

Aleksi Tapaninen

# Teräsrakenteen lämpötilan kehitys standardi- ja hiilivetyalotilanteessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

31.8.2016

Tekijä(t) Otsikko  Sivumäärä Aika	Aleksi Tapaninen Teräsrakenteen lämpötilan kehitys standardi- ja hiilivetypalotilanteessa  31 sivua + 1 liitettä 31.8.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Aarne Seppänen Osastopäällikkö Pekka Toivanen Yksikön johtaja Juha-Matti Savolainen
<p>Insinööritö tehtiin Swecolle ratkaisuksi osaston huomaamaan puutteeseen palomitoituksen yhteydessä. Työssä perehdyttiin teräsrakenteen lämpötilan kehitykseen standardi- ja hiilivetypalotilanteessa ja laadittiin Excel-pohjainen laskentatyökalu tämän laskemista helpottamaan ja nopeuttamaan. Lähteinä työssä käytettiin internetiä, kirjallisuutta ja alan ammattilaisilta kysytyjä neuvoja.</p> <p>Laskentatyökaluun kerättiin käyttöohjetta tukemaan kuvia ja tietoja erilaisten teräsprofiilien poikkileikkausarvoista. Lisäksi ohjeesta löytyy tiedot poikkileikkaustekijän sekä muiden tarvittavien arvojen laskemiseen.</p> <p>Työn kirjalliseen raporttiin hankittiin tietoa teräsrakenteen ja palosuojausmateriaalien käyttäytymisestä erilaisissa palotilanteissa ja siitä kuinka lämpötilan kehitys saadaan laskettua SFS-EN 1993-1-2 ja SFS-EN 1363-2 mukaisesti.</p> <p>Insinööritö rajattiin käsittelemään vain teräsrakenteiden lämmönkehitystä palotilanteessa eikä siis ole sovellettavissa muihin rakenteisiin.</p>	
Avainsanat	Teräsrakenne, Lämpötilan kehitys, Standardipalo, Hiilivetypalo, Palosuojaus

Author(s) Title	Aleksi Tapaninen Steel temperature development in standard and hydrocarbon fire exposure situation.
Number of Pages Date	31 pages + 1 appendices 31.8.2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Aarne Seppänen, lecturer Pekka Toivanen, Department manager Juha-Matti Savolainen, Unit director
<p>This thesis was made for Sweco as a solution to a problem the department found with the structural fire design. The study focused on steel temperature development in standard and hydrocarbon fire exposure situations. An Excel-based calculation tool was designed to facilitate and speed up the calculation of aforementioned temperature development. The sources of information used in this study were the internet, literature, and advice asked from professionals.</p> <p>Information about various steel profiles and section factor values were collected to support the instructions of the calculation tool.</p> <p>The acquired knowledge of how steel structures and fire protection materials behave in different fire situations and how temperature development can be calculated by the SFS-EN 1993-1-2 and SFS-EN 1363-2 were used in the written report of the study.</p> <p>This thesis was restricted to only handle the temperature development of steel structures in a fire situation and therefore is not applicable to other structures.</p>	
Keywords	Steel structure, temperature development, fire, hydrocarbon

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön taustaa	1
1.2	Työn tavoitteet ja rakenne	1
1.3	Työn rajaukset	3
1.4	Tutkimusmenetelmät	3
2	Teräsrakenteen palosuojaus	4
2.1	Palosuojausperiaatteet	4
2.2	Palosuojausmateriaalit ja menetelmät	5
2.2.1	Lämmöneristäminen	5
2.2.2	Lämmönsitomiskyvyn parantaminen	8
2.2.3	Rakenteellinen palosuojaus	8
3	Paloturvallisuus	10
4	Palotilan lämmönkehitys	11
4.1	Standardipalo	13
4.2	Hiilivetyypalo	14
5	Teräsrakenteen lämpötilan kehitys	16
6	Laskentatyökalu	22
6.1	Lämpötilan kehityksen laskentatyökalun tarkoitus	22
6.2	Työkalun toimintaohjeet	22
7	Pohdintaa	29
7.1	Tulokset	29
7.2	Tulevaisuuden näkymiä	30
	Lähteet	31
	Liitteet	
	Liite 1. Laskentatyökalun lämpötila-aikakäyriä	



## Lyhenteet

EN	European Standard, eurooppalainen standardi, joka on laadittu CENissä
CEN	European Committee for Standardization (Comité Européen de Normalisation)
Eurokoodi	Rakenteiden suunnitteluohjeet, jotka julkaistaan eurooppalaisina standardeina
HC	Hydrocarbon eli hiilivety
LVIS	Lämpö, vesi, ilmanvaihto, sähkö

# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön taustaa

Opinnäytetyö tehdään Swecolle, joka on yrityksenä rakennetun ympäristön ja teollisuuden asiantuntija. Yrityksessä työskentelee yhteensä 14500 työntekijää, joiden voimin toteutuu vuosittain projekteja 70 maassa ympäri maailman. Sweco on Euroopan johtava suunnittelun ja konsultoinnin asiantuntijayritys, jonka liikevaihto on noin 1.7 miljardia euroa.

