976	34020,73264	540	3,134	232,3
7,33	632,6275	10008	24111	34118,82779	541	3,137	235,4
7,42	634,2923	9971	24243	34214,02546	542	3,139	238,6
7,50	635,9388	9934	24372	34306,34663	543	3,142	241,7
7,58	637,5674	9896	24500	34395,81173	544	3,144	244,9
7,67	639,1785	9858	24624	34482,44067	546	3,145	248,0
7,75	640,7725	9819	24747	34566,25285	547	3,147	251,2
7,83	642,3497	9780	24867	34647,26723	548	3,148	254,3
7,92	643,9104	9740	24985	34725,50238	549	3,149	257,4
8,00	645,4551	9700	25101	34800,97645	550	3,149	260,6
8,08	646,984	9660	25214	34873,7073	551	3,150	263,7
8,17	648,4975	9619	25325	34943,71244	552	3,150	266,9
8,25	649,9958	9577	25434	35011,00913	553	3,150	270,0
8,33	651,4793	9536	25540	35075,61439	554	3,149	273,2
8,42	652,9482	9494	25644	35137,54499	555	3,149	276,3
8,50	654,4029	9451	25745	35196,81755	556	3,148	279,5
8,58	655,8436	9409	25845	35253,44852	558	3,147	282,6
8,67	657,2706	9366	25942	35307,45421	559	3,145	285,8
8,75	658,6841	9323	26036	35358,85084	560	3,144	288,9
8,83	660,0844	9279	26129	35407,65455	561	3,142	292,1
8,92	661,4718	9235	26219	35453,8814	562	3,140	295,2
9,00	662,8464	9191	26307	35497,54743	563	3,137	298,3
9,08	664,2085	9147	26392	35538,66868	564	3,135	301,5
9,17	665,5583	9102	26475	35577,26117	565	3,132	304,6
9,25	666,8961	9057	26556	35613,34098	566	3,129	307,7
9,33	668,2221	9012	26635	35646,92421	568	3,125	310,9
9,42	669,5364	8967	26711	35678,02705	569	3,122	314,0
9,50	670,8393	8921	26785	35706,66575	570	3,118	317,1
9,58	672,131	8876	26857	35732,85669	571	3,114	320,2
9,67	673,4116	8830	26927	35756,61632	572	3,110	323,3
9,75	674,6813	8784	26994	35777,96128	573	3,105	326,4
9,83	675,9404	8738	27059	35796,9083	574	3,101	329,5
9,92	677,189	8691	27122	35813,47431	576	3,096	332,6
10,00	678,4273	8645	27183	35827,67638	577	3,091	335,7
10,08	679,6555	8598	27241	35839,53177	578	3,085	338,8
10,17	680,8736	8552	27297	35849,05795	579	3,080	341,9
10,25	682,0819	8505	27351	35856,27257	580	3,074	345,0
10,33	683,2806	8458	27403	35861,1935	582	3,068	348,0
10,42	684,4697	8411	27453	35863,83883	583	3,062	351,1
10,50	685,6495	8364	27500	35864,22688	584	3,055	354,1
10,58	686,8201	8317	27546	35862,37621	585	3,048	357,2
10,67	687,9816	8270	27589	35858,3056	587	3,041	360,2
10,75	689,1341	8222	27630	35852,03408	588	3,034	363,3
10,83	690,2779	8175	27668	35843,58096	589	3,027	366,3

10,92	691,413	8128	27705	35832,96576	591	3,020	369,3
11,00	692,5396	8081	27740	35820,20829	592	3,012	372,3
11,08	693,6577	8033	27772	35805,3286	593	3,004	375,3
11,17	694,7676	7986	27802	35788,347	594	2,996	378,3
11,25	695,8693	7939	27831	35769,28408	596	2,988	381,3
11,33	696,9629	7891	27857	35748,16066	597	2,979	384,3
11,42	698,0487	7844	27881	35724,99785	598	2,970	387,3
11,50	699,1266	7797	27903	35699,81701	600	2,962	390,2
11,58	700,1968	7749	27923	35672,63975	601	2,952	393,2
11,67	701,2595	7702	27941	35643,48794	603	2,943	396,1
11,75	702,3146	7655	27958	35612,3837	604	2,934	399,1
11,83	703,3624	7608	27972	35579,34941	605	2,924	402,0
11,92	704,4029	7561	27984	35544,40767	607	2,915	404,9
12,00	705,4362	7514	27994	35507,58135	608	2,905	407,8
12,08	706,4625	7467	28002	35468,89353	610	2,895	410,7
12,17	707,4818	7420	28009	35428,36753	611	2,884	413,6
12,25	708,4941	7373	28013	35386,02688	613	2,874	416,5
12,33	709,4997	7326	28016	35341,89535	614	2,863	419,3
12,42	710,4986	7280	28016	35295,9969	616	2,853	422,2
12,50	711,4909	7233	28015	35248,35569	617	2,842	425,0
12,58	712,4766	7187	28012	35198,99607	619	2,831	427,8
12,67	713,4559	7140	28008	35147,94259	620	2,820	430,7
12,75	714,4288	7094	28001	35095,21996	622	2,809	433,5
12,83	715,3955	7048	27993	35040,85306	623	2,797	436,3
12,92	716,356	7002	27983	34984,86694	625	2,786	439,1
13,00	717,3103	6956	27971	34927,28678	627	2,774	441,8
13,08	718,2586	6911	27957	34868,13792	628	2,762	444,6
13,17	719,201	6865	27942	34807,44579	630	2,750	447,3
13,25	720,1374	6820	27925	34745,23597	631	2,739	450,1
13,33	721,068	6775	27907	34681,53414	633	2,726	452,8
13,42	721,9929	6730	27887	34616,36607	635	2,714	455,5
13,50	722,9121	6685	27865	34549,75762	636	2,702	458,2
13,58	723,8258	6640	27842	34481,73473	638	2,690	460,9
13,67	724,7338	6596	27817	34412,32339	640	2,677	463,6
13,75	725,6364	6551	27790	34341,54965	641	2,665	466,3
13,83	726,5336	6507	27762	34269,43961	643	2,652	468,9
13,92	727,4255	6463	27733	34196,01938	645	2,639	471,5
14,00	728,3121	6419	27702	34121,31511	646	2,626	474,2
14,08	729,1934	6376	27670	34045,35294	648	2,613	476,8
14,17	730,0696	6332	27636	33968,15903	650	2,600	479,4
14,25	730,9408	6289	27601	33889,75951	652	2,587	482,0
14,33	731,8068	6246	27564	33810,18048	654	2,574	484,5
14,42	732,6679	6203	27526	33729,44802	655	2,561	487,1
14,50	733,5241	6160	27487	33647,58816	657	2,548	489,7
14,58	734,3754	6118	27447	33564,62687	659	2,535	492,2
14,67	735,2219	6076	27405	33480,59005	661	2,521	494,7
14,75	736,0637	6034	27362	33395,50352	663	2,508	497,2
14,83	736,9008	5992	27317	33309,39303	664	2,495	499,7
14,92	737,7332	5951	27272	33222,28421	666	2,481	502,2
15,00	738,561	5909	27225	33134,20261	668	2,468	504,7

LIITE C: PALOSUOJATUN RAKENTEEN LÄMPÖTILAN LASKEMINEN

Liitteessä C on esitetty palosuojatun rakenteen lämpötilan laskenta HEA 400 pilarille. Samaa laskentapohjaa sovellettiin myös muille palosuojuille profiileille.

HEA 400

Lähtötiedot:

$\Delta t=30s=$	0,50	[min]	Aika-askel 1993-1-2 (4.2.5.1)
b	0,30	m	Poikkileikkauksen leveys
h	0,39	m	Poikkileikkauksen korkeus
p	1,91	m	Poikkileikkauksen piiri
A	0,02	m ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
[Am/V]	120,27	>10 1/m	Poikkileikkaustekijä
[Am/V]b	86,80		Profiilin ympärille kuvitellun kotelon poikkileikkaustekijä
ksh	0,65		Varjostusvaikutuksen korjaustekijä
α_c	25,00	W/m ² K	Kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin
Φ	1,00		Näkyvyyskerroin
ϵ_m	0,70		Pinnan säteilykerroin
ϵ_f	1,00		Palon säteilykerroin
σ	5,67E-08	W/m ² K ⁴	Stefan-Boltzmann- vakio
ρ_a	7850,00	[kg/m ³]	Teräksen ominaistiheys
ρ_p	1300,00	[kg/m ³]	Palosuojauksen ominaistiheys
c_p	1000,00	[J/kgC]	Palosuojauksen ominaislämpökapasiteetti
λ_p	0,008	[W/(mK)]	Palosuojauksen lämmön johtavuus
d _p	0,135	[mm]	Palosuojauksen paksuus
[Ap/V]p	120,27	[1/m]	Palosuojauksen poikkileikkaustekijä
P _p	1,91	[m]	Palosuojauksen piiri

t [min]	$\theta_{g,t}$ [°C]	$\Delta\theta_{g,t}$ [°C]	c_a [J/kg°C]	ϕ	$\Delta\theta_{a,t}$	$\theta_{a,t}$
0	20					20,0
0,50	261,14465	241	440	0,006	14,756	34,8
1,00	349,21367	88	450	0,006	18,946	53,7
1,50	404,31046	55	462	0,006	20,598	74,3
2,00	444,50488	40	474	0,006	21,209	95,5
2,50	476,16566	32	485	0,006	21,305	116,8
3,00	502,2893	26	496	0,005	21,125	137,9
3,50	524,52731	22	505	0,005	20,789	158,7
4,00	543,88731	19	514	0,005	20,364	179,1
4,50	561,02959	17	522	0,005	19,886	199,0
5,00	576,41043	15	529	0,005	19,378	218,4
5,50	590,35832	14	536	0,005	18,853	237,2
6,00	603,11765	13	543	0,005	18,321	255,5
6,50	614,87518	12	549	0,005	17,786	273,3
7,00	625,77683	11	555	0,005	17,253	290,6
7,50	635,93879	10	561	0,005	16,725	307,3
8,00	645,45511	10	567	0,005	16,203	323,5
8,50	654,40294	9	573	0,005	15,691	339,2
9,00	662,84639	8	579	0,005	15,188	354,4
9,50	670,8393	8	585	0,005	14,695	369,1
10,00	678,42733	8	592	0,005	14,215	383,3

