

Teräsrakenteiden palomitoitus

Excel-laskentaohjelma

LAB-ammattikorkeakoulu

Konetekniikka (AMK)

2025

Juuso Miettinen

Tiivistelmä

Tekijä(t) Miettinen, Juuso	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2025
	Sivumäärä 46	
Työn nimi Teräsrakenteiden palomitoitus Excel laskenta ohjelma		
Tutkinto Konetekniikka (AMK)		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Premekon Oy		
Tiivistelmä <p>Tämä insinööri työ tehtiin Premekon Oy:n pyynnöstä. Työn tarkoitus on ohjelmoida Excel-laskentaohjelma teräsrakenteiden palosuunnittelua varten. Ohjelma antaa tarkan laskelman rakenteen kestävydestä ja sen kriittisestä lämpötilasta. Opinnäytetyö avustaa suunnittelijaa ja vähentää hänen työhönsä kuluva vaivaa.</p> <p>Laskentapohja laskee palotilanteessa olevan teräsrakenteen lujuusominaisuuksien muutoksia. Se käyttää yrityksen valitsevien teräsprofiilien ominaisuuksia ja vertailee niiden vaikutuksia rakenteelle kohdistuvien kuormien vaatimukseen, antaen vastauksen, joka ohjeistaa suunnittelijaa valitsemaan rakenteelle sopivan profiilin. Laskentaohjelma käyttää laskelmissaan VLOOKUP-funktiota, jonka avulla se vaihtaa kaavoissa käytettyjen poikkileikkausarvoja nopeasti valitun teräsprofiilin mukaan. Profiilin tiedot haetaan suunnittelijan ylläpitämästä teräsprofiilitaulukosta, johon on helppo lisätä uusia profiileja.</p> <p>Työ sisältää myös yleiskatsauksen teräsrakenteiden palosuunnittelua koskeviin yleisiin ohjeisiin ja määräyksiin sekä tietoa paloturvallisuusvaatimuksista ja lämpötilan kehityksen periaatteista. Opinnäytetyön tuloksena on monikäyttöinen laskentaohjelma, jonka suunnittelussa on kiinnitetty huomioita selkolukuisuuteen ja käyttäjäystävällisyyteen.</p>		
Asiasanat Palomitoitus, kantavat teräsrakenteet, Excel-laskentaohjelma		

Abstract

Author(s) Miettinen Juuso	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2025
	Number of Pages 46	
Title of Publication Fire design of steel structures Excel-based calculation tool		
Name of Degree Mechanical Engineer		
Name, title and organization of the client Premekon Oy		
Abstract <p>This engineering work was commissioned by Premekon Oy. The purpose of the project is to develop an Excel-based calculation tool for the fire design of steel structures, aimed at assisting designers and reducing their workload.</p> <p>The calculation template evaluates changes in the strength properties of steel structures under fire conditions, utilizes the company's selected steel profile properties, and compares their effects against structural load requirements. The tool provides guidance for designers to select suitable profiles for the structure. The calculation program uses the vlookup function in its calculations, which allows it to quickly replace the cross-sectional values used in formulas according to the selected steel profile. The information for the profile is retrieved from a steel profile table maintained by the designer to which new profiles can be easily added.</p> <p>The work also includes a general description of guidelines and regulations related to fire design for steel structures, as well as information on fire safety requirements and a general overview of the principles of temperature development. The result of the thesis is a versatile calculation program, designed with attention to visual clarity and user-friendliness.</p>		
Keywords Excel, fire design, steel structures,		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Määräykset ja ohjeet.....	2
2.1	Eurokoodi	2
2.2	Suomen rakentamismääräyskokoelma.....	3
2.3	CE-merkintä	4
2.4	Lainsäädäntö.....	4
3	Lämpötilan kehitys palotilassa	6
3.1	Teräksen materiaaliominaisuudet	6
3.2	Standardipalo	7
3.3	Toiminnallinen palomitoitus	8
4	Rakenteen palosuojaus	10
4.1	Palosuojausmenetelmät	10
4.2	Palosuojamaalit.....	10
4.3	Rakenteiden paloluokitus	11
5	Teräsrakenteen palomitoitus.....	12
5.1	Suunnitteluperusteet.....	12
5.2	Materiaaliominaisuudet.....	12
5.3	Poikkileikkaus.....	13
5.4	Poikkileikkausluokitus.....	15
5.5	Rakenteen kriittinen lämpötila.....	16
6	Excel-laskentaohjelma	17
6.1	Lähtötiedot	17
6.2	Kuormitukset	20
6.2.1	Pysyvät ja muuttuvat kuormat.....	20
6.2.2	Varmuuskertoimet	21
6.2.3	Kuormat varmuuskertoimilla	21
6.2.4	Kuormitus tapauskohtaiset kokonaiskuormat.....	22
6.3	Palkin tarkistus	23
6.4	Palkin taipumamitoitus.....	26
6.5	Pilarin lähtötiedot.....	29
6.6	Pilarin tarkistus	30
6.7	Pilarin nurjahduskestävyyden laskenta.....	30
6.8	Yhteenveto	32
7	Palotilannemitoitus.....	34

7.1	Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötila.....	34
7.2	Palkin palomitoitus	36
7.3	Pilarin palomitoitus	38
8	Taulukot.....	40
9	Uuden teräsprofiilin luominen laskentaohjelmaan	41
10	Yhteenveto ja pohdinta	43
	Lähteet	45

1 Johdanto

Teräksen käyttöä rakennusmateriaalina on standardisoitu vuosikymmenten ajan, ja siksi se on nykyään yleisin ja monikäyttöisin rakennusmateriaali. Palotilanteen aikana teräksen kestävyys heikkenee, ja siksi se ei ole yksinään riittävä ratkaisu kantaville teräsrakenteille tietyissä olosuhteissa. Lämpötilan noustessa teräs alkaa nopeasti kuumeta, mikä muuttaa sen lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia. Tämä aiheuttaa muodonmuutoksia rakenteessa, jotka heikentävät rakenteen kantokykyä kuormille. Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda suunnittelijan työtä tukeva palomitoituksen Excel-laskentaohjelma, joka näyttää suunnittelijalle kuormitustilanteeseen valitun teräsprofiilin kriittisen lämpötilan ja arvioi rakenteen kestävyyspalotilanteessa. Opinnäytetyössä on käytetty tekoälyä tekstin selkolukuisuuden parantamiseksi.

Opinnäytetyö tehtiin Premekon Oy:lle, jolla on ajanmukaiset toimisto- ja tuotantotilat Joutsenon teollisuusalueella Lappeenrannassa. Premekon Oy on metallialan yritys, joka on erikoistunut teollisuuden hoitotasojen ja porrastornien valmistukseen. Näiden rakenteiden valmistuksessa käytetään vakituisesti terästä.

Laskentaohjelman tulee noudattaa Eurokoodissa määrättyjä ohjeita ja laskukaavoja turvallisuuden varmistamiseksi ja on myös oltava helposti tulkittavissa. Palomitoituksen laskenta on aikaa vievä prosessi, etenkin jos sitä ei suoriteta säännöllisesti, sillä monet siihen liittyvät laskentakaavat ja kertoimet määräytyvät useiden Eurokoodin osien, Suomen kansallisten liitteiden ja mekaniikan tasapainoehtojen pohjalta. Näiden lisäksi laskukaavoissa käytetään usein monia teräsprofiilien poikkileikkausarvoja, joiden vaihtaminen ja vertailu laskentakaavoissa hidastavat prosessia merkittävästi. Laskentaohjelma sisältää viisi eri kuormitustilannetta ja käyttää laskentakaavoja ainoastaan poikkileikkausluokka 1:n teräsprofiileille.

2 Määräykset ja ohjeet

2.1 Eurokoodi

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia standardeja, joiden noudattaminen varmistaa, että rakennusalan yritykset toimivat eurooppalaisen ja kansallisen lainsäädännön mukaisesti. Nämä standardit mahdollistavat tuotteiden, rakenteiden ja rakennusten määrittelyn ja arvioinnin vertailukelpoisesti. Niissä korostetaan laatua, turvallisuutta ja energiatehokkuutta. Eurokoodit on kehitetty parantamaan eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailukykyä sekä EU:n alueella että globaalisti.

Eurokoodeja koskevat säädökset tulivat voimaan 1.9.2014. Siitä alkaen talonrakennuksen suunnittelussa on käytetty eurokoodeja yhdessä kansallisten liitteiden kanssa. Talonrakennuksessa käytettävistä liitteistä vastaa ympäristöministeriö ja sillanrakentamisen kansallisista liitteistä vastaa Väylävirasto. (Suomen Standardisoi- misliitto SFS 2025).

Eurokoodijärjestelmä on laajamittainen 58-osainen määräyskokoelma, joka on jaettu pääosiin. Opinnäytetyössä keskitytään teräsrakenteiden suunnitteluun palotilanteessa, joten käsittelemme vain seuraavia määräyskokoelmia.

SFS EN 1990

Standardissa EN 1990 esitetään rakenteiden varmuutta, käyttökelpoisuutta ja säilyvyyttä koskevat periaatteet ja vaatimukset. Se tarjoaa yhteisen kehyksen kaikille Eurokoodeille. Standardi perustuu rajatilamenetelmään ja sen yhteydessä käytettävään osavarmuuslukumenettelyyn, jotka ovat pakollisia käyttökelpoisuuden kriteerejä. Osavarmuusmenettelyllä tarkoitetaan mitoitusmenetelmää, jossa huomioidaan epävarmuuksia kertomalla kuormat ja materiaalien kestot varmuuskertoimilla. Rajatilamenettelyssä varmistetaan, ettei rakenne ylitä sallittuja raja-arvoja. Standardi tarjoaa myös ohjeet kuormitusyhdistelmille suunnittelussa. Näillä perusarvoilla saavutetaan turvallinen luotettavuustaso, jolla oletetaan, että laadunvarmistuksessa ja suunnittelussa noudatetaan samoja periaatteita (SFS EN 1990.)

SFS EN 1991-1-1

Standardin EN 1991 osassa 1–1 esitetään rakennusten mitoitusohjeita ja mitoituskuormia. Opinnäytetyön kannalta tämä osio tarjoaa tärkeät ohjeet kuormien luokitteluun ja niiden vaikutusten huomioon ottamiseen suunnittelussa. Rakenteiden kuormitusten määrittelyssä on selkeästi eriteltävä, mitkä kuormat muuttuvat ajanjakson aikana ja mitkä pysyvät samoina. Osavarmuuslukujen arvot vaihtelevat kuorman tyypin mukaan (SFS EN 1991-1-1.)

SFS-EN 1991-1-2

Standardin EN 1991 osa 1–2 keskittyy palovaaroihin ja rakenteen suunnitteluun tulipalon sattuessa. Opinnäytetyön kannalta se määrittää lämpötila-analyysissä käytettävät lämpö-
rasitukset, standardipalon lämpötila-aikakäyrän ja tarjoaa ohjeet teräksen käyttäytymisestä korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi se määrittelee erilaiset paloskenaariot, palonsuojausmenetelmät ja palonkestävyysvaatimukset (SFS EN 1991-1-2.)

SFS-EN 1993-1-1

Standardin EN 1993 osa 1–1 määrittelee teräsrakenteiden suunnittelun perussäännöt. Se kattaa teräksen materiaalivaatimukset ja suunnitteluperiaatteet, kuten rajatilamenetelmän ja poikkileikkauksen luokittelun, sekä rakenteellisten elementtien kestävyuden ja stabiilisuu-
den analyysin. Standardi sisältää myös ohjeet leikkaus-, veto-, ja puristusvoimien käsitte-
lyyn, nurjahdus- ja vääntömomenttien hallintaan, sekä jäykkyys- ja muodonmuutosvaati-
muksiin (SFS EN 1993-1-1.)

SFS-EN 1993-1-2

Standardin EN 1993 osassa 1–2 keskitytään teräsrakenteiden suunnitteluun palotilan-
teessa. Se täydentää EN 1993-1-1 määräyksiä ja määrittää teräksen käyttäytymisen sekä
suunnittelumenetelmät korkeissa lämpötiloissa. Standardi kattaa muun muassa teräksen
lujuuden heikkenemisen lämpötilan funktiona, yksinkertaistetut ja edistyneet lämpötila-ana-
lyysimenetelmät, kriittisen lämpötilan laskennan sekä palonesto- ja suojausratkaisut. Se
määrittelee myös kuormien yhdistelyt palotilanteessa sekä rakenteiden vähimmäisvaati-
mukset. EN 1993-1-2 toimii yhdessä muiden Eurokoodien kanssa ja tarjoaa ohjeet turvalli-
seen suunnitteluun. Palosuojelun yleisenä tavoitteena on vähentää tulipalotilanteissa ai-
heutuvia riskejä sekä yksilöille että yhteiskunnalle. Tämä sisältää esimerkiksi omaisuuden,
viereisten rakenteiden, ympäristön ja suoraan palolle altistuvien kohteiden suojelun, mikä
edistää turvallisuutta ja vahinkojen rajoittamista (SFS EN 1993-1-2.)

2.2 Suomen rakentamismääräyskokoelma

Suomen kansallinen liite on Ympäristöministeriön ylläpitämä Suomen rakentamismääräys-
kokoelma, joka kokoaa yhteen lain nojalla annetut rakentamista koskevat säännökset, mää-
räykset sekä ministeriön antamat ohjeistukset. Suomen rakentamismääräyskokoelma mää-
rittelee rakenteen suunnittelemiselle tärkeitä varmuuskertoimia ja toleransseja. Tämä koko-
elma tarjoaa keskitetyn ja helposti saatavilla olevan kehyksen rakentamisen sääntelyyn ja
ohjaukseen (751/2023, 6§.)