Swecon kansainvälinen teräsrakenneosaaminen kattaa talonrakentamisen, teollisuusrakentamisen, voimalaitosten, siltojen, voimajohtolinjojen, mastojen sekä muiden teräsrunkojen ja erityyppisten laitetukien, säiliöiden, siilojen ja kanavien suunnittelun. Swecon teknisen laskennan osastot vastaavat erityisen vaativista suunnittelutehtävistä, kun rakennusnormien mukaiset kapasiteetit ylittyvät käyttötavan tai kuormitusten muutosten johdosta.

Tietomallintamisen edelläkävijänä Swecolla on käytössä uusinta tekniikkaa edustavat tietomallipohjaiset suunnittelujärjestelmät rakenteiden analysointiin, optimointiin, dokumentointiin sekä aikataulujen, kustannusten ja suurten kokonaisuuksien hallintaan [4].

Suunnittelujärjestelmien määrätietoisesä kehittämisesä on käynyt osastollamme ilmi, että olisi tarvetta Excel-pohjaiselle teräsrakenteen lämpötilan nousun laskentatyökalulle kahdessa eri palotilanteessa. Palotilanteet olisivat standardipalo ja tietyntyyppisiä rakennuskohteita varten hiilivetypalotilanne. Työkalun tukimateriaaliksi tarvitaan uusinta tietoa tämän päivän palonsuojausmateriaaleista ja menetelmistä, joita tulisi suunnittelussa noudattaa.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rakenne

Opinnäytetyön tavoitteena on kerätä tietoa teräsrakenteen palonsuojausmateriaaleista ja tehdä laskuri teräsrakenteen lämpötilan kehitykselle standardi- ja hiilivetypalotilanteessa. Laskuri toteutetaan Excel-taulukkomuodossa.

Ajan riittäessä voitaisiin vielä kehittää teräsrakenteen palomitoitukselle laskentapohja, jossa lasketaan rakenteen käyttäytyminen normaalilämpötilassa ja palotilanteessa. Lisäksi kerrotaan, millä menetelmillä teräsrakennetta kannattaa lähteä suojaamaan palotilannetta varten.

Teräsrakenteen palosuojausta käsittelevässä luvussa kerrotaan yleisesti, mitä palosuojauksella tarkoitetaan ja missä tapauksissa se on suositeltavaa tehdä. Myös palosuojauksen periaatteet käydään läpi ja suojausmateriaalit jaotellaan ryhmiin näiden perusteella. Tämän jälkeen syvennyttään palosuojamateriaalien yleispiirteisiin ja ominaisuuksiin.

Paloturvallisuutta käsittelevässä luvussa on otettu Maankäyttö- ja rakennuslaista asiasta kertova pykälä 117 b § (21.12.2012/958).

Palotilan lämmönkehityksestä kertovassa luvussa vertaillaan standardi- ja hiilivetypalotilannetta sekä kerrotaan toiminnallisen ja nimellisen palomitoituksen eroista. Havainnollistamaan on kerätty kuvia, joissa näkyy erilaisia aiheeseen liittyviä käyröjä ja niiden selityksiä.

Teräsrakenteen lämpötilan kehitystä käsittelevässä luvussa kerrotaan, kuinka lämpö siirtyy palotilasta rakenteeseen ja mitä laskennassa on otettava huomioon. Tässä luvussa on myös ohjeet lämpötilan kehityksen laskentaan, joiden pohjalta on myös Excel-pohjainen laskentatyökalu laadittu.

Laskentatyökalun tarkoitus ja toimintaohjeet on kerrottu seuraavassa luvussa, josta on myös pieniä muutoksia lukuun ottamatta siirretty käyttöohje laskentatyökaluun.

Viimeisenä on vielä kerätty yhteenveto työstä ja sen tuloksista sekä laskentatyökalun lämpötila-aikakäyriä liitteenä 1.