10,50	685,64953	7	598	0,004	13,748	397,0
11,00	692,53955	7	604	0,004	13,293	410,3
11,50	699,12662	7	611	0,004	12,852	423,2
12,00	705,43625	6	618	0,004	12,425	435,6
12,50	711,49087	6	625	0,004	12,012	447,6
13,00	717,31031	6	631	0,004	11,613	459,2
13,50	722,91214	6	639	0,004	11,229	470,5
14,00	728,31206	5	646	0,004	10,858	481,3
14,50	733,52412	5	653	0,004	10,502	491,8
15,00	738,56095	5	660	0,004	10,159	502,0
15,50	743,43395	5	668	0,004	9,830	511,8
16,00	748,15345	5	676	0,004	9,514	521,3
16,50	752,72882	5	683	0,004	9,211	530,5
17,00	757,1686	4	691	0,004	8,921	539,5
17,50	761,48059	4	699	0,004	8,642	548,1
18,00	765,67196	4	707	0,004	8,376	556,5
18,50	769,74926	4	714	0,004	8,120	564,6
19,00	773,71854	4	722	0,004	7,875	572,5
19,50	777,58538	4	730	0,004	7,641	580,1
20,00	781,35493	4	738	0,004	7,416	587,5
20,50	785,03196	4	746	0,004	7,201	594,7
21,00	788,62091	4	754	0,004	6,995	601,7
21,50	792,12591	4	761	0,004	6,802	608,5
22,00	795,55078	3	766	0,004	6,638	615,2
22,50	798,89911	3	772	0,003	6,475	621,6
23,00	802,17425	3	778	0,003	6,314	627,9
23,50	805,37932	3	784	0,003	6,155	634,1
24,00	808,51727	3	791	0,003	5,997	640,1
24,50	811,59085	3	799	0,003	5,840	645,9
25,00	814,60264	3	807	0,003	5,684	651,6
25,50	817,55508	3	817	0,003	5,528	657,1
26,00	820,45047	3	827	0,003	5,373	662,5
26,50	823,29096	3	838	0,003	5,217	667,7
27,00	826,07861	3	851	0,003	5,061	672,8
27,50	828,81533	3	865	0,003	4,904	677,7
28,00	831,50297	3	882	0,003	4,746	682,5
28,50	834,14324	3	900	0,003	4,585	687,0
29,00	836,73779	3	921	0,003	4,422	691,5
29,50	839,28818	3	945	0,003	4,254	695,7
30,00	841,80	2,51	973	0,003	4,083	699,79

LIITE D: PALKIN LASKENTA KESTÄVYYSMENETELMÄLLÄ

Liitteessä D on esitetty yksinkertaisen palkin käsinlaskenta kestävyysmenetelmällä. Laskut on tehty HEA 200 palkille.

TERÄSPALKIN PALOMITOITUS

Keltaisella merkätyt kohdat lähtötietoja tai tapauskohtaisesti tarkistettavia/laskettavia arvoja.

Lähtöarvot

Teräs

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

$$G_w := 81 \text{ GPa}$$

$$E := 210 \text{ GPa}$$

Profilii: HEA200

$$h := 190 \quad r := 18 \quad A_w := 5383 \text{ mm}^2$$

$$I_y := 36.92 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$b := 200 \quad I_z := 13.36 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$t_f := 10 \quad W_y := 388.6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \quad W_z := 133.6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$t_w := 6.5$$

Palotilanteen kuormitus:

Taivutus

$$M_{Ed,fi} := 61.37 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed,fi} := 0.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Veto

$$N_{t,Ed,fi} := 0 \text{ kN}$$

Puristus

$$N_{Ed,fi} := 0.68 \text{ kN}$$

Leikkaus

$$V_{Ed,fi} := 18 \text{ kN}$$

Nurjahduspituudet

$$L_{cr,y} := 3 \text{ m}$$

$$L_{cr,z} := 3 \text{ m}$$

Kiepahdustuentäväli

$$L_{LT} := 3 \text{ m}$$

$$\theta_{a_1} := 623.30$$

Teräsrakenteen lämpötila erillisestä laskennasta

Mitoitus

Poikkileikkausluokitus:

Uuma

$$c_w := h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 134$$

Laippa

$$c_f := \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{2} = 78.75$$

$$\xi_w := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.814$$

Palotilanteessa

$$\epsilon_\theta := 0.85 \cdot \xi = 0.692$$

Uuma puristettu

$$\text{PLL}_{\text{up}} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{c_w}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_w} \leq 33 \\ 2 & \text{if } 33 < \frac{c_w}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_w} \leq 38 \\ 3 & \text{if } 38 < \frac{c_w}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_w} \leq 42 \\ 4 & \text{otherwise} \quad \text{PLL}_{\text{up}} = 1 \end{cases}$$

Uuma taivutettu

$$\text{PLL}_{\text{ut}} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{c_w}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_w} \leq 72 \\ 2 & \text{if } 72 < \frac{c_w}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_w} \leq 83 \\ 3 & \text{if } 83 < \frac{c_w}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_w} \leq 124 \\ 4 & \text{otherwise} \quad \text{PLL}_{\text{ut}} = 1 \end{cases}$$

Laippa puristettu

$$\text{PLL}_{\text{lp}} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{c_f}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_f} \leq 9 \\ 2 & \text{if } 9 < \frac{c_f}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_f} \leq 10 \\ 3 & \text{if } 10 < \frac{c_f}{\varepsilon_{\theta} \cdot t_f} \leq 14 \\ 4 & \text{otherwise} \quad \text{PLL}_{\text{lp}} = 3 \end{cases}$$

Pienennystekijät profiilille

$$k_{y,\theta} := \begin{cases} 1 & \text{if } (\theta_{a_i}) \leq 400 \\ 1 - \frac{1 - 0.78}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 400) & \text{if } 400 < \theta_{a_i} \leq 500 \\ 0.78 - \frac{0.78 - 0.47}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 500) & \text{if } 500 < \theta_{a_i} \leq 600 \\ 0.47 - \frac{0.47 - 0.23}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 600) & \text{if } 600 < \theta_{a_i} \leq 700 \\ 0.23 - \frac{0.23 - 0.11}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 700) & \text{if } 700 < \theta_{a_i} \leq 800 \\ 0.11 - \frac{0.11 - 0.06}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 800) & \text{if } 800 < \theta_{a_i} \leq 900 \\ 0.06 - \frac{0.06 - 0.04}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 900) & \text{if } 900 < \theta_{a_i} \leq 1000 \\ 0.04 - \frac{0.04 - 0.02}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1000) & \text{if } 1000 < \theta_{a_i} \leq 1100 \\ 0.02 - \frac{0.02 - 0}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1100) & \text{if } 1100 < \theta_{a_i} \leq 1200 \\ 0 & \text{if } \theta_{a_i} > 1200 \end{cases}$$

$$k_{E,\theta} := \begin{cases} 1 & \text{if } \theta_{a_i} \leq 100 \\ 1 - \frac{1 - 0.9}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 100) & \text{if } 100 < \theta_{a_i} \leq 200 \\ 0.9 - \frac{0.9 - 0.8}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 200) & \text{if } 200 < \theta_{a_i} \leq 300 \\ 0.8 - \frac{0.8 - 0.7}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 300) & \text{if } 300 < \theta_{a_i} \leq 400 \\ 0.7 - \frac{0.7 - 0.6}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 400) & \text{if } 400 < \theta_{a_i} \leq 500 \\ 0.6 - \frac{0.6 - 0.31}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 500) & \text{if } 500 < \theta_{a_i} \leq 600 \\ 0.31 - \frac{0.31 - 0.13}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 600) & \text{if } 600 < \theta_{a_i} \leq 700 \\ 0.13 - \frac{0.13 - 0.09}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 700) & \text{if } 700 < \theta_{a_i} \leq 800 \\ 0.09 - \frac{0.09 - 0.0675}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 800) & \text{if } 800 < \theta_{a_i} \leq 900 \\ 0.0675 - \frac{0.0675 - 0.045}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 900) & \text{if } 900 < \theta_{a_i} \leq 1000 \\ 0.045 - \frac{0.045 - 0.0225}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1000) & \text{if } 1000 < \theta_{a_i} \leq 1100 \\ 0.0225 - \frac{0.0225 - 0.0}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1100) & \text{if } 1100 < \theta_{a_i} \leq 1200 \\ 0 & \text{if } \theta_{a_i} > 1200 \end{cases}$$

Myötölujuuden pienennystekijä (SFS-EN 1993-1-2, taulukko 3.1)

$$k_{y,\theta} = 0.414 \quad f_{y,\theta} := k_{y,\theta} \cdot f_y = 146.998 \text{ MPa}$$

Kimmokertoimen pienennystekijä (SFS-EN 1993-1-2, taulukko 3.1)

$$k_{E,\theta} = 0.268 \quad E_{y,\theta} := k_{E,\theta} \cdot E = 56.293 \text{ GPa}$$

Profiilin kestävyys

Osavarmuusluvut

$$\gamma_{m,0} := 1.0 \quad \gamma_{m,1} := 1.0 \quad \gamma_{m,2} := 1.25 \quad \gamma_{m,f} := 1.0$$

Puristuskestävyys

Ajan hetkellä $t=0$

$$N_{c,Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 1.911 \times 10^3 \text{ kN}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t=0$

$$\mu_{0,c} := \frac{N_{Ed,f}}{N_{c,Rd}} = 3.558 \times 10^{-4}$$

Ajan hetkellä $t = R$

$$N_{c,Rd,fi} := k_{y,\theta} \cdot N_{c,Rd} \cdot \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} = 791.292 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t=R$

$$\mu_{t,c} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{c,Rd,fi}} = 8.594 \times 10^{-4}$$

Nurjahduskestävyys

Y - suunta

Ajan hetkellä $t = 0$ Nurjahduskäyrä NK := "b"

$$N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = 8.502 \times 10^6 \cdot \text{N}$$

$$\alpha := \begin{cases} 0.13 & \text{if NK = "a.0"} \\ 0.21 & \text{if NK = "a"} \\ 0.34 & \text{if NK = "b"} \\ 0.49 & \text{if NK = "c"} \\ 0.76 & \text{if NK = "d"} \end{cases} \quad \alpha = 0.34$$