Eurokoodia ei saa lukea ilman Suomen rakentamismääräyskokoelmaa eli kansallisliitteitä, kolmesta pääsyystä:

- Maantieteelliset, geologiset ja ilmasto-olosuhteet vaihtelevat eri alueilla.
- Rakenteiden luotettavuustasoon ei voida vaikuttaa suoraan eurokoodien kautta.
- Joissakin asioissa ei saavuteta yhteisymmärrystä, sillä suunnittelukulttuurit eroavat maiden välillä.

2.3 CE-merkintä

CE-merkintä toimii valmistajan vakuutuksena siitä, että rakennustuotteen ominaisuudet vastaavat EU:n vaatimuksia. Se on pakollinen useimmille rakennustuotteille, valmistajan on noudatettava säädöksiä, jotka kieltävät markkinoille tuomasta rakennustuotteita, jotka kuuluvat tuotestandardin piiriin mutta joilta puuttuu CE-merkintä. CE-merkintä rakennustuotteessa viestii siitä, että tuote on testattu harmonisoidun standardin mukaisilla menetelmillä ja että se täyttää ilmoitetut suorituskykyvaatimukset. On kuitenkin tärkeää korostaa, että CE-merkintä ei ole laadun tae eikä takaa tuotteen soveltuvuutta tiettyyn rakennuskäyttöön. Tuotteen soveltuvuutta tiettyyn rakennusprojektiin on aina arvioitava erikseen, ottaen huomioon tuotteen tarkoitettu käyttötarkoitus, paikalliset olosuhteet ja rakentamismääräykset. CE-merkinnän tavoitteena on edistää rakennustuotteiden vertailtavuutta eri maiden välillä. Standardoitu suoritustason ilmoittaminen helpottaa suunnittelijoiden ja kuluttajien työtä, kun he voivat vertailla tuotteiden ominaisuuksia yhdenmukaisesti ilmoitettuna. Tämä edistää myös suomalaisten rakennustuotteiden vientiä muihin Euroopan maihin (Suomen Standardisoimisliitto SFS.)

2.4 Lainsäädäntö

Eduskunta hyväksyi uuden rakentamislain 1.3.2023. Lakiin tehtiin muutoksia, jotka pyrkivät keventämään hallinnollista taakkaa ja byrokratiaa sekä selkeyttämään valitusoikeuksia. Nämä muutokset, jotka tunnetaan rakentamislain korjaussarjana, sisällytettiin lakiin, ja ne tulevat voimaan vuoden 2025 alusta. Tavoitteena on tehostaa rakentamisen sääntelyä ja parantaa prosessien sujuvuutta (Ympäristöministeriö 2025.)

Uusi rakentamislaki tuli voimaan 1.1.2025. Samassa yhteydessä maankäyttö- ja rakennuslaista kumottiin rakentamisen säädökset, ja jäljellä jäävän lain nimi muuttui alueidenkäyttölainsi. (Ympäristöministeriö 2025).

Lakimuutoksen myötä palomitoituksen osalta on tärkeää huomioida, että vaikka rakennusprojekti ei vaatisi rakentamislupaa, on silti noudatettava rakentamismääräyksiä, kuten paloturvallisuusmääräyksiä.

Rakentamislaki

Maankäyttö- ja rakennuslaki säätelee alueiden käyttöä ja rakentamista, ja sen päätavoitteena on edistää terveellistä, turvallista ja viihtyisää elinympäristöä. Laki pyrkii varmistamaan, että ympäristö on sosiaalisesti toimiva ja että eri väestöryhmien tarpeet otetaan huomioon suunnittelussa ja toteutuksessa. Tämä tarkoittaa muun muassa kaavoituksen, rakentamisen ja ympäristövaikutusten huomioimista yhteiskunnallisesti kestäväällä tavalla (Rakennuslaki 751/2023 §5.)

Pelastuslaki

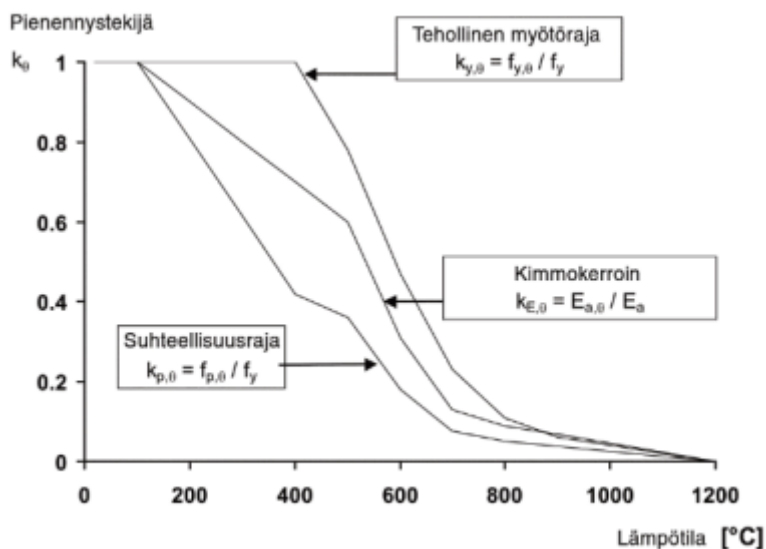
Rakennushankkeeseen ryhtyvän on varmistettava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan käyttötarkoituksensa mukaisesti paloturvalliseksi. Palon syttymisen riskiä on pyrittävä rajoittamaan. Lisäksi rakennuksen kantavien rakenteiden on kestävä palotilanteessa vähintään määrätyn ajan, huomioiden rakennuksen sortumisen estäminen, turvallisen poistumisen mahdollistaminen, pelastustoiminnan edellytykset sekä palon hallinta. Nämä vaatimukset ovat keskeisiä rakennusten turvallisuuden ja toimivuuden takaamiseksi palotilanteissa (Pelastuslaki 379/2011 §9.)

3 Lämpötilan kehitys palotilassa

3.1 Teräksen materiaaliominaisuudet

Lämpö siirtyy teräsrakenteeseen säteily- tai konvektiomekanismien kautta ja rakenteen sisällä se leviää pääasiassa johtamalla. Koska teräksen lämmönjohtavuus on erittäin hyvä, oletetaan, että lämpötila on tasainen koko teräsosan poikkileikkauksessa. Lämpötilan nousua teräsrakenteessa määräävät tekijät ovat muun muassa palotilan lämpötilan kehitys, teräsosan poikkileikkaustekijä sekä rakenteen palosuojauksen taso. Lisäksi teräksen lujuusominaisuudet muuttuvat merkittävästi lämpötilan vaihteluiden myötä, mikä tekee siitä herkin lämpötilan vaikutuksille (Teräsrakenne Yhdistys 2025.)

Rakenteen lämpötilan nousuun vaikuttaa merkittävästi palotilan lämpötilan kehitys, joka riippuu palon intensiteetistä, palon keston pituudesta sekä rakenteen altistumisesta lämmölle. Tämän vuoksi rakenteiden suunnittelussa on huomioitava materiaalien lujuuden heikkeneminen korkeissa lämpötiloissa, jotta varmistetaan rakenteiden turvallisuus ja toimivuus palotilanteissa. Kuvasta 1 voidaan havaita, kuinka hiiliteräksen ominaisuudet heikkenevät lämpötilan noustessa. Normaaliämpötilassa (20 °C) teräksen ominaisuudet ovat vakiot, mutta ne alkavat heiketä, kun lämpötila kasvaa. Kun lämpötila saavuttaa 1 200 °C, teräsrakenne on menettänyt kaikki kantokykynsä.



Kuva 1 Pienennystekijät hiiliteräksen jännitys-venymäyhteydelle korkeissa lämpötiloissa (SFS EN 1991-1-2, 22)

Rakenteiden palonkestävyyssaikaa arvioitaessa oletetaan, että noudatetaan joko standardoitua nimellistä lämpötilakäyrää tai toiminnallisen palomitoituksen perusteella määritettyä, käytännön olosuhteisiin perustuvaa lämpötilan kehitystä.

3.2 Standardipalo

Nimelliseen lämpötilakäyrän mukainen palomitoitus sopii pieniin ja keskisuuriin tavanomaisiin rakennuksiin sekä tiloihin. Nimelliset lämpötilakäyrät ovat standardoiduilla arvoilla toimivia käyriä, jotka eivät huomioi yksittäisen tilan tai rakennuksen erityispiirteitä. Tämä menetelmä on suoraviivainen ja helppo toteuttaa, mutta se voi johtaa merkittävään ylimitoitukseen, koska se ei ota huomioon käytännön olosuhteita tai tilan todellista käyttötarkoitusta (Kaitila 2014, 126.)

Standardipalo, jota käytetään palomitoituksen perustana, eroaa todellisesta palotilanteesta siten, että palokuorma ei lopu, vaan lämpötila nousee jatkuvasti koko paloajan. Yleisesti käytetty standardi lämpötila-aikakäyrä (Kuva 2) määritellään ISO 834 -standardin mukaisesti. Tässä käyrässä lämpötila (T) palo-osastossa ilmaistaan kaavassa 1.

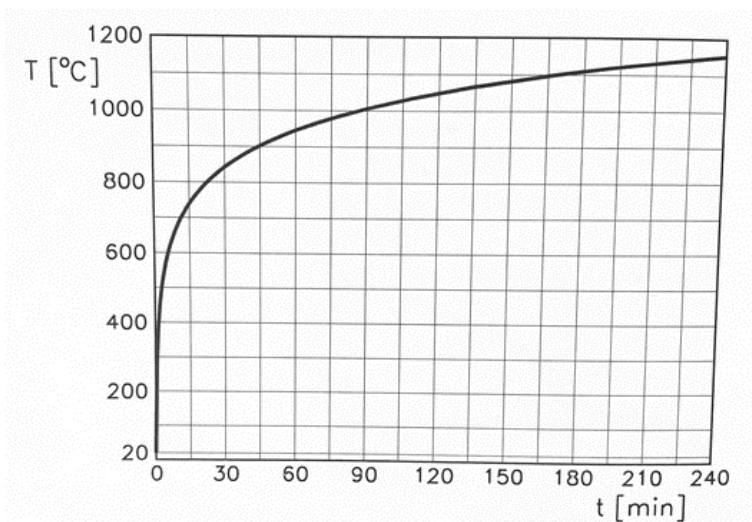
$$T = 20 + 345 * \log(8 * t + 1) \quad (1)$$

missä:

T on kaasun lämpötila palo-osastossa (°C)

t on aika (minuutteina)

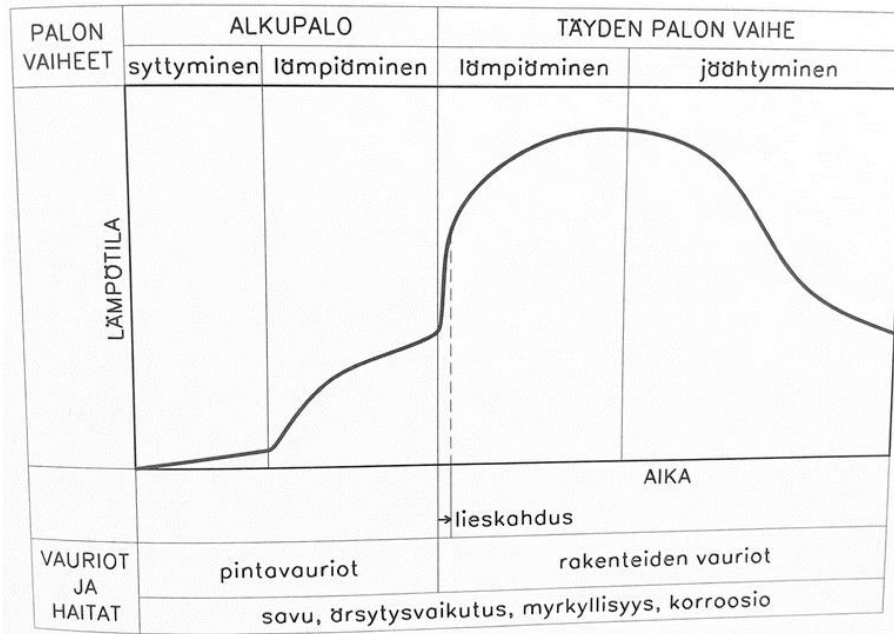
Tämä kaava kuvaa lämpötilan nousua standardipalossa, ja sitä käytetään rakenteiden palonkestävyyden arvioinnissa ja suunnittelussa. Standardipalon käyttö (Kuva 2) mahdollistaa rakenteiden suorituskyvyn vertailun ja varmistaa, että ne täyttävät turvallisuusvaatimukset palotilanteissa.



Kuva 2 Standardipalon aika-lämpötilayhteys (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, 12)

3.3 Toiminnallinen palomitoitus

Palotilanteita on äärettömän monta, rakennuksen sisällä tulipalon kehittymiseen vaikuttavat monet eri tekijät kuten palon syttymistapa, palotilan muoto, palokuorman suuruus ja tyyppi, palamiseen tarvittavan ilman riittävyys ja sammutusjärjestelmän tai palokunnan toiminta. Toiminnallinen palomitoitus tarkoittaa rakennuksen paloturvallisuuden arviointia ja suunnittelua tapauskohtaisesti riskianalyyysien ja palosimulaatioiden avulla. Toiminnallisen palomitoituksen tavoitteena on luoda mahdollisimman realistinen malli palon kehityksestä, joka voidaan eritellä alkupaloon sekä täyden palon vaiheeseen. Alkupallo jaetaan syttymis- ja lämpiämisvaiheeseen, jonka aikana palon sammuttaminen on kohtalaisen helppoa. Lämpiämisvaihe päättyy yleissyttymiseen eli lieskahdukseen, jolloin palon sammuttaminen on lähes mahdotonta (Kuva 3). Tämä lähestymistapa mahdollistaa tarkemman ja käytännönläheisemmän arvion palon vaikutuksista rakenteisiin ja tiloihin. Tätä laskentatapaa käytetään erityisesti silloin, kun rakennus poikkeaa tavanomaisista ratkaisuista, kuten esimerkiksi korkeissa tiloissa, avoimissa tilaratkaisuissa tai tiloissa, joissa on suuret väkimäärät (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, 11.)