### 1.3 Työn rajaukset

Työssä keskitytään vain teräsrakenteiden käyttäytymiseen palotilanteessa, joten työn tuloksia ei voida soveltaa muiden materiaalien lämpötilan kehityksen tarkasteluun. Työssä käydään myös läpi teräsrakenteen palosuojausmateriaalit ja -menetelmät.

### 1.4 Tutkimusmenetelmät

Työssä käytetään tutkimismenetelmänä erilaisia kirjallisia lähteitä, joihin lukeutuu muun muassa eurokoodit ja muut laskentaohjeet sekä teräs- ja palosuojustuotteiden valmistajien sivuilta hankittu materiaali.

Laskentatyökalua laadittaessa käytetään vertailuna muita teräsrakenteiden lämpötilan kehitykseen ja palomitoitukseen tarkoitettuja ohjelmia. Kyseistä vertailumenetelmää sovelletaan, jotta päästäisiin mahdollisimman tarkkaan ja helppokäyttöiseen lopputulokseen.

Lisäksi käytetään alan ammattilaisilta haastattelemalla saatua tietoa ja mielipiteitä työkalun toimivuutta ja muotoilua koskevissa seikoissa sekä tietenkin apuna mahdollisesti esiintyvien ongelmien ratkaisemisessa.

## 2 Teräsrakenteen palosuojaus

Teräsrakenteet on usein suojattava palotilanteessa lämpötilan nousun hidastamiseksi. Palosuojauksetapa ja -materiaalit on olemassa useita erilaisia kohteesta ja suojattavan rakenteen profiilista, vaaditusta palonkestosta sekä tietenkin suojattavan kustannuksista riippuen. Menetelmissä tarkoituksena on pyrkiä eristämään lämpö teräsrakenteesta tai parantaa rakenteen lämmönvaraamiskykyä. On myös mahdollista vaikuttaa palonkestävyyssajaan rakenteellisilla ratkaisuilla. Palotilanteessa teräsrakenteen lämpötila nousee palotilan savukaasujen lämpötilan mukana. Teräksen lämpötilan noustessa muuttuvat sen lujuus ja muodonmuutosominaisuudet.

### 2.1 Palosuojausperiaatteet

Teräsrakennetta eristettäessä pyritään paljas teräspinta peittämään materiaalilla, joka hidastaa palotilan lämmön suoraa siirtymistä teräsrakenteeseen. Eristys voidaan tehdä palosuojalevytyksellä tai muuraamalla, jotka kuuluvat niin kutsuttuihin kuiviin menetelmiin tai vaihtoehtoisesti palosuojamaalilla, -rappauksella, -ruiskutteella tahi betonilla, jotka lukeutuvat märkiin palosuojausmenetelmiin. Tärkeää eristetyssä rakenteessa on, että se saavuttaa kriittisen lämpötilansa myöhemmin, kuin palosuojamaton rakenne ja täten kestää palotilanteessa pidempään.

Lämmönvaraamiskyvyn nostaminen taas voidaan toteuttaa hyvin putkiprofiileja käytettäessä, jolloin teräsosan ulkonäkö ja mitat pysyvät muuttumattomina. Erilaiset rakenneputken täyttömenetelmät parantavat huomattavasti osan palonkestoajaa teräkseen kohdistuvan lämmön siirtyessä rakenteen täytettyyn sisäosaan.

Palosuojaukseen voidaan vaikuttaa myös rakenteellisin keinoin, joilla tarkoitetaan oikeita teräsprofiilivalintoja sekä ratkaisuja, joissa teräsrakenteet sijoitellaan mahdollisimman kauas palotilasta. Mahdollisuutena on myös pienentää teräsprofiilin palolle altista pintaa sijoittamalla se osittain tai kokonaan valmiiksi paloa kestävän rakenteen sisään [1].

## 2.2 Palosuojausmateriaalit ja menetelmät

Taulukko 1. Palosuojausperiaatteet.

Palosuojaus periaate	Palosuojaus menetelmä
Lämmöneristäminen	eristelevyt palosuojamaalit ruiskutettavat eristeet
Lämmönsitomiskyvyn parantaminen	betonitäyttö vesitäyttö sprinklaus
Rakenteellinen palosuojaus	alaslasketut katot pilareiden sijoittaminen palotilan ulkopuolelle pilareiden sijoittaminen seinän sisään

### 2.2.1 Lämmöneristäminen

Palosuojaus eristämällä voidaan toteuttaa ruiskutettavilla materiaaleilla tai levyrakenteilla. Suojausmateriaalin lämmönjohtavuus on otettava huomioon teräsrakenteen lämpötilaa laskettaessa. Seuraavaksi kuvataan palosuojamateriaaleja ja niiden soveltumista teräsrakenteen suojaukseen.