(ks. SFS-EN 1993-1-1, taul.6.2)

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.474 \quad \phi := 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2] \quad \chi_y := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_y^2}} = 0.896$$

$$N_{b,y,Rd} := \chi_y \cdot A \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,1}} = 1.711 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = 0$

$$\mu_{0,y,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,y,Rd}} = 3.974 \times 10^{-4}$$

Ajan hetkellä $t = R$

$$\lambda_{y,\theta} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.589 \quad \alpha_{y,\theta} := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{MPa}}{f_y}} = 0.529 \quad \varphi_{y,\theta} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha_{y,\theta} \cdot \lambda_{y,\theta} + \lambda_{y,\theta}^2) = 0.829$$

$$\chi_{y,fi} := \frac{1}{\varphi_{y,\theta} + \sqrt{\varphi_{y,\theta}^2 - \lambda_{y,\theta}^2}} = 0.708$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$N_{b,y,Rd,fi} := \chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,fi}} = 559.964 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{t,y,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,y,Rd,fi}} = 1.214 \times 10^{-3}$$

Z - suunta

Ajan hetkellä $t = 0$

Nurjahduskäyrä NK := "c"

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = 3.077 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\alpha_w := \begin{cases} 0.13 & \text{if NK} = \text{"a.0"} \\ 0.21 & \text{if NK} = \text{"a"} \\ 0.34 & \text{if NK} = \text{"b"} \\ 0.49 & \text{if NK} = \text{"c"} \\ 0.76 & \text{if NK} = \text{"d"} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(Nurjahduskäyrä SFS-EN3-1-1,} \\ \text{taul.6.2)} \\ \alpha = 0.49 \end{matrix}$$

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.788 \quad \phi_z := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2 \right] \quad \chi_z := \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} = 0.67$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = 0

$$N_{b,z,Rd} := \chi_z \cdot A \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,1}} = 1.28 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{0,z,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,z,Rd}} = 5.314 \times 10^{-4}$$

Ajan hetkellä t = R

$$\lambda_{z,\theta} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} \quad \alpha_{z,\theta} := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} \quad \varphi_{z,\theta} := \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_{z,\theta} \cdot \lambda_{z,\theta} + \lambda_{z,\theta}^2 \right)$$

$$\chi_{z,fi} := \frac{1}{\varphi_{z,\theta} + \sqrt{\varphi_{z,\theta}^2 - \lambda_{z,\theta}^2}}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = R

$$N_{b,z,Rd,fi} := \chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,fi}} = 396.235 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{t,z,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,z,Rd,fi}} = 1.716 \times 10^{-3}$$

Taivutuskestävyys

Y-suunnassa

Ajan hetkellä t = 0

$$M_{Rd} := \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 137.953 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = 0

$$\mu_{0,M} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{Rd}} = 0.445$$

Ajan hetkellä t = R

$$M_{Rd,fi} := k_{y,\theta} \cdot M_{Rd} \cdot \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} = 57.124 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = R

$$\mu_{t,M} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{Rd,fi}} = 1.074$$

Z-suunnassa

Ajan hetkellä t = 0

Käyttöaste ajanhetkellä t = 0

$$M_{z,Rd} := \frac{W_z \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 47.428 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{0,z,M} := \frac{M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd}} = 0$$

Ajan hetkellä $t = R$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$M_{z,Rd,fi} := k_{y,\theta} \cdot M_{z,Rd} \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} = 19.639 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{t,z,M} := \frac{M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0$$

Leikkauskestävyys

Ajan hetkellä $t = 0$

$$A_v := A - 2 \cdot b \cdot t_f \cdot \text{mm}^2 + (t_w \cdot \text{mm} + 2 \cdot r \cdot \text{mm}) \cdot t_f \cdot \text{mm} = 1.808 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2$$

$$V_{pl,Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\gamma_{m,0}} = 370.566 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste ajan hetkellä t

$$\mu_{0,V} := \frac{V_{Ed,fi}}{V_{pl,Rd}} = 0.049$$

Palotilanteessa

Koska lämpötila oletetaan tasaiseksi koko poikkileikkauksessa

$$V_{Rd,fi} := k_{y,\theta,web} \cdot V_{pl,Rd} \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}}$$

$$k_{y,\theta,web} := k_{y,\theta} = 0.414$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$\mu_{t,V} := \frac{V_{Ed,fi}}{V_{Rd,fi}} = 0.117$$

Kiepahduskestävyys

$$C_1 := 1.13$$

$$C_2 := 0.46$$

$$k := 1$$

$$k_w := 1$$

(SFS-ENV 1993-1-1, liite F)

$$I_{zz} := 13.36 \cdot 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_t := 204 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^4$$

$$h_t := (h - t_f) \cdot \text{mm} = 0.18 \text{ m}$$

$$I_w := \frac{1}{4} \cdot I_z \cdot h_t^2 = 1.082 \times 10^{11} \cdot \text{mm}^6$$

$$z_g := \frac{h}{2} \cdot \text{mm} = 0.095 \text{ m}$$

Kriittinen momentti kaksoisymmetrisille

poikkileikkauksille

$$M_{cr} := C_1 \cdot \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_z}{(k \cdot L_{LT})^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L_{LT})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} + (C_2 \cdot z_g)^2 - C_2 \cdot z_g \right] = 279.237 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Ajan hetkellä $t = 0$

Keipahduskäyrä **KK := "c"**

$$\lambda_{LT,0} := 0.4 \quad \alpha_{LT} := \sqrt{\frac{235 \text{MPa}}{f_y}} = 0.814 \quad \beta := 0.75$$

$$\alpha_{LT} := \begin{cases} 0.21 & \text{if KK = "a"} \\ 0.34 & \text{if KK = "b"} \\ 0.49 & \text{if KK = "c"} \\ 0.76 & \text{if KK = "d"} \end{cases} \quad \begin{matrix} (\text{taulukko 6.5 FI, Na} \\ \text{SFS-EN 1993-1-1}) \\ \alpha_{LT} = 0.49 \end{matrix}$$

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0.703 \quad \phi_{LT} := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2 \right] = 0.759$$

$$\chi_{LT} := \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \lambda_{LT}^2}} = 0.824$$

Käyttöaste ajan hetkellä $t = 0$

$$M_{b,Rd} := \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,1}} = 113.67 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{0,Mb} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{b,Rd}} = 0.54$$

Ajan hetkellä $t = R$

Lämpötila oletetaan samaksi koko poikkileikkauksessa

$$k_{y,\theta,com} := k_{y,\theta}$$

$$k_{E,\theta,com} := k_{E,\theta}$$

$$\lambda_{LT,\theta,com} := \lambda_{LT} \cdot \frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} = 1.086 \cdot \alpha_{LT} := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{MPa}}{f_y}} = 0.529$$

$$\phi_{LT,\theta,com} := \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha_{LT,\theta,com} (\lambda_{LT,\theta,com} - \lambda_{LT,\theta,com,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT,\theta,com}^2 \right] = 1.377$$

$$\chi_{LT,fi} := \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\phi_{LT,\theta,com}^2 - (\lambda_{LT,\theta,com})^2}} = 0.45$$

Käyttöaste ajan hetkellä $t = R$

$$M_{b,Rd,fi} := \chi_{LT,fi} \cdot W_y \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}} = 25.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{t,Mb} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{b,Rd,fi}} = 2.388$$

Yhdistetty taivutus ja

puristus

$$\beta_{M,y} := 1.3$$

$$\beta_{M,LT} := 1.3$$

$$\beta_{M,z} := 1.3$$

(ks SFS-EN 1993-1-2, kuva 4.2)

Mitoitusehto ajanhetkellä t=R

$$\mu_{LT.fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{z,\theta} \cdot \beta_{MLT} - 0.15, 0.9) = 0.041$$

$$\mu_{y.fi} := \min\left[\left(1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3\right) \cdot \lambda_{y,\theta} + 0.44 \beta_{M,y} - 0.29, 1.1\right] = -0.566$$

$$\mu_{z.fi} := \min\left[\left(2 \cdot \beta_{M,z} - 5\right) \cdot \lambda_{z,\theta} + 0.4 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8\right] = -2.121$$

$$k_{LT.fi} := \min\left[\left[1 - \frac{\mu_{LT.fi} \cdot N_{Ed.fi}}{\chi_{z.fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m.fi}}}\right], 1\right] = 1$$

$$k_{y.fi} := \min\left[\left[1 - \frac{\mu_{y.fi} \cdot N_{Ed.fi}}{\chi_{y.fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m.fi}}}\right], 3\right] = 1.001$$

$$k_{z.fi} := \min\left[\left[1 - \frac{\mu_{z.fi} \cdot N_{Ed.fi}}{\chi_{z.fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m.fi}}}\right], 3\right]$$

Ajanhetkellä t = R

$$\mu_{t.N.M} := \frac{N_{Ed.fi}}{\chi_{z.fi} \cdot N_{c.Rd.fi}} + \frac{k_{y.fi} \cdot M_{Ed.fi}}{M_{Rd.fi}} + \frac{k_{z.fi} \cdot M_{z.Ed.fi}}{M_{z.Rd.fi}} = 1.077$$

$$\mu_{t.N.Mb} := \frac{N_{Ed.fi}}{\chi_{z.fi} \cdot N_{c.Rd.fi}} + \frac{k_{LT.fi} \cdot M_{Ed.fi}}{\chi_{LT.fi} \cdot M_{Rd.fi}} + \frac{k_{z.fi} \cdot M_{z.Ed.fi}}{M_{z.Rd.fi}} = 2.389$$

MAKSIMIKÄYTTÖASTEET

Ajan hetkellä t = 0

$$\mu_{0a} := \max(\mu_{0.c}, \mu_{0.y.Nb}, \mu_{0.z.Nb}, \mu_{0.M}, \mu_{0.V}, \mu_{0.Mb}) = 0.54$$

$$\mu_0 = 0.54$$

$$\mu_t := \max(\mu_{t.c}, \mu_{t.y.Nb}, \mu_{t.z.Nb}, \mu_{t.M}, \mu_{t.z.M}, \mu_{t.V}, \mu_{t.Mb}, \mu_{t.N.M}, \mu_{t.N.Mb}) = 2.389$$

Rakenne ajan hetkellä t = R

$$\mu_t = 2.389$$

LIITE E: PILARIN LASKENTA KESTÄVYYSMENETELMÄLLÄ

Liitteessä E on esitetty yksinkertaisen pilarin käsinlaskenta kestävyysmenetelmällä. Laskut on tehty HEA 400 profiilille.