Kuva 3 Todellisen palon vaiheet ja palotilan lämpötilan muuttuminen (Iso-Mustajärvi & Inha 1999, 11)

4 Rakenteen palosuojaus

4.1 Palosuojausmenetelmät

Kantavien rakenteiden kestävyys palotilanteessa ei yleensä ole riittävä ilman palosuojausta. Rakenteiden palonkestoaikaa voidaan kasvattaa parantamalla niiden lämmönvastaanottokykyä. Palosuojamenetelmät voidaan jakaa työmenetelmän perusteella kuiviin tai märkiin menetelmiin. Kuivat palosuojausmenetelmät asennetaan yleensä mekaanisilla kiinnikkeillä kantavaan teräsrakenteeseen tai asennetaan koteloina rakenteen ympärille. Näihin menetelmiin kuuluvat esimerkiksi erilaiset kasetit, levyt, tiili ja puu. Märät palosuojausmenetelmät sisältävät erilaiset palosuojaruiskutteet, -maalit, -rappaukset, betonin sekä vesipohjaiset ratkaisut. Molemmilla menetelmillä on omat etunsa ja sovellusalueensa, ja niiden valinta riippuu muun muassa rakenteen tyypistä, palonkestovaatimuksista sekä taloudellisista ja käytännön näkökohdista.

4.2 Palosuojamaalit

Palosuojamaalien käyttöön vaaditaan, että tuotteella on voimassa oleva tuotehyväksyntä. Valmistajat voivat hakea palosuojamaalilleen CE-merkintää ETA-hyväksyntämenettelyn avulla. Tällöin tuotteen suoritusasoilmoituksessa, joka liittyy CE-merkintään, viitataan tuotteen ETA-todistukseen. Palosuojamaalien ominaisuuksia testataan polttokokeissa, joissa mitataan maalin lämpötilan vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin.

Palosuojamaalauksen voi suorittaa joko konepajalla, työmaalla rakenteiden asennuksen jälkeen tai erillisellä maalausasemalla. Palosuojamaalauksessa on erityisen tärkeää varmistaa, että rakenteelle vaadittu kalvopaksuus saavutetaan. Tämä varmistetaan mittaamalla maalattujen teräsrakenteiden kalvopaksuus suoraan maalauspaikalla.

Palosuojamaalien suojauskyky ei ole vakio, vaan niiden ominaisuudet kuten kalvon paksuus ja lämpöeristyskyky muuttuvat merkittävästi kuumennuksen myötä. Tämän vuoksi niiden käyttäytymistä palotilanteessa ei voida mallintaa tarkasti perinteisillä laskentakaavoilla.

Sen sijaan palosuojamaalilla suojattujen teräsprofiilien lämpötilan kehitys määritetään valmistajien toimittamilla kokeellisilla tiedoilla, jotka perustuvat standardoituihin polttokokeisiin (esim. ISO 834- tai EN 13381 -standardien mukaisiin testeihin). Näissä kokeissa mitataan maalikerroksen suorituskykyä eri lämpötiloissa, ja tuloksena saadaan suojausaika- ja lämpötilakehityskäyriä, joita käytetään suunnittelussa (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2025.)

4.3 Rakenteiden paloluokitus

Rakentamismääräyskokoelmassa rakennukset jaetaan kolmeen eri paloluokkaan: P1, P2 ja P3. P1-luokkaan kuuluvien rakennusten tulee kestettävä tulipalo ilman sortumista. Tämä vaatimus varmistaa, että rakennus säilyttää rakenteellisen eheydensä ja kantavuutensa palotilanteessa, mikä on keskeistä turvallisuuden ja pelastustoiminnan kannalta. P1-luokan vaatimukset ovat tiukimmat, ja ne liittyvät yleensä suuriin tai erityisen tärkeisiin rakennuksiin, joissa sortumisen riski on erityisen kriittinen (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2025)

Kantavien rakenteiden R-luokkavaatimus määrittelee ajan, jonka rakenteen on kestettävä palossa ilman sortumista. Tämä vaatimus vaihtelee yleensä 30–240 minuutin välillä riippuen rakennuksen paloluokasta, koosta ja käyttötarkoituksesta. Vaatimus varmistaa, että rakenteet säilyttävät kantavuutensa ja turvaavat rakennuksen stabiilisuuden sekä mahdollistavat evakuoinnin ja pelastustoiminnan palotilanteessa.

Hoito- ja kulkutasojen suunnittelussa paloluokan määrittäminen perustuu täysin rakennuskohteen erityispiirteisiin. Opinnäytetyön toimeksiantaja, joka valmistaa teräsrakenteita, keskittyy pääasiassa suurikokoisiin tehtaisiin ja niiden koneisiin. Näille tehtaille ja niiden eri osastoille on jo määritetty tietyt palosuojausvaatimukset, joita on noudatettava suunnittelussa ja toteutuksessa.

5 Teräsrakenteen palomitoitus

5.1 Suunnitteluperusteet

Palosuojaamattomia teräsrakenteita käytetään hyvin harvoin kantavina rakenteina. Ilman riittävää palosuojausta ne eivät yleensä pysty täyttämään rakennusten paloturvallisuusvaatimuksia, mikä tekee palosuojauksen tarpeelliseksi niiden käytössä. Teräs on puuta ja teräsbetonia huomattavasti lujempi sekä palamaton materiaali, mikä mahdollistaa pidemmät jännevälit ja ohuemmat rakenteet kantavissa teräsrakenteissa verrattuna muihin rakennusmateriaaleihin. Lisäksi teräsrakenteet ovat huomattavasti kevyempiä kuin vastaavat betonirakenteet, mikä vähentää rakenteiden omaa painoa ja parantaa rakentamisen tehokkuutta sekä joustavuutta (BE Group 2025.)

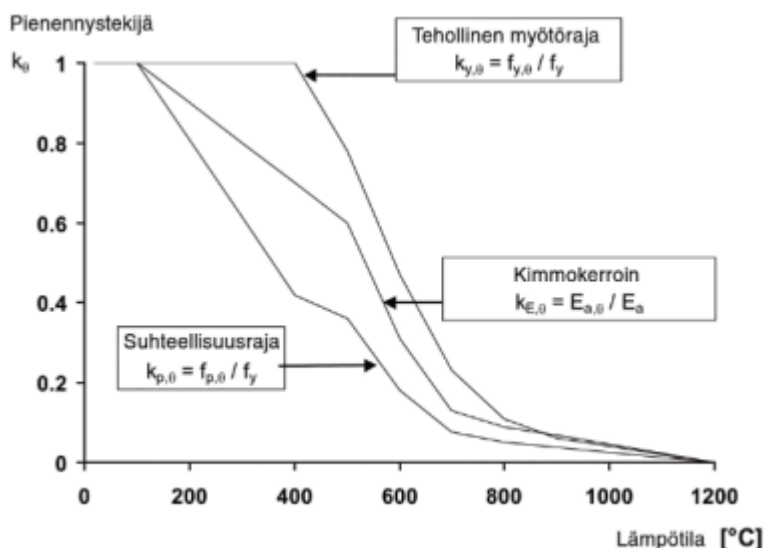
Paloteknisen suunnittelun vaatimukset määritellään kunkin maan kansallisissa määräyksissä ja ohjeissa, jotka voivat vaihdella merkittävästi maiden välillä. Eurooppalaisella tasolla on tehty useita pyrkimyksiä harmonisoida paloturvallisuuteen liittyviä vaatimuksia, mutta konkreettisia yhteisiä standardeja ei ole toistaiseksi saavutettu. Yksi keskeisistä haasteista on se, että kansalliset paloturvallisuusvaatimukset voivat poiketa toisistaan huomattavasti, mikä vaikeuttaa yhteisen suunnitteluperusteiden luomista (Kouhi 2014, 20.)

Teräsrakenteita mitoitettaessa yleisenä vaatimuksena on, että rakenteet kestävät sortumatta niille asetetun palonkestoajan. Palonkesto aika toimii teräsrakenteen palonkestävyyden arviointiperusteena, ja se voidaan määrittää joko kokeellisesti tai laskennallisilla menetelmillä. Palonkestoajalla tarkoitetaan aikaa palon syttymisestä siihen hetkeen, kun kantavan teräsrakenteen kestävyys on laskenut ennalta määritetyn raja-arvon alapuolelle tai rakenteen taipumat ylittävät sallitut raja-arvot. Tämä vaatimus varmistaa rakenteiden turvallisuuden ja toimivuuden tulipalon aikana.

5.2 Materiaaliominaisuudet

Teräksen kantavuus heikkenee lämpötilan noustessa, koska sen lujuus- ja kimmokerroin muuttuvat merkittävästi. Lisäksi teräksen voimakas lämpölaajeneminen palotilanteessa voi aiheuttaa pysyviä muodonmuutoksia. Nämä muutokset johtuvat lujuuden ja kimmokerroimen alenemisesta. Lämpölaajeneminen voi aiheuttaa teräsrakenteelle epäedullisia pakko-voimia eli lisäjännityksiä, jotka vaikuttavat rakenteen suorituskykyyn. Lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksilla tarkoitetaan teräksen kimmokerroimen, myötörajan ja vetomurtolujuuden riippuvuutta lämpötilasta (Kouhi 2014, 30.)

Nämä muutokset otetaan huomioon rakennesuunnittelussa alentamalla laskennassa käytettyjä lujuus- ja jäykkyyssarvoja. Lämpötilan vaikutus huomioidaan yleensä pienennyskerroimien avulla, jotka heijastavat teräksen ominaisuuksien heikkenemistä korkeissa lämpötiloissa. Tämä lähestymistapa varmistaa, että teräsrakenteet pysyvät turvallisina ja toimintakykyisinä myös palotilanteissa. Kuten kuvan 4 kuvaajasta voidaan havaita, teräksen myötöraja alkaa heikentyä merkittävästi, kun lämpötila kohoaa yli 400 °C. Kimmokerroin pienenee jo 100 °C:n lämpötilan jälkeen. Kuva 4 havainnollistaa lämpötilan vaikutusta teräksen myötörajaan ja kimmokertoimeen, korostaen näiden materiaaliominaisuuksien herkkyyttä lämpötilan muutoksille. Tämä heikkeneminen on tärkeä huomioida rakenteiden suunnittelussa, erityisesti palotilanteita varten, jotta varmistetaan rakenteiden turvallisuus ja toimivuus korkeissa lämpötiloissa.



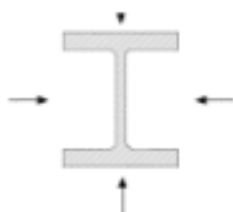
Kuva 4 Pienennystekijät hiiliteräksen jännitys-venymäyhteydelle korkeissa lämpötiloissa (SFS EN 1991-1-2, 22)

5.3 Poikkileikkaus

Teräsrakenteen lämpötilan nousuun palotilanteessa vaikuttaa merkittävästi teräsosan poikkileikkaus. Poikkileikkaus tarkoittaa teräsosan palolle altistuvan pinta-alan suhdetta sen tilavuuteen. Raskaat rakenteet, joilla on pieni poikkileikkaustekijä, kuumenevat hitaammin verrattuna kevyempiin rakenteisiin, joilla poikkileikkaustekijä on suurempi. Eurokoodeissa tämä tekijä kuvataan merkinnällä A/V , joka tunnetaan myös yleisesti merkinnällä F/V . Tämä suhde ilmaisee teräsosan palolle altistuvan pinta-alan (A tai F) suhteen sen tilavuuteen (V).

Mitä suurempi A/V -suhde on, sitä nopeammin teräsosa lämpenee, koska suurempi pinta-ala altistuu lämmön vaikutukselle suhteessa tilavuuteen. Tämä tekijä on huomioitava teräsrakenteiden palonkestävyyden suunnittelussa, esitetty kuvassa 5.

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{piiri}}{\text{poikkileikkauksen pinta-ala}}$$







Kuva 5 Avoin poikkileikkaus, johon palo kohdistuu kaikilta sivuilta (SFS EN 1993-1-2, 36)

Teräsrakenteiden palosuojauksessa esiintyy useita erilaisia suojaus tilanteita, joissa osa teräsprofiilista (yksi tai useampi sivu) on suojattu. Näitä erityistapauksia varten on kehitetty erilliset laskentakaavat, jotka ottavat huomioon suojatut ja suojaamattomat pinnat, sekä valmiit laskentataulukot, joissa on esilasketut arvot yleisimmille profiileille ja suojausyhdistelmille. Nämä menetelmät mahdollistavat tarkan palonkestävyyden arvioinnin erityistilanteissa ja helpottavat suunnittelutyötä. Käytännössä suojausgeometria vaikuttaa merkittävästi lämmönsiirtymiseen ja rakenteen lämpötilan kehitykseen palotilanteessa.

Palosuojattujen teräsosien poikkileikkaustekijälle käytetään suhdetta F_j/V , missä F_j on palosuojauksen palon vastaisen pinnan pinta-ala. Mikäli poikkileikkaustekijä on vakio tarkasteltavan rakenteen eri poikkileikkauksissa, voidaan laskelmissa käyttää teräsosan pinta-alan sijaan vastaavaa piiriä ja tilavuuden sijasta poikkileikkauksen pinta-alaa (Kaitila 2014, 38).

Kuvassa 6 on F/V ja F_j/V arvot, kun HEB profiili on palolle alttiina kaikista suunnista tai vain kolmesta suunnasta

Taulukko 8.2 HEB-profiilien F/V - ja F_j/V -arvot, kun profiili on palolle alttiina kaikista suunnista tai vain kolmesta suunnasta.