#### *Mineraalivillalevy*

Mineraalivillalevyt ovat lämmöneristämiseen tehokkaita ja hyvin soveltuvia, jos niiden sintraantumislämpötila on tarpeeksi korkea eli noin 800–1100 °C. Kivivillaeristeiden palosuojausominaisuudet vaihtelevat levyn paksuuden ja materiaalin tiheyden mukaisesti. Yleensä tiheämpi materiaali tarkoittaa pidempää palonkestoaikaa. Käytettävien levyjen paksuus on yleisesti 10–120 mm väliltä ja tiheys 100–400 kg/m<sup>3</sup>. Levyjä on helppo käsitellä ja kätevä asentaa mekaanisilla kiinnikkeillä tai liimaamalla. Kiinnikkeinä käytetään teräsrakenteeseen hitsattavia teräspiikkejä tai ammuttavia nautoja. Edellä mainittuihin kiinnikkeisiin levyt kiinnitetään läpi painamalla ja asentamalla lukituslevyt.

### *Vermikuliittilevy*

Vermikuliittilevyt valmistetaan paisutetusta kiilteestä ja silikaattipitoisesta materiaalista kuten sementistä. Vermikuliittilevyn tiheys on noin 350–500 kg/m<sup>3</sup> ja paksuus 16–80 mm. Myös tiheämpiä levyjä voidaan puristaa halutuksi muotokappaleeksi muotilla. Tulipalon alkuvaiheen lämpöenergia kuluu levyn sisältämän veden höyrystämiseen, joten levyjen palosuojakestävyys perustuukin suureen levyssä olevaan vesimäärään sekä lämmöneristämiskykyyn myös korkeissa lämpötiloissa. Levyt kiinnitetään suojattavan teräsrakenteen ympärille koteloksi lämpöä kestävän laastin ja naulojen tai ruuvien avulla. Suojakotelon ja putken väliin on jätettävä noin 3 mm ilmarako. Myös liimausta suoraa teräsrakenteeseen voidaan käyttää kiinnityksessä.

### *Kipsilevy*

Kipsilevyä käytettäessä saadaan hyvät palosuojausominaisuudet sen sisältämän suuren kidevesimäärän höyrystyessä. Höyrystymisen aikana teräsrakenteen lämpötila ei nouse yli 100 °C. Vahvistamaton kipsilevy rikkoutuu vasta kideveden haihduttua. Palosuojaukseen soveltuvat parhaiten 13 tai 15 mm paksuisia levyjä joiden tiheys on 770–980 kg/m<sup>3</sup>. Rakenteen palonkestävyyttä voidaan kasvattaa asentamalla levyjä päällekkäin, jolloin kerroksia voi olla yhdestä neljään. Kiinnitys teräsrakenteeseen tapahtuu ruuveilla.

### *Kalsiumsilikaattilevy*

Kalsiumsilikaattilevy on noin 6–65 mm paksua kuituvahvistettua levyä, joka on tiheydeltään 430–950 kg/m<sup>3</sup>. Kalsiumsilikaattilevyjä voi työstää tavallisilla puuntyöstövälineillä ja kiinnittää ruuveilla koteloksi teräsrakenteen ympärille.

### *Puukipsilevy*

Puukipsilevyjä valmistetaan kipsin ja puukuidun seoksesta. Levy on noin 1200 kg/m<sup>3</sup> tiheä ja 15–22 mm paksu. Puukipsilevyn kiinnitys tehdään nauloilla tai ruuveilla.