TERÄSPILARIN PALOMITOITUS

KELTAISELLA MERKATUT KOHDAT LÄHTÖTIETOJA TAI TAPAUSKOHTAISESTI TARKISTETTAVIA/LASKETTAVIA ARVOJA.

Lähtöarvot

Teräs $f_y := 355 \text{ MPa}$
 $E := 210 \cdot \text{GPa}$
 $G := 81 \text{ GPa}$

Profiili: HEA 400

$h := 390$ $r := 27$ $A_w := 15898 \text{ mm}^2$
 $b := 300$ $t_f := 19$
 $t_w := 11$ $h_w := (h - 2 \cdot t_f)$

$I_y := 450.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$ $W_y := 2562 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ $W_z := 872.9 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$
 $I_z := 85.64 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

Poikkileikkausluokka 1
Plastiset taivutusvastukset

Palotilanteen kuormitus:

Nurjahduspituudet

$L_{cr,y} := 4 \text{ m}$

Taivutus $M_{Ed,fi} := 27.09 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$L_{cr,z} := 3.19 \text{ m}$

$M_{z,Ed,fi} := 7.45 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Veto $N_{t,Ed,fi} := 0 \text{ kN}$

Puristus $N_{Ed,fi} := 651.28 \text{ kN}$

Leikkaus $V_{Ed,fi} := 10.86 \text{ kN}$

$\theta_{a,1} := 504.70$

Teräsrakenteen lämpötila
erillisestä tiedostosta

Mitoitus

Pienennystekijät profiilille

$$k_{y,\theta} := \begin{cases} 1 & \text{if } \theta_{a_i} \leq 400 \\ 1 - \frac{1 - 0.78}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 400) & \text{if } 400 < \theta_{a_i} \leq 500 \\ 0.78 - \frac{0.78 - 0.47}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 500) & \text{if } 500 < \theta_{a_i} \leq 600 \\ 0.47 - \frac{0.47 - 0.23}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 600) & \text{if } 600 < \theta_{a_i} \leq 700 \\ 0.23 - \frac{0.23 - 0.11}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 700) & \text{if } 700 < \theta_{a_i} \leq 800 \\ 0.11 - \frac{0.11 - 0.06}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 800) & \text{if } 800 < \theta_{a_i} \leq 900 \\ 0.06 - \frac{0.06 - 0.04}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 900) & \text{if } 900 < \theta_{a_i} \leq 1000 \\ 0.04 - \frac{0.04 - 0.02}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1000) & \text{if } 1000 < \theta_{a_i} \leq 1100 \\ 0.02 - \frac{0.02 - 0}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1100) & \text{if } 1100 < \theta_{a_i} \leq 1200 \\ 0 & \text{if } \theta_{a_i} > 1200 \end{cases}$$

$$k_{E,\theta} := \begin{cases} 1 & \text{if } \theta_{a_i} \leq 100 \\ 1 - \frac{1 - 0.9}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 100) & \text{if } 100 < \theta_{a_i} \leq 200 \\ 0.9 - \frac{0.9 - 0.8}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 200) & \text{if } 200 < \theta_{a_i} \leq 300 \\ 0.8 - \frac{0.8 - 0.7}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 300) & \text{if } 300 < \theta_{a_i} \leq 400 \\ 0.7 - \frac{0.7 - 0.6}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 400) & \text{if } 400 < \theta_{a_i} \leq 500 \\ 0.6 - \frac{0.6 - 0.31}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 500) & \text{if } 500 < \theta_{a_i} \leq 600 \\ 0.31 - \frac{0.31 - 0.13}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 600) & \text{if } 600 < \theta_{a_i} \leq 700 \\ 0.13 - \frac{0.13 - 0.09}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 700) & \text{if } 700 < \theta_{a_i} \leq 800 \\ 0.09 - \frac{0.09 - 0.0675}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 800) & \text{if } 800 < \theta_{a_i} \leq 900 \\ 0.0675 - \frac{0.0675 - 0.045}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 900) & \text{if } 900 < \theta_{a_i} \leq 1000 \\ 0.045 - \frac{0.045 - 0.0225}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1000) & \text{if } 1000 < \theta_{a_i} \leq 1100 \\ 0.0225 - \frac{0.0225 - 0}{100} \cdot (\theta_{a_i} - 1100) & \text{if } 1100 < \theta_{a_i} \leq 1200 \\ 0 & \text{if } \theta_{a_i} > 1200 \end{cases}$$

Myötölujuuden pienennystekijä (SFS-EN 1993-1-2, taulukko 3.1)

$$k_{y,\theta} = 0.765 \quad f_{y,\theta} := k_{y,\theta} \cdot f_y = 271.728 \cdot \text{MPa}$$

Kimmokertoimen pienennystekijä (SFS-EN 1993-1-2, taulukko 3.1)

$$k_{E,\theta} = 0.586 \quad E_{y,\theta} := k_{E,\theta} \cdot E = 123.138 \cdot \text{GPa}$$

Kestävyyden tarkistus

Osavarmuusluvut

$$\gamma_{m,0} := 1.0 \quad \gamma_{m,1} := 1.0 \quad \gamma_{m,2} := 1.25 \quad \gamma_{m,fi} := 1.0$$

Puristuskestävyys

Ajan hetkellä $t = 0$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = 0$

$$N_{c,Rd} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 5.644 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{0,c} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{c,Rd}} = 0.115$$

Ajan hetkellä $t = R$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$N_{c,Rd,fi} := k_{y,\theta} \cdot N_{c,Rd} \cdot \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} = 4.32 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{t,c} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{c,Rd,fi}} = 0.151$$

Nurjahduskestävyys y-akselin suhteen

$$N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = 5.838 \times 10^7 \cdot \text{N}$$

Ajan hetkellä $t = 0$

Nurjahduskäyrä $NK := "a"$

$$\alpha := \begin{cases} 0.13 & \text{if } NK = "a.0" \\ 0.21 & \text{if } NK = "a" \\ 0.34 & \text{if } NK = "b" \\ 0.49 & \text{if } NK = "c" \\ 0.76 & \text{if } NK = "d" \end{cases} \quad \alpha = 0.21$$

ks SFS-EN 1993-1-1,
taul.6.2

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.311 \quad \phi := 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2] \quad \chi_y := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_y^2}} = 0.975$$

$$N_{b,y,Rd} := \chi_y \cdot A \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,1}} = 5.502 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = 0$

$$\mu_{0,y,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,y,Rd}} = 0.118$$

Ajan hetkellä $t = R$

$$\lambda_{y,\theta} := \lambda_y \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.355 \quad \alpha_{y,\theta} := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.529$$

$$\varphi_{y,\theta} := \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_{y,\theta} \cdot \lambda_{y,\theta} + \lambda_{y,\theta}^2 \right) = 0.657 \quad \chi_{y,fi} := \frac{1}{\varphi_{y,\theta} + \sqrt{\varphi_{y,\theta}^2 - \lambda_{y,\theta}^2}} = 0.827$$

$$N_{b,y,Rd,fi} := \chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,fi}} = 3.571 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$\mu_{t,y,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,y,Rd,fi}} = 0.182$$

Nurjahduskestävyys z-akselin suhteen

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = 1.744 \times 10^7 \text{ N}$$

Ajan hetkellä $t = 0$

Nurjahduskäyrä $NK := "b"$

Nurjahduskäyrä SFS-EN3-1-1, taul.6.2

$$\alpha := \begin{cases} 0.13 & \text{if } NK = "a.0" \\ 0.21 & \text{if } NK = "a" \\ 0.34 & \text{if } NK = "b" \\ 0.49 & \text{if } NK = "c" \\ 0.76 & \text{if } NK = "d" \end{cases} \quad \alpha = 0.34$$

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.569 \quad \phi_z := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2 \right] \quad \chi_z := \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} = 0.852$$

$$N_{b,z,Rd} := \chi_z \cdot A \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,1}} = 4.811 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = 0$

$$\mu_{0,z,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,z,Rd}} = 0.135$$

Ajan hetkellä $t = R$

$$\lambda_{z,\theta} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} \quad \alpha_{z,\theta} := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} \quad \varphi_{z,\theta} := \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_{z,\theta} \cdot \lambda_{z,\theta} + \lambda_{z,\theta}^2 \right)$$

$$\chi_{z,\text{fi}} := \frac{1}{\varphi_{z,\theta} + \sqrt{\varphi_{z,\theta}^2 - \lambda_{z,\theta}^2}}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$N_{b,z,Rd,\text{fi}} := \chi_{z,\text{fi}} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,\text{fi}}} = 2.917 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{t,z,Nb} := \frac{N_{Ed,\text{fi}}}{N_{b,z,Rd,\text{fi}}} = 0.223$$

Vääntönurjahduskestävyys

$$I_w := 2893600 \cdot 10^6 \text{ mm}^6 \quad L_{cr,T} := 4 \text{ m} \quad I_t := 1914 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$r_T := \sqrt{\frac{I_y + I_z}{A}} = 0.184 \text{ m}$$

$$N_{cr,T} := \frac{1}{r_T^2} \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{cr,T}^2} + G \cdot I_t \right) = 1.571 \times 10^4 \cdot \text{kN}$$