H E B				
	F/V F_j/V [1/m]	F/V F_j/V [1/m]	F_j/V [1/m]	F_j/V [1/m]
100	218,2	179,8	153,8	115,4
120	201,9	166,6	141,2	105,9
140	187,3	154,7	130,2	97,7
160	169,1	139,6	117,9	88,4
180	158,8	131,3	110,3	82,7
200	147,4	121,8	102,4	76,8
220	139,6	115,4	96,7	72,5
240	130,6	107,9	90,6	67,9
260	126,6	104,6	87,8	65,9
280	123,1	101,8	85,2	63,9
300	116,1	96,0	80,5	60,4
320	109,8	91,2	76,9	58,3
340	105,9	88,3	74,9	57,3
360	102,4	85,8	73,1	56,5
400	97,4	82,2	70,8	55,6
450	92,9	79,2	68,8	55,0
500	89,0	76,5	67,1	54,5
550	87,5	75,7	66,9	55,1
600	86,0	74,9	66,7	55,6
650	84,6	74,1	66,4	55,9
700	82,2	72,4	65,3	55,5
800	81,2	72,2	65,8	56,9
900	78,4	70,3	64,6	56,6
1000	77,8	70,3	65,0	57,5

Kuva 6 HEB- profiilien F/V ja F_j/V arvot (Kaitila 2014, 40)

5.4 Poikkileikkausluokitus

Rakenteet jaetaan poikkileikkausluokkiin 1–4, jotka määräytyvät rakenteen mittojen suhteista ja niihin vaikuttavista jännityksistä. Poikkileikkausluokkien mukaisesti rakenteiden kestävyksiä laskettaessa käytetään erilaisia teorioita:

- Plastisuusteoriaa voidaan käyttää poikkileikkausluokissa 1–2, joissa rakenteet kestävät plastisia muodonmuutoksia ilman merkittävää vaurioitumista.
- Kimmoteoriaa voidaan käyttää kaikissa poikkileikkausluokissa (1–4), sillä se perustuu rakenteiden kimmoiseen käyttäytymiseen.

Voimasuureita laskettaessa:

- Plastisuusteoriaa voidaan käyttää ainoastaan poikkileikkausluokassa 1, koska tässä luokassa rakenteet kestävät plastisia muodonmuutoksia ilman kantokyvyn menetystä.
- Kimmoteoriaa voidaan käyttää kaikissa poikkileikkausluokissa (1–4), sillä se soveltuu rakenteiden kimmoiseen käyttäytymiseen kaikissa tilanteissa.

Tämä luokittelu ja teorioiden käyttö mahdollistavat rakenteiden turvallisen ja tehokkaan suunnittelun erilaisissa kuormitustilanteissa.

5.5 Rakenteen kriittinen lämpötila

Teräksen kestävyden laskenta palotilanteessa suoritetaan yleensä seuraavien vaiheiden mukaisesti:

1. Kriittisen lämpötilan määrittäminen: Kriittisellä lämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa, jossa rakenteen kestävyden laskenta-arvo on samansuuruinen kuin siihen vaikuttavan kuorman laskenta-arvo. Tämä lämpötila riippuu rakennemallista, materiaaliominaisuuksista, profiilin mitoista sekä kuormituksista.
2. Lämpötilan vertailu: Rakenteen kriittistä lämpötilaa verrataan teräksen lämpötilaan palotilanteessa. Jos teräksen lämpötila ylittää kriittisen lämpötilan vaaditun palonkestoajan aikana, rakenteen palonkestävyyttä on parannettava. Tämä voidaan tehdä joko parantamalla palonsuojausta tai nostamalla rakenteen kriittistä lämpötilaa.

Kriittiseen lämpötilaan (Kaava 2) vaikuttavat tekijät, kuten rakennemalli, materiaaliominaisuudet, profiilin mitat ja kuormat (Kaava 3), on otettava huomioon tarkasti, jotta rakenteen turvallisuus palotilanteessa voidaan taata.

Kriittinen lämpötila (SFS EN 1993-1-2, 34.):

$$\theta_{a, cr} = 39.19 \text{LOG} \left(\frac{1}{0.9674 * \mu_0^{3.833}} \right) - 1 + 482 \quad (2)$$

Hyväksikäyttöaste (SFS-EN 1993-1-2, 34.):

$$\mu_0 = \frac{E_{fi, d}}{R_{fi, d0}} \quad (3)$$

missä:

$E_{fi, d}$ on kuormien vaikutusten mitoitusarvo palotilanteessa standardin EN 1991-1-2 mukaan

$R_{fi, d}$ on mitoitusarvo joka vastaa kestävyden mitoitusarvoa palotilanteessa

6 Excel-laskentaohjelma

6.1 Lähtötiedot

Opinnäytetyön tehtävänä oli luoda Excel-laskentaohjelma, joka antaa suunnittelijalle vastauksen valitun profiilin kestävydestä arvioidussa kuormitustilanteessa. Laskentapohja laskee suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan kehityksen Eurokoodi 3:n mukaisesti ja laskee rakenteeseen kohdistuvat leikkaus-, taivutus- ja nurjahdusvoimat, sekä rakenteen kriittisen lämpöasteen, jolloin rakenteen kestävyys on yhtä suuri kuin kuormien aiheuttama voima. Nämä tiedot Premekon Oy lähettää palosuojauksen toimittajalle, he valitsevat tilanteeseen sopivan ainepaksuuden ja suojauksen. Laskentaohjelman ensimmäisessä vaiheessa suunnittelijan tulee ensiksi mitoittaa ja valita kuormitustilanne kuormaa kantavalle palkille. Kuva 7 näyttää laskentaohjelman lähtötiedot palkki rakenteelle, joiden avulla määritetään palkkiin kohdistuvien kuormien vaikutus.

Materiaalin myötölujuus, arvoiksi on asetettu 235 N/mm^2 tai 355 N/mm^2 .

$E = 210000 \text{ N/mm}^2$ on materiaalin kimmomoduuli

L on jänneväli eli tutkittavan palkin pituus.

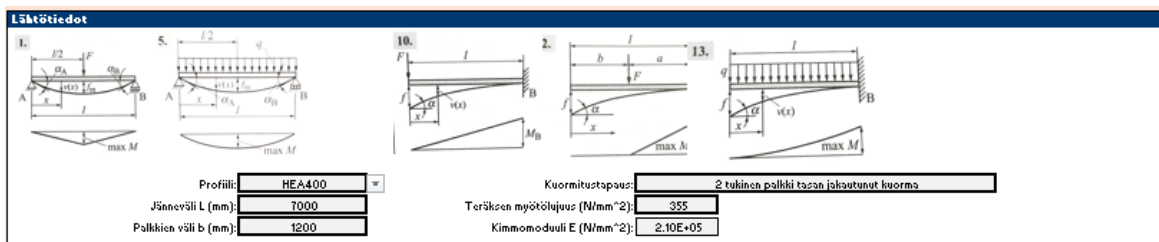
Profiili on kuormaa kantavan teräsrakenteen profiili.

b on tasan jakautuneen kuorman (m^2) viivakuormaksi jakava tason leveys.

Kuormitustapaus solusta valitaan tilannetta kuvaava kuormitustilanne.

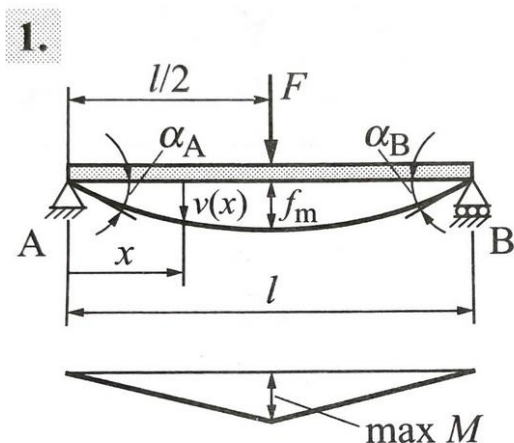
Kuormitustilanteiksi opinnäytetyössä on valittu 5 yleisintä tapausta, jotka ovat:

- 2 tukinen palkki, pistekuorma keskellä (Kuva 8)
- 2 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma (Kuva 9)
- 1 tukinen palkki, pistekuorma päädyssä (Kuva 10)
- 1 tukinen palkki, pistekuorma keskellä (Kuva 11)
- 1 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma (Kuva 12)

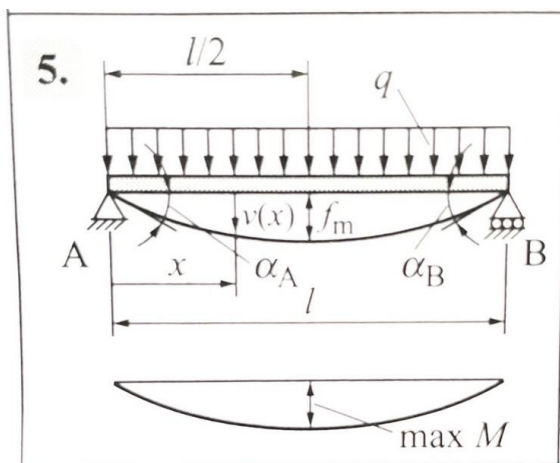


Kuva 7 Lähtötiedot

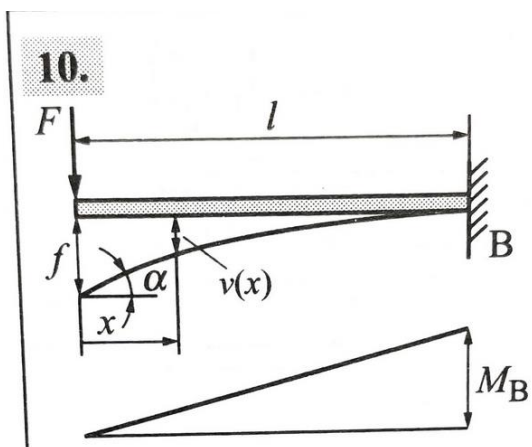
Laskentaohjelman monikäyttöisyyden varmistamiseksi kuormien määrittäminen on jaettu viiteen yleisimpään kuormitustapaukseen. Jokaiselle tapaukselle on olemassa omat tapauskohtaiset laskentakaavat niihin kohdistuvien voimien määrittämiseksi. Laskentaohjelma käyttää myös eri kuormitustapausten kaavoja vaadittavan jäyhyysmomentin (Ivaadittu) ja kuormista syntyvän taipuman (σ) laskemiseen IF-funktioiden avulla.



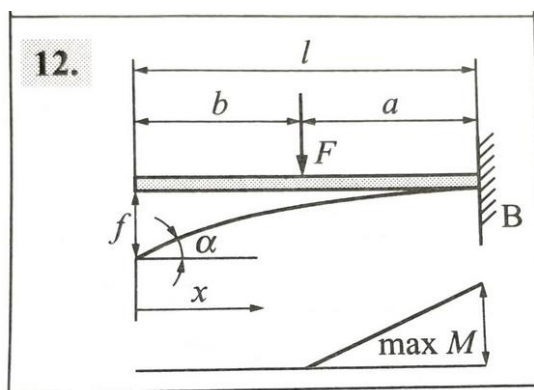
Kuva 8 2 tukinen palkki, pistekuorma keskellä (Valtanen 2019, 316)



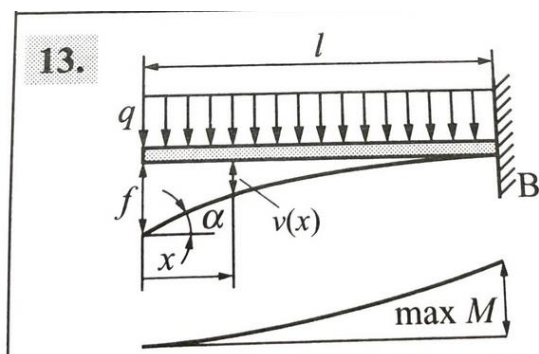
Kuva 9 2 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma (Valtanen 2019, 317)



Kuva 10 1 tukinen palkki, pistekuorma päädyssä (Valtanen 2019, 319)



Kuva 11 1 tukinen palkki, pistekuorma keskellä (Valtanen 2019, 320)



Kuva 12 1 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma (Valtanen 2019, 320)

6.2 Kuormitukset

Rakenteisiin kohdistuu useita ulkoisia ja sisäisiä voimia, jotka jaetaan pysyviin ja muuttuviin kuormiin niiden vaikutuksen ajan perusteella. Määrävä kuorma määritetään vertailemalla eri kuormitusyhdistelmien rasituksia. Suunnittelussa tulee huomioida paikalliset olosuhteet (kuten ilmasto ja käyttötarkoitus) ja rakenteen ominaisuudet. Eurokoodien (EN 1990, EN 1991) ja kansallisten liitteiden mukaiset laskentamenetelmät varmistavat turvallisuuden.

6.2.1 Pysyvät ja muuttuvat kuormat

Pysyvät kuormat ovat rakenteeseen kohdistuvia kuormia, jotka eivät muutu merkittävästi rakennuksen käyttöänsä aikana. Näitä ovat siihen kiinteästi kytketyt massat ja kantavan rakenteen oma paino.

Pistekuorma F: Pistekuorma luokitellaan pysyväksi kuormaksi, mutta kuormitustilanteissa sen vaikutusta lasketaan eri tavalla kuin tasan jakautunutta kuormaa

Pysyvät kuormat (G): Rakenteiden oma paino ja muut jatkuvat vaikutukset (esim. kutistuminen).

Muuttuviksi kuormiksi luokitellaan luonnon voimat, kuten lumi- ja tuulikuormat sekä hyötykuormat, jotka määräytyvät eri tiloille niiden käyttötarkoituksen mukaan. Hyötykuormat aiheutuvat mm. ihmisistä ja liikuteltavista laitteista ja kalustoista.

Muuttuvat kuormat (Q): Hyötykuormat, tuuli ja lumi.

Laitekuorma pilarinne F_n on suoraan pilarin päällä olevaa laskettua kuormaa, joka vaikuttaa sen nurjahtamiseen.