### *Palosuojamaali*

Palosuojamaaleja käytetään usein kuivissa sisätiloissa. Maalit paisuvat ja muuttuvat vaahdoksi muodostaen eristekerroksen lämpötilan noustessa yli 250–300 °C. Tämän reaktion synnyttämän usean senttimetrin paksuisen vaahtokerroksen on tarkoituksena hiiliytessään palon aikana suojata teräsrakennetta. Palosuojamaali soveltuu käytettäväksi palonkestovaatimuksen ollessa R15-R120. Palosuojamaalilla suojaaminen edellyttää putkiprofiileilta yleensä vähintään 3,6 mm ainepaksuutta ja avoprofiileilta vähintään 5-8 mm. Palosuojamaalusta tehdään konepajoilla, erillisissä maalaamoissa sekä myös työmailla ruiskulla, telalla tai siveltimellä levittäen. Maalausprosessiin kuuluu teräsrakenteen esikäsitteily, pohjamaalaus, palosuojamaalaus ja pintamaalaus. Maalauskerroksen kokonaispaksuus on normaalisti 0,2–5 mm. Käytettävien maalien täytyy olla keskenään yhteensopivia ja on noudatettava valmistajan suosittamaa kalvopaksuutta. Palosuojamaalauksella päästään esteettiseen lopputulokseen eikä suojakerroksen paksuus muuta paljon rakenteen paksuutta verrattaessa esimerkiksi kotelointiratkaisuun.

### *Sementti-selluloosalevy*

Sementti-selluloosalevy valmistetaan sementistä, selluloosasta ja erilaisista mineraalisista ainesosista. Levy on noin 1100 kg/m<sup>3</sup> tiheä ja sitä käytetään kevyissä osastoivissa seinissä. Kiinnitys tapahtuu ruuveilla tai kiinnityslistoja apuna käyttäen.

### *Ruiskutettavat eristeet*

Mineraalivillakuituja ja sementtiä voidaan käyttää veden kanssa ruiskutettavana eristeenä teräsrakenteen pintaan. Kiinnitysalustana toimii sinkitty teräsverkko. Mineraalikuluruiskutus on tiheydeltään 220–500 kg/m<sup>3</sup> ja valmiin kerroksen paksuus noin 10–60 mm. Palosuojauksen pinnan ollessa huokoinen on se suojattava mekaaniselta rasitukselta esimerkiksi kovalla rappauksella, lasikuitukankaalla tai levyrakenteella.

Vermikuliittiruiskutusmassa ruiskutetaan suoraan teräspinnalle tai tukiverkolle. Sen runkoaineena toimii vermikuliitti ja sideaineena sementti, kalkki tai kipsi sekä vesi. Ruiskutuksen jälkeen valmiin kerroksen paksuus on yleensä 10–60 mm ja tiheys 300–800 kg/m<sup>3</sup>. Pinnan suojaus tapahtuu samalla tavalla kuin mineraalikuituruiskutusta käytettäessä [1;6;7].

### 2.2.2 Lämmönsitomiskyvyn parantaminen

Lämmönsitomiskykyä pystytään nostamaan erilaisilla putkiprofiileihin soveltuvilla rakenneputken täytöillä. Myös sprinklausjärjestelmän asennuksella saadaan palotilan lämpötila pysymään alhaisempana.

Betonilla täytetty teräspilari on tehokas palonsuojausmenetelmä. Teräsrakenteen palonkestoaikaa saadaan nostettua huomattavasti lisäämällä betonin sekaan raudoitusta. Raudoitusmäärällä saadaan myös hyvin säädelyä rakenteen kestävyyttä normaalilämpötilassa ja palotilanteessa. Teräsrakenteen ulkomuoto pysyy betonitäyttömenetelmää ja raudoitusta käytettäessä muuttumattomana ja monikerroksisen rakennuksen pilari-koko voidaan pitää samana alhaalta ylös asti. Teräsosan hyvä asennettavuus säilyy, kun se täytetään betonilla vasta työmaalla. Palotilanteessa pääosa kuormista siirtyy betonitäytteen ja raudoituksen välityksellä ja höyryn paine purkautuu sitä varten tehdyistä höyrynpoistorei'istä vahingoittamatta teräsosaa.

Rakenneputken vesitäyttö toimii teräsrakennetta jäähdyttävänä materiaalina. Palotilanteessa lämpöenergia kuluu teräsrakenneputken sisällä olevan veden lämmittämiseen ja höyrystämiseen. Rakenneputket voidaan yhdistää niiden yläpuoliseen vesisäiliöön, johon palotilanteessa höyrystynyt vesi nousee ja jäähdyttyään palaa putkiin pitäen niiden lämpötilan noin 200–250 °C tulipalon ajan. Veden kiertoputkisto voidaan viedä rakenneputken sisäpuolella, jolloin teräsosan ulkomuoto pysyy muuttumattomana.

### 2.2.3 Rakenteellinen palosuojaus

Palosuojausmateriaaleja päästään vähentämään tai ei välttämättä edes tarvita, kun valitaan oikeanlaiset rakenteelliset ratkaisut. Rakenteellinen palonsuojaus otetaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa.