Ajan hetkellä $t = 0$

Nurjahduskäyrä $NK := "b"$

Nurjahduskäyrä SFS-EN3-1-1, taul.6.2

$$\alpha_w := \begin{cases} 0.13 & \text{if } NK = "a.0" \\ 0.21 & \text{if } NK = "a" \\ 0.34 & \text{if } NK = "b" \\ 0.49 & \text{if } NK = "c" \\ 0.76 & \text{if } NK = "d" \end{cases} \quad \alpha = 0.34$$

$$\lambda_T := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,T}}} = 0.599 \quad \phi_T := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\lambda_T - 0.2) + \lambda_T^2 \right] \quad \chi_T := \frac{1}{\phi_T + \sqrt{\phi_T^2 - \lambda_T^2}} = 0.837$$

$$N_{b,T,Rd} := \chi_T \cdot A \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,1}} = 4.726 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = 0$

$$\mu_{0,T,Nb} := \frac{N_{Ed,\text{fi}}}{N_{b,T,Rd}} = 0.138$$

Ajan hetkellä $t = R$

$$\lambda_{T,\theta} := \lambda_T \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} \quad \alpha_{T,\theta} := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} \quad \varphi_{T,\theta} := \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_{T,\theta} \cdot \lambda_{T,\theta} + \lambda_{T,\theta}^2 \right)$$

$$\chi_{T,fi} := \frac{1}{\varphi_{T,\theta} + \sqrt{\varphi_{T,\theta}^2 - \lambda_{T,\theta}^2}}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = R

$$N_{b,T,Rd,fi} := \chi_{T,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{m,fi}} = 2.836 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{t,T,Nb} := \frac{N_{Ed,fi}}{N_{b,T,Rd,fi}} = 0.23$$

Taiivutuskestävyys

Y-suunnassa

Ajan hetkellä t = 0

$$M_{Rd} := \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 909.51 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = 0

$$\mu_{0,M} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{Rd}} = 0.03$$

Ajan hetkellä t = R

$$M_{Rd,fi} := k_{y,\theta} \cdot M_{Rd} \cdot \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} = 696.166 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = R

$$\mu_{t,M} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{Rd,fi}} = 0.039$$

Z-suunnassa

Ajan hetkellä t = 0

$$M_{z,Rd} := \frac{W_z \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 309.88 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t=0

$$\mu_{0,z,M} := \frac{M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd}} = 0.024$$

Ajan hetkellä t = R

$$M_{z,Rd,fi} := k_{y,\theta} \cdot M_{z,Rd} \cdot \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} = 237.191 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä t = R

$$\mu_{t,z,M} := \frac{M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.031$$

Plastisuusteorian mukaan pienennetty taivutuskestävyys
--

Y-suunnassa

Ajan hetkellä $t = 0$

$$M_{N,Rd} := M_{Rd} \left[1 - \left(\frac{N_{Ed,fi}}{N_{c,Rd}} \right)^2 \right] = 897.398 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = 0$

$$\mu_{0,MN} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{N,Rd}} = 0.03$$

Ajan hetkellä $t = R$

$$M_{N,Rd,fi} := M_{Rd,fi} \left[1 - \left(\frac{N_{Ed,fi}}{N_{c,Rd,fi}} \right)^2 \right] = 680.343 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$\mu_{t,MN} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{N,Rd,fi}} = 0.04$$

Z-suunnassa

Ajan hetkellä $t = 0$

$$M_{z,N,Rd} := M_{z,Rd} \left[1 - \left(\frac{N_{Ed,fi}}{N_{c,Rd}} \right)^2 \right] = 305.753 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = 0$

$$\mu_{0,z,MN} := \frac{M_{Ed,fi}}{M_{z,N,Rd}} = 0.089$$

Ajan hetkellä $t = R$

$$M_{z,N,Rd,fi} := M_{z,Rd,fi} \left[1 - \left(\frac{N_{Ed,fi}}{N_{c,Rd,fi}} \right)^2 \right] = 231.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$\mu_{t,z,MN} := \frac{M_{z,Ed,fi}}{M_{z,N,Rd,fi}} = 0.032$$

Lekkauskestävyys

Ajan hetkellä $t = 0$

$$A_v := A - 2 \cdot b \cdot t_f \cdot \text{mm}^2 + (t_w \cdot \text{mm} + 2 \cdot r \cdot \text{mm}) \cdot t_f \cdot \text{mm} = 5.733 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2$$

Käyttöaste ajan hetkellä $t = 0$

$$V_{pl,Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\gamma_{m,0}} = 1.175 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\mu_{0,V} := \frac{V_{Ed,fi}}{V_{pl,Rd}} = 9.242 \times 10^{-3}$$

Ajan hetkellä $t = 0$

Koska lämpötila oletetaan tasaiseksi koko poikkileikkauksessa

$$V_{Rd,fi} := k_{y,\theta,web} \cdot V_{pl,Rd} \cdot \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,fi}} = 899.405 \cdot \text{kN}$$

$$k_{y,\theta,web} := k_{y,\theta} = 0.765$$

Käyttöaste ajanhetkellä $t = R$

$$\mu_{t,V} := \frac{V_{Ed,fi}}{V_{Rd,fi}} = 0.012$$

Yhdistetty taivutus ja puristus

$$\beta_{M,y} := 1.91$$

$$\beta_{M,z} := 2.28$$

$$\beta_{M,LT} := 1.91$$

ks. SFS-EN 1993-1-2, kuva 4.2

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{z,\theta} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.9) = 0.036$$

$$\mu_{y,fi} := \min\left[\left[(1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{y,\theta} + 0.44 \beta_{M,y}\right] - 0.29, 1.1\right] = 0.299$$

$$\mu_{z,fi} := \min\left[\left[(2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{z,\theta} + 0.44 \beta_{M,z} - 0.29\right], 0.8\right] = 0.427$$

$$k_{LT,fi} := \min\left[\left[1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{Ed,fi}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}\right], 1\right] = 0.992$$

$$k_{y,fi} := \min\left[\left[1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{Ed,fi}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}\right], 3\right] = 0.945$$

$$k_{z,fi} := \min\left[\left[1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{Ed,fi}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}\right], 3\right] = 0.905$$

Käyttöaste ajan hetkellä $t = R$

$$\mu_{t,N,M} := \frac{N_{Ed,fi}}{\chi_{z,fi} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{Ed,fi}}{M_{Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.288$$

$$\mu_{t,N,Mb} := \frac{N_{Ed,fi}}{\chi_{z,fi} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{Ed,fi}}{M_{Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.29$$

$$\mu_{0,c} := \max(\mu_{0,c}, \mu_{0,y,Nb}, \mu_{0,z,Nb}, \mu_{0,M}, \mu_{0,V}, \mu_{0,T,Nb}, \mu_{0,MN}, \mu_{0,z,MN}) = 0.138$$

$$\mu_t := \max(\mu_{t,c}, \mu_{t,y,Nb}, \mu_{t,z,Nb}, \mu_{t,M}, \mu_{t,z,M}, \mu_{t,V}, \mu_{t,N,M}, \mu_{t,T,Nb}, \mu_{t,MN}, \mu_{t,z,MN}, \mu_{t,N,Mb}) = 0.29$$

MAKSIMIKÄYTTÖASTEET

T

Ajan hetkellä $t = 0$

$$\mu_0 = 0.138$$

Rakenne ajan hetkellä $t = R$

$$\mu_t = 0.29$$

LIITE F: PALKIN KRIITTISEN LÄMPÖTILAN LASKEMINEN

Liitteessä F on esitetty yksinkertaisen palkin käsinlaskenta kriittisen lämpötilan menetelmällä. Laskut on tehty HEA 200 profiilille.

Lähtötiedot HEA 200:

$L := 6 \text{ m}$	Palkin pituus
$W := 388.6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$	Taivutusvastus (käytetään elastista taivutusvastusta, koska poikkileikkausluokka 3 (Robot))
$W_z := 133.6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$	
$A := 5383 \text{ mm}^2$	Palkin poikkileikkausala
$f_y := 355 \text{ MPa}$	Teräksen lujuus
$\gamma_{M,fi} := 1$	Osavarmuuskerroin palotilanteessa
$\gamma_{m,0} := 1$	
$E := 210 \text{ GPa}$	Kimmokerroin
$I_z := 13.36 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$	Neliömomentit
$I_y := 36.92 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$	
$L_{fi} := 3 \text{ m}$	Nurjahdus-/kiepahduspituus
HEA 200- profiilin leikkauspinta-alan laskenta	
$b := 200 \text{ mm}$	Profiilin leveys
$t_f := 10 \text{ mm}$	Laipan paksuus
$t_w := 6.5 \text{ mm}$	Uuman paksuus
$r := 18 \text{ mm}$	Pyörästys säde
$A_v := A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f = 1808 \text{ mm}^2$	Leikkauspinta-ala
$\alpha := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.529$	
$M_{cr} := 279.237 \text{ kN} \cdot \text{m}$	Kriittisen momentin arvo on otettu kestävyysmenetelmän laskentapohjasta
$M_{fi,Ed} := 61.37 \text{ kN} \cdot \text{m}$	Palkin taivutusrasitus y-suunnassa robotista
$M_{z,fi,Ed} := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$	Palkin taivutusrasitus y-suunnassa robotista
$V_{fi,Ed} := 18 \text{ kN}$	Palkin leikkausrasitus tuella Robotista
$N_{fi,Ed} := 0.68 \text{ kN}$	Palkin normaalivoima
$N_{c,Rd,fi} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 1910.965 \text{ kN}$	Kestävyydet palotilanteen alussa

$$M_{y,Rd,fi} := \frac{W \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 137.953 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{z,Rd,fi} := \frac{W_z \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 47.428 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Momenttitarkastelu:

Sovitustekijät, kun lämpötila tasaisesti jakautunut:

$$k_1 := 1 \quad k_2 := 1 \quad \text{Palkki altistettu palolle neljästä suunnasta ja tuenta tiedetään}$$

$$M_{fi,0,Rd} := \frac{W \cdot f_y}{k_1 \cdot k_2 \cdot \gamma_{M,fi}} = 138 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{Momenttikestävyys palotilanteen alussa}$$

$$\mu_{0,M} := \frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,0,Rd}} = 0.445 \quad \text{Momenttiarasituksen ja -kestävyyden suhde}$$

$$\theta_{a,cr,M} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_{0,M}^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 603.2 \quad \text{Palkin kriittinen lämpötila momentista}$$

leikkausvoimatarkastelu:

$$V_{fi,0,Rd} := \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M,fi}} = 370.6 \text{ kN} \quad \text{Leikkausvoimakestävyys palotilanteen alussa}$$

$$\mu_{0,V} := \frac{V_{fi,Ed}}{V_{fi,0,Rd}} = 0.049 \quad \text{Leikkausvoimarasituksen ja -kestävyyden suhde}$$

$$\theta_{a,cr,V} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_{0,V}^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 937.6 \quad \text{Palkin kriittinen lämpötila leikkausvoimasta}$$