Seuraavaksi laskentaohjelman käyttäjän kuuluu määrittellä rakenteeseen kohdistuvien kuormien lukuarvot (Kuva 13), palkin massan laskentaohjelma laskee itse profiilin valitsemisen jälkeen.

Kuormitukset	Osaarvoarvot (1990 s.88)	Kertoimet (1990 s.138) (1991-1-3 s.30-32)
Pistekuorma F (kN):	100.00	Seurausluokkakertoimen CC1-CC3 Kfi:
Pysyväkuorma Gk1 (kN/m ²):	2.00	Tehollisuuskertoimen Ce:
Pysyväkuorma palkin massa Gk2 (kN/m):	1.23	Lämpökertoimen Ct:
Muuttuva kuorma Lumi Gk1 (kN/m ²):	2.75	Muotokerroin μ :
Muuttuva kuorma Hyötykuorma Gk2 (kN/m ²):		
Laitekuorma pilarille F _n (kN):	200	Laitte kuorman varmuuskertoimen:
	Osaarvoarvot Pysyvät kuormat γ_G :	1.1
	Osaarvoarvot Muuttuvat kuormat γ_Q :	1
	Osaarvoarvot Oma paino γ_G :	1
	Osaarvoarvot Pysyvät kuormat γ_G :	0.8
	Osaarvoarvot Muuttuvat kuormat γ_Q :	
	Osaarvoarvot Muuttuvat kuormat γ_Q :	

Kuva 13 Kuormitukset ja kertoimet

6.2.2 Varmuuskertoimet

Pysyvät kuormat $\gamma_G =$ Varmuuskerroin 1–1.35 (SFS 1990, 88.)

Muuttuvat kuormat $\gamma_Q =$ Varmuuskerroin 1.5 (SFS 1990, 88.)

K_{fi} = Luotettavuusluokka 0.9–1.1 (SFS EN 1990, 138.)

C_e = tuulensuojauskerroin 0.8–1.2 (SFS-EN 1991-1-3, 30.)

C_t = lämpökerroin 1 (SFS-EN 1991-1-3, 30.)

u = Lumikuorman muotokerroin, katon kulmasta riippuva 0.8 (SFS-EN 1991-1-3, 32.)

6.2.3 Kuormat varmuuskertoimilla

Kuvassa 13 laskentaohjelman käyttäjä arvioi ja syöttää sarakkeisiin kuormien määrän ja valitsee kertoimien suuruudet alavetovalikoista, kuvan 14 sarakkeet jatkuvat laskentaohjelman oikealla puolella ja laskevat kuormien suuruudet lähtötiedoissa valitulle kuormitustilanteelle. Kaavoissa 4–8 esitetään kuvassa 14 näkyvien kuormitusten laskentakaavoja.

Kuormat varmuuskertoimilla		Kuormitustapa: kohtaiset kokonaiskuormat		Kuormitustapa: yhdistelmät	
(kN):	115.00	Kokonaiskuorma (kN/m):	8.62	Maksimi momentti M_{edmax} (kN*m):	
(kN/m ²):	2.53	Maksimi momentti M_{edmax} (kN*m):	52.79	Maksimi momentti M_{edmax} (kN*m):	
(kN/m):	1.23	Maksimi leikkauvoima V_{edmax} (kN):	30.16	Maksimi leikkauvoima V_{edmax} (kN):	
(kN/m ²):	3.63				
(kN/m ²):	0.00				
(kN):	300.00	Pilarille tukivoima ja laitekuorma (kN):	330.2		

Kuva 14 Kuormitukset varmuusluvuilla ja tapauskohtaiset kuormitukset

Pistekuorma F (kN):

$$F_{piste} = F * \gamma_G \quad (4)$$

Pysyväkuorma G_{k1} (kN/m²):

$$G_{k1pysyvä} = G_{k1} * \gamma_G * K_{fi} \quad (5)$$

Pysyväkuorma palkin massa F_{k2} (kN/m):

$$G_{k2massa} = \text{Palkin massa } (G) * g * 1 \quad (6)$$

Muuttuvakuorma Lumi Q_{k1} (kN/m²):

$$Q_{kLumi} = Q_{k1} * \gamma_Q * K_{fi} * C_e * C_t * \mu \quad (7)$$

Muuttuvakuorma Hyötykuorma Q_{k2} (kN/m²):

$$Q_{khy\ddot{o}ty} = Q_{k3} * \gamma_Q * K_{fi} \quad (8)$$

6.2.4 Kuormitus tapauskohtaiset kokonaiskuormat

Tapauskohtaisien kuormitusten kaavojen lähteenä on Esko Valtasen Tekniikan taulukko-kirja. Lähtötiedoissa määritetty kuormitustapaus päättää IF-funktion avulla mitä kuormitus-arvoja laskentaohjelma käyttää kokonaiskuorman, maksimi momentin ja maksimi leikkausvoiman laskemisessa. Esimerkiksi jos tutkitaan pistekuorma tapausta, laskentaohjelma tunnistaa kuormitustapaus solun tunnisteesta sanan ”piste” ja laskee vain arvoja pistekuormasolusta. Vastaavasti jos tunnisteessa on sana ”tasan”, laskentaohjelma käyttää neliökuorman arvoja ja kertoo nämä palkkien väli b:n arvolla, jotta saadaan palkkiin vaikuttava tasan jakautunut kuorma. Maksimi momenttia ja leikkausvoimaa laskettaessa laskentaohjelma lukee kuormitustapaus solun tunnistetta tarkemmin ja päättää sen nimen perusteella mitä kaavoja se käyttää (Kaavat 9–18). Tilanteessa, jossa on samanaikaisia kuormitusyhdistelmiä, kuten esimerkiksi tasan jakautunutta kuormaa ja pistekuormaa. Laskentaohjelman käyttäjä syöttää manuaalisesti kuormista aiheutuvat voimat kuormitustapausten yhdistelmät sarakkeisiin.

missä:

F = Kokonaiskuorma pistekuormalle (kN)

q = Kokonaiskuorma tasan jakautuneelle kuormalle (kN/m)

L = Jänneväli

IF-funktion määrittämät maksimi momentin ja leikkausvoiman kaavat kuormitustapauksittain (Valtanen 2019, 316–320.)

2 tukinen palkki, pistekuorma keskellä:

$$M_{edmax} = \frac{F * L}{4} \quad (9)$$

$$V_{edmax} = \frac{F_{piste}}{2} \quad (10)$$

2 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma:

$$M_{edmax} = \frac{q * L^2}{8} \quad (11)$$

$$V_{edmax} = \frac{q * L}{2} \quad (12)$$

1 tukinen palkki, pistekuorma päädyssä:

$$Medmax = F * L \quad (13)$$

$$Vedmax = F \quad (14)$$

1 tukinen palkki, pistekuorma keskellä:

$$Medmax = F * \frac{L}{2} \quad (15)$$

$$Vedmax = F \quad (16)$$

1 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma:

$$Medmax = \frac{q * L^2}{2} \quad (17)$$

$$Vedmax = q * L \quad (18)$$

6.3 Palkin tarkistus

$\gamma_{m0} = 1$ on materiaaliominaisuuden osavarmuuskerroin (SFS EN 1993-1-1, 48)

Leikkauspinta-alaa laskiessa (Kuva 15) solun IF-funktio tunnistaa profiili solussa olevan nimen lyhenteen perusteella mitä kaavaa (Kaavat 19-21) kuuluu käyttää, kuten esimerkkinä: IF(ISNUMBER(SEARCH("HE";C13))), IF-funktio etsii solusta C13 kirjaimia "HE", jos rakenteeksi on valittu HEA400 tai HEB400 profiili, funktio tunnistaa kirjaimet HE profiilin tunnisteesta ja käyttää H-profiilin laskentakaavaa.

Leikkauspinta-ala A_v arvot profiileille (1993-1-1, 54)

I- ja H-profiilit:

$$A - 2btf + (tw + 2r)tf \quad (19)$$

U-profiilit:

$$A - 2btf + (tw + r)tf \quad (20)$$

SHS-profiilit:

$$\frac{Ah}{b + h} \quad (21)$$

Palkin tarkistus		ym0: 1993-1-1 s.46	Av: 1993-1-1 s.54	PL: 1993-1-1 s.45-46	Wraadittu: 1993-1-1 s.53
Osovarmuus kerroin γ_{m0} :	1			Leikkuspinta-ala A_w (mm ²):	5735
Geometrinen hoikkuus (HS):	0,00			PL:	1
Geometrinen hoikkuus U_{oma} (H, I, U):	27,03			PL U_{oma} :	1
Geometrinen hoikkuus U_{loipot} (H, I, U):	6,18			PL U_{loipot} :	1
Vaadittu taiputusvastus W_{vaadittu} (mm ³):	1,43E+05			Vaadittu jäykkyyshmomentti I_{vaadittu} (mm ⁴):	5,50E+07
				Käyttöaste taiputusvastus W :	5,6%

Kuva 15 Palkin tarkistus

Palkin tarkistus laskee profiilin geometrisen hoikkouden Eurokoodi 3:n mukaan (Kuvat 16–17), jonka avulla tunnistetaan missä laajuudessa poikkileikkausten paikallinen lommahdus rajoittaa sen kestävyyttä ja kiertymiskykyä (SFS EN 1991-1-1, 42.)

Luokka 1: Sallii täyden plastisen kiertymiskyvyn ilman kantokyvyn heikkenemistä.

Luokka 2: Mahdollistaa plastisen taiputuskestävyyden, mutta kiertymiskyky on rajoitettu.

Luokka 3: Myötöraja saavutetaan, mutta paikallinen lommahdus rajaa plastisen momentin kehittymisen.

Luokka 4: Paikallinen lommahdus estää myötörajan saavuttamisen.

Taulukko 5.2 (Osa 1): Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat			
Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)			
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)			
3	$c/t \leq 124\epsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\epsilon$ ²⁾	$\text{kun } \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $\text{kun } \psi \leq -1^{\text{a)}}: c/t \leq 62\epsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275
	ϵ	1,00	0,92
			355
			420
			0,81
			0,75
			460
			0,71

^{a)} Arvoa $\psi \leq -1$ käytetään, kun joko puristusjännitys $\sigma < f_y$ tai vedetyn puolen venymä $\epsilon_y > f_y/E$

Kuva 16 Uuman geometrinen hoikkuus (SFS 1993-1-1, 45)

Taulukko 5.2 (Osa 2): Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet

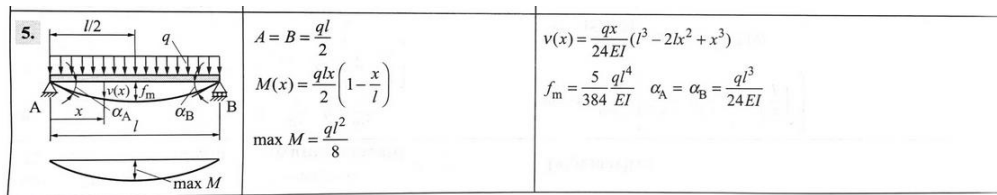
		Ulokkeelliset laipat				
		Valssatut profiilit		Hitsatut profiilit		
Poikkileikkauksiluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ⁴⁾	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$ ⁵⁾				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Kuva 17 Laipan geometrinen hoikkuus (SFS EN 1993-1-1, 46)

Vaadittu taivutusvastus ja vaadittu jäyhyysmomenttisolut laskevat asetetuista kuormista paljonko kyseistä vastusta vaaditaan profiililta ja antaa solulle vihreän väri indikaattorin Conditional formatting-työkalulla, jos valitun profiilin ominaisuus on suurempi ja vastaavasti solu muuttuu punaiseksi, jos profiilin ominaisuus on vaadittua pienempi. Tämä nopea ja helppo vertaus kaavassa 22 antaa suoran vastauksen siitä, että kestääkö profiili kuormia ilman palotilanteen mitoitusta. Jos profiili ei kestä annettuja vaatimuksia edes normaali tilassa on käytettävä toista profiilia. Vaaditun jäyhyysmomentin arvon pystyy päättämään Esko Valtasen taulukko kirjan avulla (Kuva 18), kun on laskettu sallittu taipuma (σ sallittu) palkille kappaleessa 6.6. Tämän avulla suunnittelija saa lähtökohtaisen arvion siitä paljon kuormitustilanteeseen valittavan palkin taivutusvastuksen ja jäyhyysmomentin kuuluisi olla. Laskentaohjelma vaihtaa seuraavia lvaadittu laskentakaavoja (Kaavat 23–27) valitun kuormitustilanteen mukaisesti.