Kiepahdustarkastelu ja yhdistetty taivutus ja puristus tarkastelu:

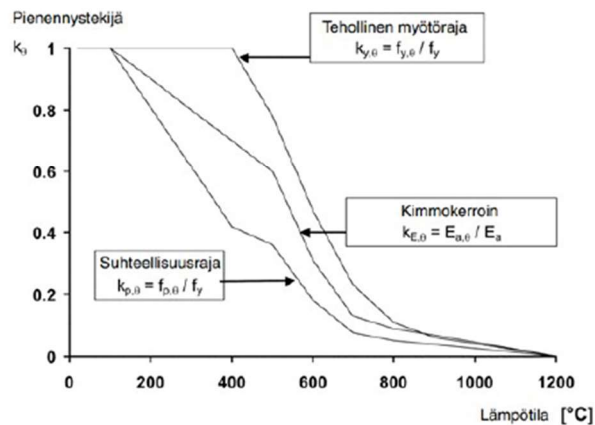
Kriittisen lämpötilan laskenta:

EN 1993-1-2, kohta 4.2.3.3

Kiepahdukselle altis palkki poikkileikkausluokissa 1 ja 2 ja kun poikkileikkauksen lämpötila θ_a on tasan jakautunut, kiepahduskestävyyden mitoitusarvo $M_{b,fi,t,Rd}$ hetkellä t , lasketaan kaavasta:

$$M_{b,fi,t,Rd} := \chi_{LT,fi} \cdot \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{EN 1993-1-2, kaava 4.11}$$

Valitaan lähtötaso $\theta := 20 \text{ }^\circ\text{C}$



EN 1993-1-2, kuva 3.2

Kun lämpötila on $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Rightarrow k_{y,\theta.com} := 1$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta.com} := 1$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista
kimmoista aluetta

Lasketaan pienennystekijä $\chi_{LT,fi}$:

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0.703$$

$$\lambda_{LT,\theta.com} := \lambda_{LT} \cdot \left(\frac{k_{y,\theta.com}}{k_{E,\theta.com}} \right)^{0.5} = 0.703$$

$$\phi_{LT,\theta.com} := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \lambda_{LT,\theta.com} + (\lambda_{LT,\theta.com})^2 \right) = 0.933$$

$$\chi_{LT,fi} := \frac{1}{\phi_{LT,\theta.com} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta.com})^2 - (\lambda_{LT,\theta.com})^2}} = 0.647$$

Lasketaan kiepahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$M_{b.fi.t.Rd} := \chi_{LT,fi} \cdot \frac{W \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 89.218 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kiepahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{M_{fi.Ed}}{M_{b.fi.t.Rd}} = 0.688$$

Rasituksen ja kestävyiden suhde

$$\theta_{a.cr.b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 529.2$$

1. iteroitava kriittinen lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo y- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{fi}^2} = 8502.335 \text{ kN}$$

Nurjahdusvoimakkestävyys

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.474$$

Hoikkuus

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta.com}}{k_{E,\theta.com}} \right)^{0.5} = 0.474$$

Muunnettu hoikkuus

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2) = 0.738$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.767$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{fi}^2} = 3076.685 \text{ kN}$$

Nurjahdusvoimakkestävyys

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.788$$

Hoikkuus

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta.com}}{k_{E,\theta.com}} \right)^{0.5} = 0.788$$

Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 1.019$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.601$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä

Valitaan pienennyskertoimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.601$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi,0.Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 1147.849 \text{ kN} \quad \text{Nurjahduskestävyys}$$

$$\mu_0 := \frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,0.Rd}} = 5.924 \cdot 10^{-4} \quad \text{Rasituksen ja kestävyiden suhde}$$

$$\theta_{a,cr,b} := 39.19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1\right) + 482 = 1599.6 \quad \text{1. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} := 1.3 \quad \beta_{M,z} := 1.3 \quad \beta_{M,LT} := 1.3$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.004$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = -0.401$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = -1.609$$

$$k_{LT,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1\right) = 1$$

$$k_{y,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3\right) = 1$$

$$k_{z,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3\right) = 1.001$$

$$\mu_{NM} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{fi,Ed}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi,Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.446$$

$$\mu_{NMb} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi,Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.688$$

$$\mu_N := \max(\mu_{NM}, \mu_{NMb}) = 0.688$$

Valitaan suurempi käyttöasteista

$$\theta_{a.cr.N} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 529.1 \quad \text{1. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a.cr} := \min(\theta_{a.cr.N}, \theta_{a.cr.b}) = 529.065$$

Valitaan lähtötaso $\theta := \theta_{a.cr} = 529.065 \text{ } ^\circ\text{C}$

Lineaarinen interpolointi taulukko SFS EN 1993-1-2 taulukko 3.1

$$\begin{aligned} 500 \quad k_{y,\theta,a} &:= 0.780 \\ 600 \quad k_{y,\theta,y} &:= 0.470 \end{aligned} \quad k_{y,\theta,a} - \frac{k_{y,\theta,a} - k_{y,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a.cr} - 500) = 0.69$$

$$\begin{aligned} k_{E,\theta,a} &:= 0.600 \\ k_{E,\theta,y} &:= 0.310 \end{aligned} \quad k_{E,\theta,a} - \frac{k_{E,\theta,a} - k_{E,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a.cr} - 500) = 0.516$$

Kun lämpötila on

$$\theta = 529.065 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow k_{y,\theta,com} := 0.693$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta,com} := 0.519$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista kimmoista aluetta

Lasketaan pienennystekijä $\chi_{LT,fi}$:

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0.703$$

$$\lambda_{LT,\theta,com} := \lambda_{LT} \cdot \left(\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} = 0.812$$

$$\phi_{LT,\theta,com} := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \lambda_{LT,\theta,com} + (\lambda_{LT,\theta,com})^2 \right) = 1.045$$

$$\chi_{LT,fi} := \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta,com})^2 - (\lambda_{LT,\theta,com})^2}} = 0.588$$

Lasketaan kiepahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$M_{b,fi,t,Rd} := \chi_{LT,fi} \cdot \frac{W \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 81.077 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kiepahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{M_{fi,Ed}}{M_{b,fi,t,Rd}} = 0.757$$

Rasituksen ja kestävyiden suhde

$$\theta_{a.cr} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 509.3$$

2. iteroitava kriittinen lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo y- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{fi}^2} = 8502.335 \text{ kN} \quad \text{Nurjahdusvoimakestävyys}$$

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.474 \quad \text{Hoikkuus}$$

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta.com}}{k_{E,\theta.com}} \right)^{0.5} = 0.548 \quad \text{Muunnettu hoikkuus}$$

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2) = 0.795$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.729 \quad \text{Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6}$$

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{fi}^2} = 3076.685 \text{ kN} \quad \text{Nurjahdusvoimakestävyys}$$

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.788 \quad \text{Hoikkuus}$$

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta.com}}{k_{E,\theta.com}} \right)^{0.5} = 0.911 \quad \text{Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7}$$

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 1.155$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.536 \quad \text{Taivutusnurjahduksen pienennystekijä}$$

Valitaan pienennyskertoimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.536$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi.0.Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 1023.729 \text{ kN} \quad \text{Nurjahduskestävyys}$$

$$\mu_0 := \frac{N_{fi.Ed}}{N_{b,fi,0.Rd}} = 6.642 \cdot 10^{-4}$$

Rasituksen ja kestävyys-
suhde

$$\theta_{a.cr,b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 1582.4$$

2. iteroitava kriittinen
lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} := 1.3 \quad \beta_{M,z} := 1.3 \quad \beta_{M,LT} := 1.3$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.028$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = -0.507$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = -1.904$$

$$k_{LT,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi.Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1 \right) = 1$$

$$k_{y,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi.Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = 1$$

$$k_{z,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi.Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = 1.002$$

$$\mu_{N,M} := \frac{N_{fi.Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{fi.Ed}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi.Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.446$$

$$\mu_{N,Mb} := \frac{N_{fi.Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{fi.Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi.Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.758$$

$$\mu_N := \max(\mu_{N,M}, \mu_{N,Mb}) = 0.758$$

Valitaan suurempi käyttöasteista

$$\theta_{a.cr,N} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 509.1$$

2. iteroitava kriittinen
lämpötila

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a.cr} := \min(\theta_{a.cr,N}, \theta_{a.cr,b}) = 509.087$$

Valitaan lähtötaso $\theta := \theta_{a,cr} = 509.087 \text{ } ^\circ\text{C}$

Lineaarinen interpolointi taulukko SFS EN 1993-1-2 taulukko 3.1

$$500 \quad k_{y,\theta,a} := 0.780$$

$$600 \quad k_{y,\theta,y} := 0.470$$

$$k_{y,\theta,a} - \frac{k_{y,\theta,a} - k_{y,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 500) = 0.752$$

$$k_{E,\theta,a} := 0.600$$

$$k_{E,\theta,y} := 0.310$$

$$k_{E,\theta,a} - \frac{k_{E,\theta,a} - k_{E,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 500) = 0.574$$

Kun lämpötila on $\theta = 509.087 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Rightarrow k_{y,\theta,com} := 0.757$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta,com} := 0.579$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista
kimmoista aluetta

Lasketaan pienennystekijä $\chi_{LT,fi}$:

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0.703$$

$$\lambda_{LT,\theta,com} := \lambda_{LT} \cdot \left(\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} = 0.804$$

$$\phi_{LT,\theta,com} := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \lambda_{LT,\theta,com} + (\lambda_{LT,\theta,com})^2 \right) = 1.035$$

$$\chi_{LT,fi} := \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta,com})^2 - (\lambda_{LT,\theta,com})^2}} = 0.592$$

Lasketaan kiepahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$M_{b,fi,t,Rd} := \chi_{LT,fi} \cdot \frac{W \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 81.707 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kiepahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{M_{fi,Ed}}{M_{b,fi,t,Rd}} = 0.751$$