Vaadittu taivutusvastus:

$$W_{vaadittu} = \frac{M_{edMax} * \gamma_{m0}}{f_y} \quad (22)$$



Kuva 18 Kaksitukisen palkin taivutus tasan jakautuneelle kuormalle (Valtanen 2019, 317)

2 tukinen palkki pistekuorma keskellä:

$$Ivaadittu = \frac{F * L^3}{48 * E * \sigma_{sallittu}} \quad (23)$$

2 tukinen palkki tasan jakautunut kuorma:

$$Ivaadittu = \frac{5}{384} * \frac{q * L^4}{E * \sigma_{sallittu}} \quad (24)$$

1 tukinen palkki pistekuorma päädyssä:

$$Ivaadittu = \frac{F * L^3}{3 * E * \sigma_{sallittu}} \quad (25)$$

1 tukinen palkki pistekuorma keskellä:

$$Ivaadittu = \frac{F * \left(\frac{L}{2}\right)^3}{6 * E * \sigma_{sallittu}} * \frac{3 * L}{\frac{L}{2}} - 1 \quad (26)$$

1 tukinen palkki tasan jakautunut kuorma:

$$Ivaadittu = \frac{q * L^4}{8 * E * \sigma_{sallittu}} \quad (27)$$

6.4 Palkin taipumamitoitus

Kuvassa 19 laskenta ohjelma näyttää vihreällä tai punaisella värillä ovatko rakenteen taipumat sallituissa rajoissa. Yhdistettyjen kuormien kertoimet luetaan kuvan 20 taulukosta. Yhdistetyt pysyvät kuormat ja yhdistetyt muuttuvat kuormat solut edesauttavat taipumien laskutoimitusta, käyttäen eri kertoimia ψ_1 ja ψ_2 (Kuva 19). Sallittu taipuma (Kaava 29) ja kuormitusyhdistelmien taipumien kaavat (Kaavat 40–42) määritetään Suomen kansallisten liitteiden mukaisesti. Pysyvän ja vaihtuvan kuorman laskentakaavat vaihtuvat kuormitustapausta solun mukaisesti kaavojen 30–39 mukaan (Valtanen 2019, 316–320.) Staattisessa kuormituksessa ominaiskuormayhdistelmistä aiheutuvien lopputaipumien ja siirtymien

käyttöraajat noudattavat taulukossa kuvassa 21 esitettyjä arvoja, mikäli taipumat aiheuttavat haittaa (esim. rakenteellisia vaurioita, toiminnallisia häiriöitä tai esteettisiä ongelmia). Poikkeuksena ovat tilanteet, joissa rakenteen erityisominaisuudet, käyttötarkoitus tai toiminnalliset vaatimukset oikeuttavat muiden raja-arvojen käyttöön (Suomen rakentamismääräyskokoelma.)

Palkin taipumamitoitus		Sallittu taipuma 1993 kansallinen liite s.19	
Sallittu taipuma L/XXX:	300	Yhdistetyt Pysyvät kuormat (hNm):	4.26
Kuorma yhdistelmien @ arvot:	Luokka E varastotilat	Yhdistetyt Muuttuvat kuormat (hNm):	8.62
Kuormien yhdistely kerroin @ 1:	0.3	Sallittu taipuma (mm):	23.3
Kuormien yhdistely kerroin @ 2:	0.80	Pysyvän kuorman taipuma (mm):	1.4
Kerran klinisoaren aikana (mm):	3.37	Vaihtuvan kuorman taipuma (mm):	2.8
Jatkuvu taipuma (mm):	3.7	Yhdistetty taipuma (mm):	4.3

Kuva 19 Palkin taipumamitoitus

Kuorma	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoonmistilat	0,7	0,7	0,6
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 kN < ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Rakennusten lumikuormat (ks. EN 1991-1-3) ¹⁾			
Suomi, Islanti, Norja, Ruotsi	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H > 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H \leq 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,50	0,20	0
Rakennusten tuulikuormat (ks. EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (ks. EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

¹⁾ HUOM. Kertoimien Ψ arvot voidaan määrittellä kansallisessa liitteessä.
²⁾ Mikäli maata ei ole mainittu, kyseiset paikalliset olosuhteet selvitetään erikseen.

Kuva 20 Kuormien yhdistely kertoimet (SFS EN 1990, 86)

G on yhdistetyt pysyvät kuormat

Q on yhdistetyt muuttuvat kuormat

Sallittu taipuma (Kuva 17):

$$\sigma_{\text{sallittu}} = \frac{L}{300} \quad (29)$$

Taipuma pysyvä kuorma (2 tukinen palkki, pistekuorma keskellä)

$$\sigma_g = \frac{G * L^3}{48 * E * I_y} \quad (30)$$

Taipuma vaihtuva kuorma (2 tukinen palkki, pistekuorma keskellä)

$$\sigma q = \frac{Q * L^3}{48 * E * I_y} \quad (31)$$

Taipuma pysyvä kuorma (2 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma):

$$\sigma g = \frac{5 * G * L^4}{384 * E * I_y} \quad (32)$$

Taipuma vaihtuva kuorma (2 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma):

$$\sigma q = \frac{5 * Q * L^4}{384 * E * I_y} \quad (33)$$

Taipuma pysyvä kuorma (1 tukinen palkki, pistekuorma päädyssä):

$$\sigma g = \frac{G * L^3}{3 * E * I_y} \quad (34)$$

Taipuma vaihtuva kuorma (1 tukinen palkki, pistekuorma päädyssä):

$$\sigma q = \frac{Q * L^3}{3 * E * I_y} \quad (35)$$

Taipuma pysyvä kuorma (1 tukinen palkki, pistekuorma keskellä):

$$\sigma g = \frac{G * \left(\frac{L}{2}\right)^3}{6 * E * I_y} \quad (36)$$

Taipuma vaihtuva kuorma (1 tukinen palkki, pistekuorma keskellä):

$$\sigma q = \frac{Q * \left(\frac{L}{2}\right)^3}{6 * E * I_y} \quad (37)$$

Taipuma pysyvä kuorma (1 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma):

$$\sigma g = \frac{G * L^4}{8 * E * I_y} \quad (38)$$

Taipuma vaihtuva kuorma (2 tukinen palkki, tasan jakautunut kuorma):

$$\sigma q = \frac{Q * L^4}{8 * E * I_y} \quad (39)$$

Taipuma yhdistetty:

$$\sigma_{yhd} = \sigma g + \sigma q \quad (40)$$

Taipuma kerran elinkaaren aikana:

$$\sigma_{kerran} = \sigma_g + \psi_1 * \sigma_q \quad (41)$$

Jatkuva taipuma:

$$\sigma_{jatkuva} = \sigma_g + \psi_2 * \sigma_q \quad (42)$$

Rakenne	Taipuman tai siirtymän raja-arvo
Pääkannattajat	
- vesikatoissa ja katoksissa	L/300
- välipohjissa	L/400
Ulokkeet	L/150
Katto-orret	L/200
Seinäorret	L/150
Muotolevyt	
- katoissa, joissa ei ole vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaaraa	L/100
- katoissa, joissa vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaara on olemassa	
- kun $L \leq 4,5$ m	L/150
- kun $4,5 \text{ m} < L \leq 6,0$ m	30 mm
- kun $L > 6,0$ m	L/200
- välipohjissa	L/300
- seinissä	L/100
- ulokkeissa	L/100
Rakenteen vaakasiirtymän rajatila	
- 1 ja 2 kerroksiset rakennukset	H/150
- muut rakennukset	H/400
L on jänneväli	
H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus	
Rakennukset, jossa on nosturirata, katso standardi SFS-EN 1993-6 ja sen kansallinen liite.	

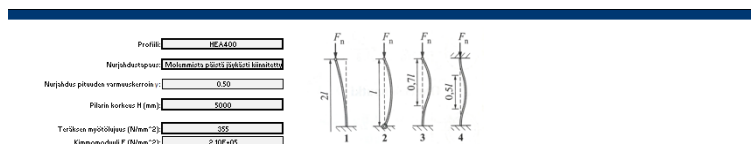
Kuva 21 Taipumien ja siirtymien käyttörajatilat (Suomen rakentamismääräyskokoelma, 19)

6.5 Pilarin lähtötiedot

Pilarin lähtötiedoissa (Kuva 22) valitaan profiili, nurjahdustapaus ja materiaalin myötölujuus alusvetovalikoista. Seuraavaksi määritetään pilarin korkeus. Pilariin kohdistuvan kuorman laskenta suoritetaan kuvissa 13–14 erikseen kaavan 43 mukaisesti.

Pilariin vaikuttava kuorma:

$$F_{pilari} = VedMax + F * 1.5 \quad (43)$$



Kuva 22 Pilarin lähtötiedot

6.6 Pilarin tarkistus

Pilarin tarkistuksessa (Kuva 23) lasketaan valitun profiilin poikkileikkausluokka, leikkauspinta-ala ja että, onko valitun profiilin pinta-ala alustavasti sopiva sen myötölujuuten verrattuna kaavalla 44.

Profiilin vaadittu pinta-ala:

$$A_{vaadittu} = \frac{F_{pilari}}{f_y} \quad (44)$$

Pilarin tarkistus		Leikkauspinta-ala A_v (mm ²):	
Alustava leikkauksen A (mm ²):	330.0	PL:	1
Geometrisen hoikkuus (HS):	0.00	PL Uuma:	1
Geometrisen hoikkuus Uuma (H, I, U):	27.03	PL Laipat:	1
Geometrisen hoikkuus Laipat (H, I, U):	6.18		

Kuva 23 Pilarin tarkistus

6.7 Pilarin nurjahduskestävyyden laskenta

Kuvan 24 osio käyttää pilarin lähtötiedoissa määritettyjä arvoja ja tulkitsee kuvan 25 nurjahduskäyrän valinta taulukkoa. Pilarin muovaus nimisessä solussa kerrotaan, onko pilari kuuma- vai kylmämuovattu ja nurjahdus akseli solussa valitaan suunta, nämä vaikuttavat pilarin nurjahduskäyrään. Nurjahduskäyrä taulukosta (Kuva 25) IF-funktio havaitsee profiilin nimestä, myötölujuudesta, nurjahdus akselin suunnasta ja mitoista mikä nurjahduskäyrä valitaan. Tuloksena saadaan nurjahduskäyrän epätarkkuustekijä (α) jonka arvo katsotaan kuvasta 26. Lopuksi laskee nurjahduskestävyyden laskemiseen tarvittavan pienennystekijän arvon. Nurjahduskestävyyden laskenta vaiheet (Kaavat 45–49) ovat eriteltyinä laskenta-avaojen selkolukemisen edistämiseksi.

Pilarin nurjahduskestävyyden laskenta		Nurjahduskestävyys: 1993-1-1 s. 61-63		ym 1993-1-1 s. 48		© arvot: 1990 s. 86	
Muovaus:	Kylmä	Nurjahdus akseli:	y	Kuorma yhdistelmien α arvot:	Luokka E vaurastottimat		
Osavarmuus kerroin γ_{M0} :	1.0	Nurjahduspituus L_{cr} (mm):	2500	Kuormien yhdistely kerroin α_1 :	0.3		
Osavarmuus kerroin γ_{M1} :	1	Muunnettu hoikkuus I_y :	0.45	Kuormien yhdistely kerroin α_2 :	0.80		
Materiaalin muutoskerroin:	76.4	PL1 Pienennystekijä α :	0.340	Nurjahduskäyrä:	a		
PL1 Apuvuore α :	0.63			Epätarkkuustekijä (α):	0.21		

Kuva 24 Nurjahduspitäen laskenta

H on pilarin korkeus

Nurjahduspituus:

$$Lcr = H * \gamma \quad (45)$$

Materiaalin muunnoskerroin (SFS EN 1993-1-1, 64):

$$\lambda = \pi * \sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (46)$$

Muunnettu hoikkuus PL1 (SFS EN 1993-1-1, 64):

$$\lambda_1 = \frac{Lcr}{i} * \frac{1}{\lambda} \quad (47)$$

Taulukko 6.2: Nurjahduskäyrän valinta poikkileikkauksesta riippuen

Poikkileikkaus	Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
 Valssau profiilit	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$ $y-y$ $z-z$ $y-y$ $z-z$ $y-y$ $z-z$	a b	a ₀ a ₀
			b c	a a
			b c	a a
			d d	c c
 Hitsaut I-profiilit	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $t_f > 40 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$ $y-y$ $z-z$	b c	b c
			c d	c d
 Rakennepi- ket	Kuumamuovattu	Kaikki	a	a ₀
	Kylmämuovattu	Kaikki	c	c
 Hitsaut koo- profiilit	Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	b
	Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	c
 U-, T- ja un- profiilit		Kaikki	c	c
 L-eräkkeet		Kaikki	b	b

Kuva 25 Nurjahduskäyrän valinta (SFS EN 1993-1-1, 63)

Taulukko 6.1: Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät

Nurjahduskäyrä	a ₀	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Kuva 26 Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät (SFS EN 1993-1-1, 62)

Apusuure PL1 (SFS EN 1993-1-1, 61):

$$\phi = 0.5 * (1 + \alpha * (\lambda 1 - 0.2) + \lambda 1^2) \quad (48)$$

Pienennystekijä (SFS EN 1993-1-1, 61):

$$\chi = \frac{1}{\phi + (\sqrt{\phi^2 - \lambda^2})} \quad (49)$$

6.8 Yhteenveto

Tulokset palkin sekä pilarin laskennasta on sijoitettu kauemmas laskentakaavasta omalle alueelleen laskentaohjelmassa sen selkolukemisen vuoksi (Kuvat 27–28). Yhteenvedon tarkoituksena on arvioida, että kestääkö rakenne siihen kohdistuvia kuormia lasketuilla kuormituskestävyyden arvoilla (Kaavat 50–56) ennen palotilannemitoituksen aloittamista.

Yhteenveto	Leikkauskestävyys 1993-1-1 s.54	Taivutusmomentti 1993-1-1 s.53
Käyttöaste leikkaus:	2.6%	Käyttöaste taipuma: 18.2%
Palkin leikkauskestävyys (kN):	1175.4	Taivutus kestävyys (kN*m): 308.80

Kuva 27 Yhteenveto palkille

Käyttöaste taiputus:

$$\frac{W_{vaadittu}}{W_y} \quad (50)$$

Käyttöaste taipuma:

$$\frac{\sigma_{yhd}}{\sigma_{sallittu}} \quad (51)$$

Käyttöaste leikkaus:

$$\frac{V_{edmax}}{V_{ed}} \quad (52)$$

Palkin leikkauskestävyys (SFS EN 1993-1-1 s.54):

$$V_{ed} = A_v * \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{m0}} \quad (52)$$

Palkin taivutus kestävyys (SFS-EN 1993-1-1 s.53):

$$\frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{m0}} \quad (53)$$

Puristus 1993-1-1 s.53	Nurjahduskestävyys 1993-1-1 s.61	Leikkaus 1993-1-1 s.54
Pilarin käyttöaste: 6.2%	Nurjahduskestävyys Nb,Rd (kN): 5308	
Puristus kestävyys (kN): 5645	Leikkaus kestävyys (kN): 1175	

Kuva 28 Yhteenveto pilarille

Pilarin nurjahduskestävyys (SFS EN 1993-1-1 s.61):

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{m1}} \quad (54)$$

Pilarin puristuskestävyys (SFS EN 1993-1-1 s.53):

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{m0}} \quad (55)$$

Pilarin taivutus kestävyys (SFS-EN 1993-1-1 s.53)

$$\frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{m0}} \quad (56)$$

7 Palotilannemitoitus

7.1 Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötila

Kun poikkileikkauksessa on tasainen lämpötilan jakauma, suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan nousu lasketaan kaavasta 57. Lämpötila-välilehdellä (Kuva 29) Am/V-solussa laskentaohjelma laskee valitun profiilin poikkileikkausluvun, johon tarvittavat arvot on syötetty profiili arkistoon. Taulukko Am/V luku solua voidaan käyttää profiilista lasketun sijaan, jos profiili ei ole alttiina palolle kaikista suunnista, aiheesta kerrotaan tarkemmin opinnäytetyön kappaleessa 5.3. Lämpötilan muutos lasketaan 5:n sekunnin ajanjaksoissa iteroimalla. Tämä johtaa siihen, että taulukossa on 1500 riviä laskutoimituksia, kun maksimi kohde aika on 120 minuuttia. Paloaika R solu toimii haku toimintona, jotta suunnittelijan ei tarvitse itse manuaalisesti etsiä haluttua ajanjaksoa vastaavaa teräksen lämpötilaa taulukosta. Kyseisestä lämpötila taulukosta on luotu myös kopio sen oikealle puolelle, tässä laskenta taulukossa kaava on sama, mutta palotilanteen aika ja teräksen lämpötila sarakkeet vaihtavat paikkaa keskenään. Tämä auttaa suunnittelijaa niin, että kun lasketaan rakenteen kriittistä lämpötilaa (°C) laskentaohjelma pystyy kertomaan suunnittelijalle mitä aikaa tämä lämpötila edustaa. Kuvan 29 laskentaohjelman sisälle ohjelmoidut kaavat ovat esitettyinä kaavoissa 57–67.

Teräksen lämpötilan kehittyminen								Suojaamaton sisällä oleva teräsrakenne															
1993-1-2 s.35								ca 1993-1-2 s.24															
Profiili:	HEA300							lämmönsiirtokerroin	25							pinnan säteilykerroin	0.8						
Profiili Am/V-luku:	152.9							Varjostustekijä	0.40							tiheys	7850						
Taulukko Am/V-luku:								Varma varjostus								stefan bolzman	5,67E-08						
Paloaika R (min):	15.00							Teräksen lämpötila °C:	462.70														

(min)	Teräs C θm1	Ominais lämpö c	Palotilan C θg1	net c	net r	hnet	ΔC	Teräs C (min)	ca	gl	net c	net r	hnet	ΔC	
0.1	20	439.8	96.5	1913.4	5.12E+02	2.43E+03	0.22	20	0.1	439.8	96.5	1913.4	5.12E+02	2.43E+03	0.22
0.2	20.22	440.0	147.0	3168.4	1.08E+03	4.24E+03	0.38	20.22	0.2	440.0	147.0	3168.4	1.08E+03	4.24E+03	0.38
0.3	20.60	440.2	184.6	4100.3	1.65E+03	5.75E+03	0.51	20.60	0.3	440.2	184.6	4100.3	1.65E+03	5.75E+03	0.51
0.3	21.11	440.6	214.7	4839.1	2.23E+03	7.07E+03	0.63	21.11	0.3	440.6	214.7	4839.1	2.23E+03	7.07E+03	0.63
0.4	21.74	441.0	239.7	5449.1	2.79E+03	8.24E+03	0.73	21.74	0.4	441.0	239.7	5449.1	2.79E+03	8.24E+03	0.73
0.5	22.48	441.5	261.1	5967.7	3.35E+03	9.31E+03	0.83	22.48	0.5	441.5	261.1	5967.7	3.35E+03	9.31E+03	0.83
0.6	23.31	442.1	279.9	6414.8	3.89E+03	1.03E+04	0.92	23.31	0.6	442.1	279.9	6414.8	3.89E+03	1.03E+04	0.92
0.7	24.22	442.8	296.6	6808.5	4.42E+03	1.12E+04	1.00	24.22	0.7	442.8	296.6	6808.5	4.42E+03	1.12E+04	1.00
0.8	25.22	443.5	311.6	7158.5	4.94E+03	1.21E+04	1.07	25.22	0.8	443.5	311.6	7158.5	4.94E+03	1.21E+04	1.07
0.8	26.29	444.2	325.2	7472.4	5.44E+03	1.29E+04	1.14	26.29	0.8	444.2	325.2	7472.4	5.44E+03	1.29E+04	1.14
0.9	27.44	445.0	337.7	7756.2	5.94E+03	1.37E+04	1.21	27.44	0.9	445.0	337.7	7756.2	5.94E+03	1.37E+04	1.21
1.0	28.65	445.8	349.2	8014.2	6.42E+03	1.44E+04	1.27	28.65	1.0	445.8	349.2	8014.2	6.42E+03	1.44E+04	1.27
1.1	29.92	446.7	359.9	8250.0	6.90E+03	1.51E+04	1.33	29.92	1.1	446.7	359.9	8250.0	6.90E+03	1.51E+04	1.33
1.2	31.25	447.6	369.9	8466.5	7.36E+03	1.58E+04	1.39	31.25	1.2	447.6	369.9	8466.5	7.36E+03	1.58E+04	1.39
1.3	32.64	448.5	379.3	8665.9	7.82E+03	1.65E+04	1.45	32.64	1.3	448.5	379.3	8665.9	7.82E+03	1.65E+04	1.45
1.3	34.09	449.5	388.1	8850.2	8.26E+03	1.71E+04	1.50	34.09	1.3	449.5	388.1	8850.2	8.26E+03	1.71E+04	1.50
1.4	35.59	450.5	396.4	9020.9	8.70E+03	1.77E+04	1.55	35.59	1.4	450.5	396.4	9020.9	8.70E+03	1.77E+04	1.55
1.5	37.13	451.5	404.3	9179.4	9.13E+03	1.83E+04	1.59	37.13	1.5	451.5	404.3	9179.4	9.13E+03	1.83E+04	1.59
1.6	38.73	452.5	411.8	9326.9	9.55E+03	1.89E+04	1.64	38.73	1.6	452.5	411.8	9326.9	9.55E+03	1.89E+04	1.64
1.7	40.37	453.6	418.9	9464.3	9.96E+03	1.94E+04	1.68	40.37	1.7	453.6	418.9	9464.3	9.96E+03	1.94E+04	1.68
1.8	42.05	454.7	425.8	9592.5	1.04E+04	2.00E+04	1.73	42.05	1.8	454.7	425.8	9592.5	1.04E+04	2.00E+04	1.73
1.8	43.78	455.8	432.3	9712.2	1.08E+04	2.05E+04	1.77	43.78	1.8	455.8	432.3	9712.2	1.08E+04	2.05E+04	1.77
1.9	45.55	456.9	438.5	9824.1	1.12E+04	2.10E+04	1.81	45.55	1.9	456.9	438.5	9824.1	1.12E+04	2.10E+04	1.81
2.0	47.36	458.0	444.5	9928.0	1.16E+04	2.15E+04	1.84	47.36	2.0	458.0	444.5	9928.0	1.16E+04	2.15E+04	1.84

Kuva 29 Teräksen lämpötilan mitoitus

Teräsrakenteen lämpötilan muutos (1993-1-2, 35):

$$\Delta\theta_{a,t} = ksh * \frac{Am}{ca * pa} * h_{net} * \Delta t \quad (57)$$

missä:

ksh on varjostusvaikutuksen korjaustekijä, varmuuden saavuttamiseksi voidaan käyttää kerrointa 1.

Am/V on suojaamattoman terässauvan poikkileikkaustekijä (1/m)

Am on sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti (m^2/m)

V on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti (m^3/m)

ca on teräksen ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)

h_{net} on pinta-alan yksikköä kohti laskettu nettolämpövuoto (W/m^2)

Δt on aikaväli (s), saa olla korkeintaan 5 sekuntia.

pa on teräksen tiheys (kg/m^3)

Poikkileikkaustekijä (1993-1-1, 54):

$$\frac{Am}{V} \quad (58)$$

Varjostusvaikutus I-profiileille (1993-1-2, 35):

$$0.9 * \frac{\frac{Am}{V} b}{\frac{Am}{V}} \quad (59)$$

Varjostusvaikutus muut profiilit:

$$\frac{\frac{Am}{V} b}{\frac{Am}{V}} \quad (60)$$

Ominaislämpökapasiteetti (1993-1-2, 24)

- kun $20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$:

$$ca = 425 + 7.73 * 10^{-1} * \theta_a - 1.69 * 10^{-3} * \theta_a^2 + 2.22 * 10^{-6} * \theta_a^3 \quad (61)$$

- kun $600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$:

$$ca = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (62)$$

- kun $735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$:

$$ca = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (63)$$

- kun $900\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$ca = 650 \quad (64)$$

θ_a on teräksen lämpötila

Nettolämpövuoto (1991-1-2, 38)

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad (65)$$

Kuljettumalla tapahtuva lämmön siirtyminen:

$$h_{net,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m) \quad (66)$$

missä:

α_c on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin (25 W/m²K)

θ_g on kaasun lämpötila palolle altistetun rakenneosan lähellä, Standardipalo käyrä (°C)

θ_m on rakenneosan lämpötila (°C)

Säteilemällä tapahtuva lämmön siirtyminen:

$$h_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (67)$$

missä:

Φ on näkyvyyskerroin

ε_m on rakenneosan pinnan säteilykerroin

ε_f on palon säteilykerroin

σ on Stefan-Boltzmann-vakio (5.67*10⁻¹⁸ W/m²K⁴)

θ_r on paloympäristön tehollinen säteilylämpötila (°C)

θ_m on rakenneosan pintalämpötila (°C)

7.2 Palkin palomitoitus

Palkin kriittisen lämpötilan laskennassa (Kuva 30) laskentaohjelma olettaa, että lämpötilajakauma on tasainen ja ettei stabiiliutta tarvitse ottaa huomioon, tämä soveltuu palkeille, joilla kiepahdus ei ole potentiaalinen murtumismuoto. Edellä esitetystä teräksen lämpötilan

γ_G on pysyvien kuormien osavarmuusluku

γ on muuttuvan kuorman 1 osavarmuusluku

ψ_{fi} on kuormien yhdistelykerroin standardi 1991-1-2

7.3 Pilarin palomitoitus

Pilarin kriittisen lämpötilan laskennassa (Kuva 31) oletetaan myös, että lämpöjakauma on tasainen. Laskenta myös olettaa, että nurjahdus saattaa tapahtua, joten yksinkertaistettua laskentakaavaa ei saa käyttää. Syöttämällä lämpöasteen valkoisella reunavärillä ympäröityyn soluun laskentaohjelma etsii tätä lämpötilaa vastaavat myötölujuuden ja kimmokertoimen arvot ja laskevat pilarille palotilannetta vastaavan nurjahduskestävyyden. Laskenta tapahtuu siis iteroimalla, eli arvaamalla teräksen lämpötila, laskentaohjelma laskee pilarin nurjahduskestävyyden ja se pitää saada mahdollisimman lähelle kuormia eli käyttöaste 1:stä. Nurjahduskestävyyden laskenta on esitetty kaavoissa 73–77.

Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden arvo palotilanteessa (1993-1-2, 28):

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} * A * k_{y,\theta} * f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (73)$$

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä palomitoitustilanteessa:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \lambda_{\theta}^2}} \quad (74)$$

missä:

$$\phi_{\theta} = \frac{1}{2} * (1 + \alpha * \lambda_{\theta} + \lambda_{\theta}^2) \quad (75)$$

ja

$$\alpha = 0.65 * \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (76)$$

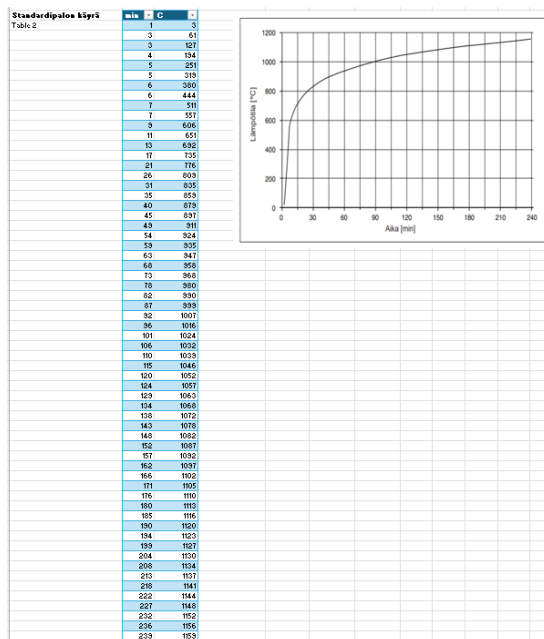
Muunnettu hoikkuus λ_{θ} lämpötilassa θ_a

$$\lambda_{\theta} = \lambda * \left(\frac{k_{y\theta}}{k_{E\theta}} \right)^{0.5} \quad (77)$$

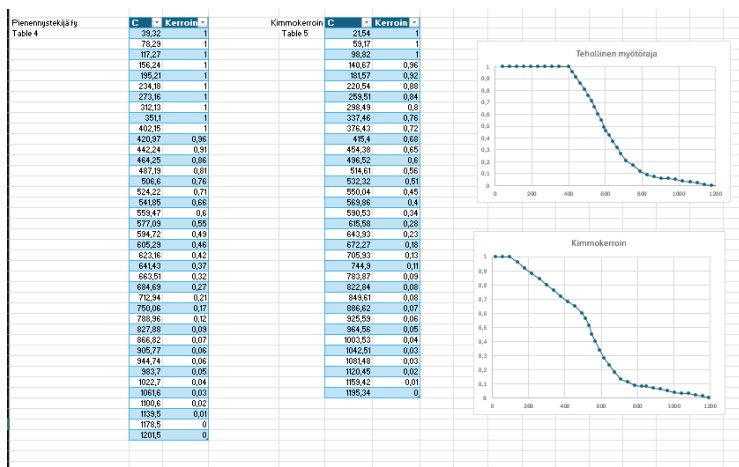
missä:

8 Taulukot

Laskentaohjelmassa on oma välilehti laskentaan tarvittaville taulukoille. Taulukoiden x- ja y-koordinaatit ovat luotu verkkoselaimessa toimivan automeris-työkalun avulla. Kuvan 32 standardipalo käyrän taulukkoa laskentaohjelma käyttää rakenneosan lähellä ympäröivän kaasun lämpötilan määrittämiseen. Kuvan 33 taulukoita käytetään palotilanteessa olevan rakenteen myötölujuuden ja kimmokertoimen laskemiseen, jotka vaikuttavat suuresti rakenteen kestävytyteen.