Rasituksen ja kestävyiden
suhde

$$\theta_{a,cr} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 511$$

3. iteroitava kriittinen
lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo y- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{fi}^2} = 8502.335 \text{ kN}$$

Nurjahdusvoimakkestävyys

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.474$$

Hoikkuus

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} = 0.542$$

Muunnettu hoikkuus

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2) = 0.79$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.732$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{fi}^2} = 3076.685 \text{ kN}$$

Nurjahdusvoimakkestävyys

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.788$$

Hoikkuus

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} = 0.901$$

Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 1.144$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.541$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä

Valitaan pienennyskertoimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.541$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi,0,Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 1033.19 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,0,Rd}} = 6.582 \cdot 10^{-4}$$

Rasituksen ja kestävyiden suhde

$$\theta_{a,cr,b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 1583.8$$

3. iteroitava kriittinen lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} := 1.3 \quad \beta_{M,z} := 1.3 \quad \beta_{M,LT} := 1.3$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.026$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = -0.499$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = -1.881$$

$$k_{LT,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1\right) = 1$$

$$k_{y,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3\right) = 1$$

$$k_{z,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3\right) = 1.002$$

$$\mu_{N,M} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{fi,Ed}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi,Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.446$$

$$\mu_{N,Mb} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi,Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.752$$

$$\mu_N := \max(\mu_{N,M}, \mu_{N,Mb}) = 0.752 \quad \text{Valitaan suurempi käyttöasteista}$$

$$\theta_{a,cr,N} := 39.19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} - 1\right) + 482 = 510.8 \quad \text{3, iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a,cr} := \min(\theta_{a,cr,N}, \theta_{a,cr,b}) = 510.819$$

Valitaan lähtötaso $\theta := \theta_{a,cr} = 510.819 \text{ } ^\circ\text{C}$

Lineaarinen interpolointi taulukko SFS EN 1993-1-2 taulukko 3.1

$$500 \quad k_{y,\theta,a} := 0.780$$

$$600 \quad k_{y,\theta,y} := 0.470$$

$$k_{y,\theta,a} - \frac{k_{y,\theta,a} - k_{y,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 500) = 0.746$$

$$k_{E,\theta,a} := 0.600$$

$$k_{E,\theta,y} := 0.310$$

$$k_{E,\theta,a} - \frac{k_{E,\theta,a} - k_{E,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 500) = 0.569$$

Kun lämpötila on

$$\theta = 510.819 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow k_{y,\theta,com} := 0.752$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta,com} := 0.573$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista
kimmoista aluetta

Lasketaan pienennystekijä $\chi_{LT,fi}$:

$$\lambda_{LT} := \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0.703$$

$$\lambda_{LT,\theta,com} := \lambda_{LT} \cdot \left(\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} = 0.805$$

$$\phi_{LT,\theta,com} := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \lambda_{LT,\theta,com} + (\lambda_{LT,\theta,com})^2 \right) = 1.037$$

$$\chi_{LT,fi} := \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta,com})^2 - (\lambda_{LT,\theta,com})^2}} = 0.591$$

Lasketaan kiepahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$M_{b,fi,t,Rd} := \chi_{LT,fi} \cdot \frac{W \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 81.594 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kiepahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{M_{fi,Ed}}{M_{b,fi,t,Rd}} = 0.752$$

Rasituksen ja kestävyiden
suhde

$$\theta_{a,cr} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 510.7$$

4. iteroitava kriittinen
lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo y- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{fi}^2} = 8502.335 \text{ kN} \quad \text{Nurjahdusvoimakestävyys}$$

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.474 \quad \text{Hoikkuus}$$

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} = 0.543 \quad \text{Muunnettu hoikkuus}$$

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2) = 0.791$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.732 \quad \text{Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6}$$

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{fi}^2} = 3076.685 \text{ kN} \quad \text{Nurjahdusvoimakestävyys}$$

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.788 \quad \text{Hoikkuus}$$

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}} \right)^{0.5} = 0.903 \quad \text{Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7}$$

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 1.146$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.54 \quad \text{Taivutusnurjahduksen pienennystekijä}$$

Valitaan pienennyskertoimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.54$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi,0,Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 1031.492 \text{ kN} \quad \text{Nurjahduskestävyys}$$

$$\mu_0 := \frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,0,Rd}} = 6.592 \cdot 10^{-4} \quad \text{Rasituksen ja kestävyiden suhde}$$

$$\theta_{a.cr,b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 1583.5 \quad \text{4. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} := 1.3 \quad \beta_{M,z} := 1.3 \quad \beta_{M,LT} := 1.3$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.026$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = -0.5$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = -1.885$$

$$k_{LT,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 1 \right) = 1$$

$$k_{y,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = 1$$

$$k_{z,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta,com} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}}, 3 \right) = 1.002$$

$$\mu_{N,M} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{fi,Ed}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi,Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.446$$

$$\mu_{N,Mb} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,fi,Ed}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.753$$

$$\mu_N := \max(\mu_{N,M}, \mu_{N,Mb}) = 0.753 \quad \text{Valitaan suurempi käyttöasteista}$$

$$\theta_{a.cr,N} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 510.5 \quad \text{4. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a.cr} := \min(\theta_{a.cr,N}, \theta_{a.cr,b}) = 510.511$$

4. ja 5. iteraatio tuottavat lähes saman kriittisen lämpötilan, joten voidaan todeta, että kriittinen lämpötila kiepahduksen avulla laskettuna on $\theta_{a,cr} = 510.51$

Valitaan kriittinen lämpötila leikkausvoiman, momentin ja kiepahduksen alhaisimmasta kriittisen lämpötilan arvosta:

$$\theta_{a,cr} := \min(\theta_{a,cr,V}, \theta_{a,cr,M}, \theta_{a,cr}) = 510.5$$

LIITE G: PILARIN KRIITTISEN LÄMPÖTILAN LASKEMINEN

Liitteessä G on esitetty yksinkertaisen pilarin käsinlaskenta kriittisen lämpötilan menetelmällä. Laskut on tehty HEA 400 profiilille.

Lähtötiedot HEA 400:

$$L := 17 \text{ m}$$

Pilarin pituus

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

Teräksen lujuus

$$E := 210 \text{ GPa}$$

Teräksen kimmokerroin

$$I_y := 450.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Neliömomentit y- ja z-suuntaan

$$I_z := 85.64 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A := 15898 \text{ mm}^2$$

Pilarin poikkileikkauksen ala

$$\gamma_{M,fi} := 1.0$$

Osavarmuuskerroin palotilanteessa

$$N_{fi,Ed} := 651.28 \text{ kN}$$

Onnettomuustilanteen kuorma
ROBOTISTA

$$M_{y,Ed,fi} := 27.09 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{z,Ed,fi} := 7.45 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$L_{fi} := 4 \text{ m} \quad L_{fi,z} := 3.19 \text{ m}$$

Rakenteen nurjahduspituus

$$W_y := 2562 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_z := 872.9 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Taivutusvastukset

$$\gamma_{m,0} := 1$$

$$\gamma_{m,fi} := 1$$

$$N_{c,Rd,fi} := \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 5643.79 \text{ kN}$$

Kestävyydet palotilanteen alussa

$$M_{y,Rd,fi} := \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 909.51 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{z,Rd,fi} := \frac{W_z \cdot f_y}{\gamma_{m,0}} = 309.88 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha := 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} = 0.529$$

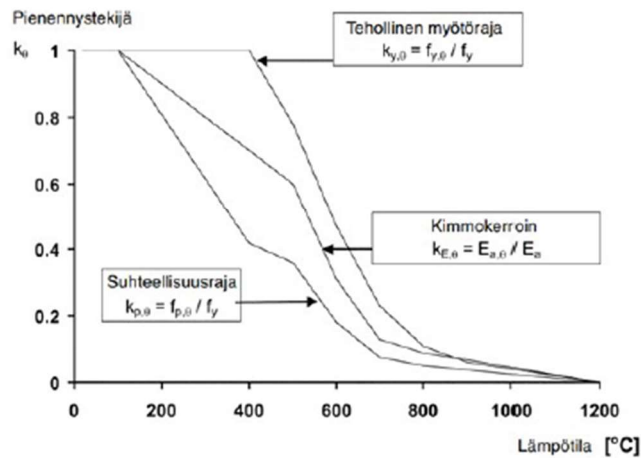
Kriittisen lämpötilan laskenta:

EN 1993-1-2, kohta 4.2.3.2

Puristetun sauvan, joka kuuluu poikkileikkausluokkaan 1, 2 tai 3 ja kun poikkileikkauksen lämpötila θ_a on tasan jakautunut, nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{b,fi,t,Rd}$ hetkellä t , lasketaan kaavasta:

$$N_{b,fi,t,Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{EN 1993-1-2, kaava 4.5}$$

Valitaan lähtötaso $\theta := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$



EN 1993-1-2, kuva 3.2

Kun lämpötila on $\theta = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Rightarrow k_{y,\theta} := 1$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta} := 1$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista
kimmoista aluetta

Tarkastellaan pienennyskerroimen arvo y - suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{fi}^2} = 58383.028 \text{ kN} \quad \text{Nurjahdusvoimakestävyys}$$

$$\lambda_y := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 0.311 \quad \text{Hoikkuus}$$

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.311 \quad \text{Muunnettu hoikkuus}$$

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2 \right) = 0.631$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.848$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6

Tarkastellaan pienennyskerroimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$N_{cr,z} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{fi,z}^2} = 17442.725 \text{ kN}$$

Nurjahdusvoimakestävyys

$$\lambda_z := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = 0.569$$

Hoikkuus

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.569$$

Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 0.812$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.718$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä

Valitaan pienennyskerroimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.718$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi,0,Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 4054.653 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,0,Rd}} = 0.161$$

Rasituksen ja kestävyiden suhde

$$\theta_{a,cr,b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 758$$

1. iteroitava kriittinen lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} := 1.91$$

$$\beta_{M,z} := 2.28$$

$$\beta_{M,LT} := 1.91$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.013$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = 0.33$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = 0.463$$

$$k_{LT,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 1\right) = 0.998$$

$$k_{y,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3\right) = 0.955$$

$$k_{z,fi} := \min\left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3\right) = 0.926$$

$$\mu_{N,M} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.211$$

$$\mu_{N,Mb} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.213$$

$$\mu_N := \max(\mu_{N,M}, \mu_{N,Mb}) = 0.213 \quad \text{Valitaan suurempi käyttöasteista}$$

$$\theta_{a,cr,N} := 39.19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} - 1\right) + 482 = 715.8 \quad \text{1. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a,cr} := \min(\theta_{a,cr,N}, \theta_{a,cr,b}) = 715.781$$

Valitaan edellisen iteraation kriittinen lämpötila $\theta_{a,cr} = 715.781 \text{ } ^\circ\text{C}$

Pienennystekijän lineaarinen interpolointi taulukko SFS EN 1993-1-2 taulukko 3.1

$$700 \quad k_{y,\theta,a} := 0.230$$

$$800 \quad k_{y,\theta,y} := 0.110$$

$$k_{y,\theta} := k_{y,\theta,a} - \frac{k_{y,\theta,a} - k_{y,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 700) = 0.211$$

$$k_{E,\theta,a} := 0.130$$

$$k_{E,\theta,y} := 0.090$$

$$k_{E,\theta} := k_{E,\theta,a} - \frac{k_{E,\theta,a} - k_{E,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 700) = 0.124$$

Kun lämpötila on $\theta_{a,cr} = 715.781 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Rightarrow k_{y,\theta} = 0.211$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta} = 0.124$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista
kimmoista aluetta

Tarkastellaan pienennyskerroimen arvo y- suunnan nurjahdukselle:

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.406 \quad \text{Muunnettu hoikkuus}$$

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2) = 0.69$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.802 \quad \text{Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6}$$

Tarkastellaan pienennyskerroimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.743 \quad \text{Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7}$$

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 0.973$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.625 \quad \text{Taivutusnurjahduksen pienennystekijä}$$

Valitaan pienennyskerroimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.625$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi,0.Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 3527.33 \text{ kN} \quad \text{Nurjahduskestävyys}$$

$$\mu_0 := \frac{N_{fi.Ed}}{N_{b,fi,0.Rd}} = 0.185 \quad \text{Rasituksen ja kestävyuden suhde}$$

$$\theta_{a,cr,b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 737 \quad \text{2. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} = 1.91 \quad \beta_{M,z} = 2.28 \quad \beta_{M,LT} = 1.91$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.063$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = 0.263$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = 0.386$$

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2) = 0.693$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.799$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6

Tarkastellaan pienennyskerroimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.753$$

Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 0.982$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.62$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä

Valitaan pienennyskerroimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.62$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi,0,Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 3497.994 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,0,Rd}} = 0.186$$

Rasituksen ja kestävyden suhde

$$\theta_{a,cr,b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 735.8$$

3. iteroitava kriittinen lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} = 1.91$$

$$\beta_{M,z} = 2.28$$

$$\beta_{M,LT} = 1.91$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.066$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = 0.259$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = 0.382$$

$$k_{LT,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 1 \right) = 0.945$$

$$k_{y,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3 \right) = 0.821$$

$$k_{z,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3 \right) = 0.662$$

$$\mu_{NM} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.225$$

$$\mu_{NMb} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.229$$

$$\mu_N := \max(\mu_{N,M}, \mu_{N,Mb}) = 0.229$$

$$\theta_{a,cr,N} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} \right) + 482 = 704.8 \quad \text{2. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a,cr} := \min(\theta_{a,cr,N}, \theta_{a,cr,b}) = 704.783$$

Valitaan edellisen iteraation kriittinen lämpötila $\theta_{a,cr} = 704.8 \text{ } ^\circ\text{C}$

Pienennystekijän lineaarinen interpolointi taulukko SFS EN 1993-1-2 taulukko 3.1

$$700 \quad k_{y,\theta,a} := 0.230$$

$$800 \quad k_{y,\theta,y} := 0.110$$

$$k_{y,\theta} := k_{y,\theta,a} - \frac{k_{y,\theta,a} - k_{y,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 700) = 0.224$$

$$k_{E,\theta,a} := 0.130$$

$$k_{E,\theta,y} := 0.090$$

$$k_{E,\theta} := k_{E,\theta,a} - \frac{k_{E,\theta,a} - k_{E,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 700) = 0.128$$

Kun lämpötila on $\theta_{a,cr} = 704.783 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Rightarrow k_{y,\theta} = 0.224$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta} = 0.128$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista kimmoista aluetta

Tarkastellaan pienennyskerroimen arvo y- suunnan nurjahdukselle:

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.411$$

Muunnettu hoikkuus

$$k_{LT,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 1 \right) = 0.946$$

$$k_{y,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3 \right) = 0.833$$

$$k_{z,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3 \right) = 0.683$$

$$\mu_{N,M} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.227$$

$$\mu_{N,Mb} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.231$$

$$\mu_N := \max(\mu_{N,M}, \mu_{N,Mb}) = 0.231$$

$$\theta_{a,cr,N} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 703.4 \quad \text{3. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a,cr} := \min(\theta_{a,cr,N}, \theta_{a,cr,b}) = 703.43$$

Valitaan edellisen iteraation kriittinen lämpötila $\theta_{a,cr} = 703.4 \text{ °C}$

Pienennystekijän lineaarinen interpolointi taulukko SFS EN 1993-1-2 taulukko 3.1

$$700 \quad k_{y,\theta,a} := 0.230$$

$$800 \quad k_{y,\theta,y} := 0.110$$

$$k_{y,\theta} := k_{y,\theta,a} - \frac{k_{y,\theta,a} - k_{y,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 700) = 0.226$$

$$k_{E,\theta,a} := 0.130$$

$$k_{E,\theta,y} := 0.090$$

$$k_{E,\theta} := k_{E,\theta,a} - \frac{k_{E,\theta,a} - k_{E,\theta,y}}{100} \cdot (\theta_{a,cr} - 700) = 0.129$$

Kun lämpötila on $\theta_{a,cr} = 703.43 \text{ °C}$

$$\Rightarrow k_{y,\theta} = 0.226$$

$$\Rightarrow k_{E,\theta} = 0.129$$

Teräksen myötörajan pienennystekijä
Pienennystekijä, joka vastaa lineaarista
kimmoista aluetta

Tarkastellaan pienennyskerroimen arvo y- suunnan nurjahdukselle:

$$\lambda_{\theta,y} := \lambda_y \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.412$$

Muunnettu hoikkuus

$$\varphi_{\theta,y} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,y} + \lambda_{\theta,y}^2) = 0.694$$

$$\chi_{fi,y} := \frac{1}{\varphi_{\theta,y} + \sqrt{\varphi_{\theta,y}^2 - \lambda_{\theta,y}^2}} = 0.799$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä EN 1993-1-2, kaava 4.6

Tarkastellaan pienennyskertoimen arvo z- suunnan nurjahdukselle:

$$\lambda_{\theta,z} := \lambda_z \cdot \left(\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right)^{0.5} = 0.754$$

Muunnettu hoikkuus EN1993-1-2, kaava 4.7

$$\varphi_{\theta,z} := \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot \lambda_{\theta,z} + \lambda_{\theta,z}^2) = 0.983$$

$$\chi_{fi,z} := \frac{1}{\varphi_{\theta,z} + \sqrt{\varphi_{\theta,z}^2 - \lambda_{\theta,z}^2}} = 0.619$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä

Valitaan pienennyskertoimista pienempi arvo

$$\chi_{fi} := \min(\chi_{fi,y}, \chi_{fi,z}) = 0.619$$

Lasketaan nurjahduskestävyyden avulla kriittinen lämpötila

$$N_{b,fi,0.Rd} := \chi_{fi} \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M,fi}} = 3494.549 \text{ kN}$$

Nurjahduskestävyys

$$\mu_0 := \frac{N_{fi.Ed}}{N_{b,fi,0.Rd}} = 0.186$$

Rasituksen ja kestävyiden suhde

$$\theta_{a.cr,b} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 735.6$$

4. iteroitava kriittinen lämpötila

Lasketaan yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen avulla kriittinen lämpötila

$$\beta_{M,y} = 1.91 \quad \beta_{M,z} = 2.28 \quad \beta_{M,LT} = 1.91$$

$$\mu_{LT,fi} := \min(0.15 \cdot \lambda_{\theta,z} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15, 0.19) = 0.066$$

$$\mu_{y,fi} := \min((1.2 \cdot \beta_{M,y} - 3) \cdot \lambda_{\theta,y} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} - 0.29, 1.1) = 0.259$$

$$\mu_{z,fi} := \min((2 \cdot \beta_{M,z} - 5) \cdot \lambda_{\theta,z} + 0.44 \cdot \beta_{M,z} - 0.29, 0.8) = 0.382$$

$$k_{LT,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{LT,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 1 \right) = 0.946$$

$$k_{y,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{y,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,y} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3 \right) = 0.835$$

$$k_{z,fi} := \min \left(1 - \frac{\mu_{z,fi} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m,fi}}}, 3 \right) = 0.685$$

$$\mu_{N,M} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{y,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.228$$

$$\mu_{N,Mb} := \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{fi,z} \cdot N_{c,Rd,fi}} + \frac{k_{LT,fi} \cdot M_{y,Ed,fi}}{M_{y,Rd,fi}} + \frac{k_{z,fi} \cdot M_{z,Ed,fi}}{M_{z,Rd,fi}} = 0.231$$

$$\mu_N := \max(\mu_{N,M}, \mu_{N,Mb}) = 0.231$$

$$\theta_{a,cr,N} := 39.19 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_N^{3.833}} - 1 \right) + 482 = 703.3 \quad \text{4. iteroitava kriittinen lämpötila}$$

Valitaan kriittisistä lämpötiloista pienempi seuraavalle iteraatiokierrokselle

$$\theta_{a,cr} := \min(\theta_{a,cr,N}, \theta_{a,cr,b}) = 703.272$$

4. iterointikierron tuotti lähes saman suuruisen kriittisen lämpötilan kuin 3. iterointikierron, joten kriittinen lämpötila on

$$\theta_{cr} := \theta_{a,cr} = 703.27$$