Kuva 32 Standardipalon käyrä Excelissä



Kuva 33 Myötölujuuden ja kimmokertoimen muutos taulukot Excelissä

9 Uuden teräsprofiilin luominen laskentaohjelmaan

Teräsrakenteen profiilin muoto vaikuttaa suuresti sen kantavuuteen eri tilanteissa. Tästä syystä laskentaohjelmaan tarvitaan useita eri poikkileikkauksien tietoja, joita on vaivallista täyttää ja etsiä joka kerta uudelleen. Siksi työn laskentaohjelmassa on oma välilehti (Kuva 34), jota käyttämällä suunnittelija pystyy lisäämään uuden profiilin helposti ja vaihtamaan aiemmin lisättyjä profiileja pudotusvalikosta laskentaohjelmaan. Lisättyjen profiilien tiedot säilyvät omalla välilehdellään ja laskentaohjelman kaavat etsivät tarvittavat tiedot ennalta määrätystä sarakkeista VLOOKUP funktion avulla laskentakaavoihin. Submit-näppäintä painamalla soluun liitetty makro kopioi kuvan 34 soluihin kirjoitetut arvot ja siirtää ne Profiilit-välilehdelle (Kuva 35). Profiilit-välilehdelle kopioidut arvot on ohjelmoitu taulukko muotoon auttamaan käyttäjää lukemaan laskentaohjelmaan kirjoitettuja kaavoja siten että arvojen lähdetieto Excelissä ei näy kirjain – luku koordinaattina, vaan sitä kutsutaan nimellä Table1.

Section Properties
PREMEKON

Profiili: <input style="width: 100%;" type="text"/>	G (kg/m): <input style="width: 100%;" type="text"/>
h (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>	b (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>
tf (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>	tw (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>
r1 (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>	d (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>
A (mm ²): <input style="width: 100%;" type="text"/>	AL e+6(mm ²): <input style="width: 100%;" type="text"/>
Iy (mm ⁴): <input style="width: 100%;" type="text"/>	Iz (mm ⁴): <input style="width: 100%;" type="text"/>
Wy,el (mm ³): <input style="width: 100%;" type="text"/>	Wz,el (mm ³): <input style="width: 100%;" type="text"/>
Wy,pl (mm ³): <input style="width: 100%;" type="text"/>	Wz,pl (mm ³): <input style="width: 100%;" type="text"/>
iy (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>	iz (mm): <input style="width: 100%;" type="text"/>
Sy (mm ³): <input style="width: 100%;" type="text"/>	Sz (mm ³): <input style="width: 100%;" type="text"/>

Kuva 34 Profiilin ominaisuudet

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
2		Profiili	G	h	b	tf	tw	r1	d	A	AL	ly	lz	Wy	Wz	Wy.p	Wz.p	iy	iz	Sy	Sz	
3		SHS 160x160x5	24.1	160	160	5	5	7.5	145	3070	627000	12200000	12200000	153000	153000	178000	178000	63.1	63.1	89000.00	89000	
4		SHS 150x150x5	22.6	150	150	5	5	7.5	135	2870	587000	10000000	10000000	134000	134000	156000	1560000	59	59	78000.00	78000	
5		HEA400	125	390	300	19	11	27	298	15900	1910000	4.51E+08	85600000	2310000	5710000	25600000	873000	168.4	73.4	1280000.00	436000	
6		SHS220x220x12.5	47.7	220	220	12.5	12.5	18.75	182.5	10200	848000	37100000	37100000	371000	371000	436000	4360000	109.7	65	460000.00	215000	
7		HEA260	68.2	250	260	12.5	7.5	24	177	8682	1480000	1.04E+08	36700000	836000	282000	920000	430000	109.7	65	460000.00	215000	
8		HEB280	103	280	280	18	10.5	24	196	13100	1620000	1.93E+08	65900000	1380000	471000	1530000	714000	121	70.8	767000.00	357000	
9		HEB360	142	360	300	22.5	12.5	27	261	1.81E+04	1.85E+06	4.32E+08	1.01E+08	2.40E+06	6.76E+05	2.68E+06	1.03E+06	155	74.9	1340000.00	514000	
10		IPF600	122	600	220	19	12	24	514	15600	2010000	9.21E+08	33900000	3070000	308000	3510000	486000	243	46.6	1.76E+6	2.43E+5	
11		SHS 200x200x8	47.7	200	200	8	8	12	176	6080	779000	37100000	37100000	371000	371000	436000	436000	78.1	78.1	218000.00	218000	
12		SHS180x180x5	27.3	180	180	5	5	7.5	165	3470	700000	17600000	17600000	196000	196000	227000	227000	71.3	71.3	114000.00	114000	
13		UPE160	17	160	70	9.5	5.5	12	117	2170	578700	9110000	1070000	114000	22600	132000	41500	64.8	22.2	65800.00		
14		UPE400	72.2	400	115		13.5	18	328	9190	1217500	2.1E+08	10400000	1050000	123000	1260000	191000	151.1	33.7	630000.00		
15																						

Kuva 35 Table1 Profiilit-välilehdellä

VLOOKUP funktio

Kuvan 36 esimerkissä esitetään kyseinen funktio, koska opinnäytetyön laskentakaavoissa käytetään usein teräsprofiilista riippuvaisia arvoja, joita ei tarvitse Profiilit-välilehdellä olevan taulukon avulla syöttää laskentaohjelmaan kuin kerran, jonka jälkeen profiilin arvot pysyvät Excelissä omalla välilehdellä ja suunnittelija pystyy vaihtamaan niitä helposti VLOOKUP-funktion avulla. Kuvassa 35 olevan taulukon yläpuolelle on asetettu juokseva numerosarja, jonka tarkoitus on auttaa suunnittelijaa lukemaan funktiota. VLOOKUP-funktion haku sarake on aina taulukon ensimmäinen rivi, kuvan 35 taulukosta näkee, että taulukossa on 19 lukuarvoa, joista jokaista voidaan käyttää lujuusopillisissa funktioissa samaa Excel-funktiota käyttäen.

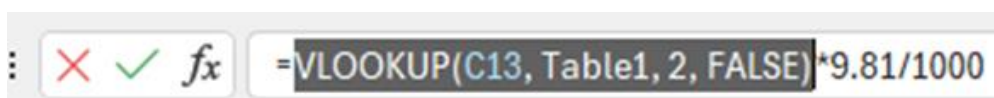
C13 = Solu, jonka arvoja etsitään (palkin profiili tai pilarin profiili, alasettovalikko)

Table1 = Kuva 35

2 = Rivi numero syötetylle lukuarvolle, jota kaavassa halutaan käyttää (kuvassa numero 2 on palkin paino kg/m)

FALSE = Tarkka arvo

TRUE = Epätarkka arvo (Käytetään myöhemmin, kun haetaan annettua lukua kaaviosta)



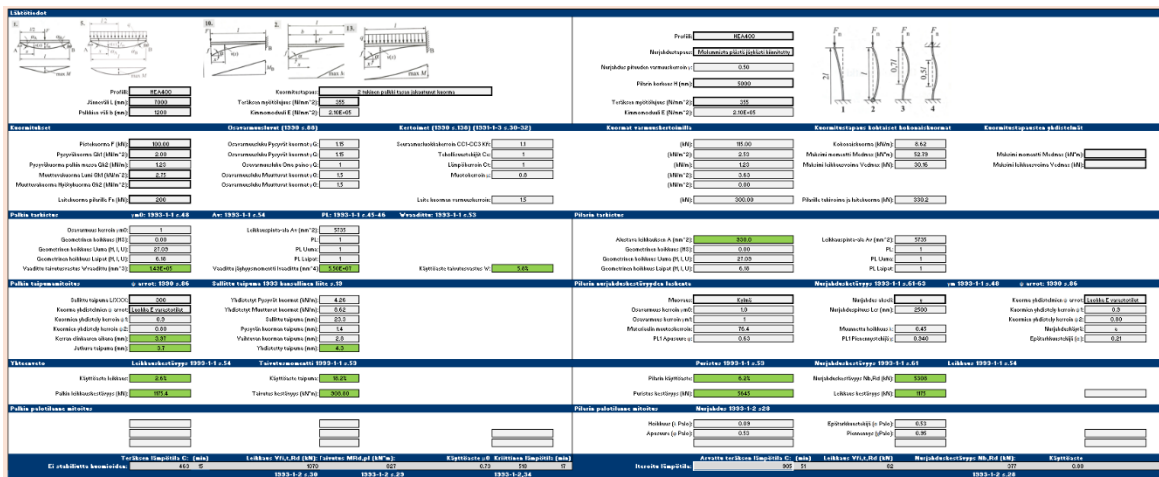
Kuva 36 VLOOKUP funktion esimerkki

10 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön päätavoitteena oli kehittää Premekon Oy:lle Excel-pohjainen laskentaohjelma, joka noudattaa Eurokoodin ja Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisia ohjeita. Tavoitteena oli sekä tiivistää palosuunnittelun keskeiset määräykset ja periaatteet siten, että niistä saadaan suunnittelijoille käytännöllinen työkalu kriittisen lämpötilan ja kantokyvyn laskentaan palotilanteessa.

Alkuvaiheen vaatimus- ja taustaselvityksenä käytettiin pohjana LAB- ammattikorkeakoulun ”Teräsrakenteiden perusteet” -kurssia sekä Eurokoodi 3 -oppikirjoja, jotka tarjosivat vahvan pohjan laskentakaavojen, standardien ja rakenteiden ymmärtämiseen. Työn alkuvaiheessa havaittiin, kuinka usein laskentakaavoissa käytettiin teräsrakenteen muodon mukaan vaihtuvia poikkileikkausarvoja. Näiden arvojen erilliset kirjoitussolut veisivät sekä tilaa ja että hidastaisi vertailua. Tämän havainnon pohjalta syntyi visio tämänhetkisestä laskentamallista (Kuva 37), jossa käytettävät teräsprofiilit tallennetaan erilliselle välilehdelle. Tämä mahdollistaa nopean ja selkeän profiilien vertailun muutamalla hiiren painalluksella. Laskentaohjelman edistyessä nousi tärkeäksi osaksi myös selkolukisuuden korostaminen, kuten yleisilme ja laskentakaavojen ymmärtäminen. Opinnäytetyön lopputuloksena on monikäyttöinen ja käyttäjäystävällinen laskentaohjelma, josta on luotu toimeksiantajan mielestä myös selkeät käyttöohjeet.

Jatkokehittämissuunnitelmista tärkeimpänä on laskentaohjelman testaus monipuolisesti valmiiksi lasketuissa tapauksissa. Selkolukisuuden korostamiseksi olisi myös käytännöllistä eristää palkin ja pilarin laskentaohjelmat omille välilehdilleen. Laskentaohjelman laajennus eri poikkileikkausluokkiin laajentaisi työkalun soveltuvuutta kaikkiin teräsrakenteisiin. Käyttäjäpalautteen kerääminen olisi myös hyödyllinen tapa varmistamaan Excel-työkalun pysymisen ajanmukaisena tulevaisuudessa.



Kuva 37 Laskentaohjelman kokonaiskuva

Lähteet

BE Group. Teräsrakentajan käsikirja. Viitattu 2.2.2025. Saatavissa <https://www.begroup.fi/be-group/lataa/esitteet-ehdot-ja-lomakkeet>

Iso-Mustajärvi, P., Inha, T. 1999. Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus. Tampere: Rakennustieto Oy.

Kaitila, O. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

Kouhi, J. 2014. Eurocode 3 Teräsrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

Pelastuslaki 379/2011

Rakentamislaki 751/2023

Rakennustieto. RT RakMK-21745 – Teräsrakenteet, ohjeet 2017. Viitattu 15.1.2025. Saatavissa <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20RakMK-21745>

SFS EN 1990+A1+AC. 2006. Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS EN 1991-1-1+AC. 2002. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS EN 1991-1-2+AC. 2003. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–2: Yleiset palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS EN 1993-1-1. 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

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

Suomen Rakentamismääräyskokoelma. 2019. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. Rakentaminen. Viitattu 15.1.2025. Saatavissa <https://sfs.fi/osallistu-ja-vaikuta/aihealueet/rakentaminen/>

Suomen Standardisoimisliitto SFS. Standardi, sertifikaatti ja CE-merkintä. Viitattu 17.1.2025. Saatavissa <https://sfs.fi/standardi-sertifikaatti-ja-ce-merkinta/>

Teräsrakenneyhdistys. Palosuojaus- ja pintakäsittely. Viitattu 15.1.2025 Saatavilla rajoitustusti. <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/toiminta-julkaisut/patevyydet/palosuojaus-ja-pintakasittely/>

Valtanen, E. 2019. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

Ympäristöministeriö. Maankäyttö- ja rakennuslaki. Viitattu 2.2.2025. Saatavissa <https://ym.fi/maankaytto-ja-rakennuslaki>