Alas laskettu katto toimii LVIS-asennusten vaatiman tilan toteutuksen lisäksi esimerkiksi välitilassa olevien välipohjapalkkien palosuojauksena. Tällöin se on suunniteltava tarkoitukseen sopivaksi ja tarkistettava, että myös yläpuolinen rakenne ja kiinnitykset kestävät palonaikaiset rasitukset.

Teräsrakenteet voidaan joissain tapauksissa sijoittaa ulkoseinien ulkopuolelle, jolloin ne eivät altistu palotilan lämmön nousulle. On kuitenkin otettava huomioon esimerkiksi mahdolliset ikkunoista poistuvat kuumat savukaasut ja liekit, jotka ollessaan lähellä teräsrakenteita nostavat niiden lämpötilaa.

Palolle altista pinta-alaa voidaan myös pyrkiä pienentämään sijoittamalla teräsrakenne kokonaan tai osittain seinärakenteen palosuojamateriaalin sisälle [1].

### 3 Paloturvallisuus

Paloturvallisuus on otettava suunnittelussa huomioon ja tarkimmin siitä kerrotaan maankäyttö- ja rakennuslain seuraavaksi esitettävässä paloturvallisuutta käsittelevässä pykälässä.

117 b § (21.12.2012/958)

#### Paloturvallisuus

”Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla paloturvalliseksi. Palon syttymisen vaaraa on rajoitettava. Rakennuksen kantavien rakenteiden on oltava sellaiset, että ne palon sattuessa kestävät vähimmäisajan ottaen huomioon rakennuksen sortuminen, poistumisen turvaaminen, pelastustoiminta ja palon hallintaan saaminen. Palon ja savun kehittymistä ja leviämistä rakennuksessa sekä palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin on pystyttävä rajoittamaan. Rakennuksen rakentamisessa on käytettävä paloturvallisuuden kannalta soveltuvia rakennustuotteita ja teknisiä laitteistoja.

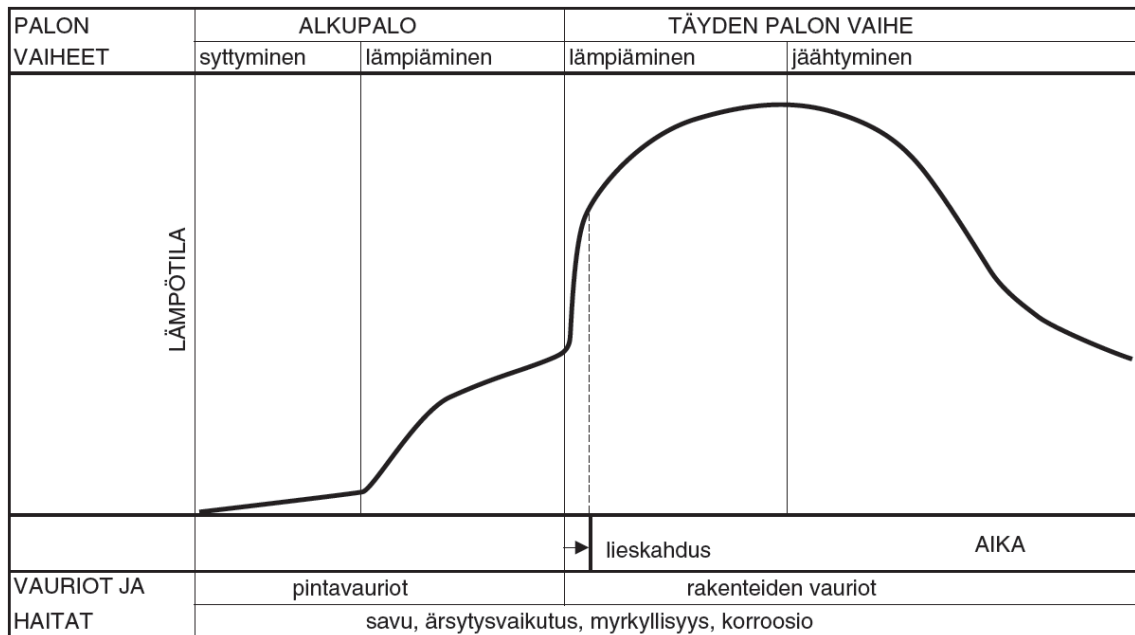
Rakennuksen on oltava sellainen, että siinä olevat voivat palon sattuessa pelastautua tai heidät voidaan pelastaa. Pelastushenkilöstön turvallisuus on rakentamisessa otettava huomioon. Lupaviranomainen voi edellyttää laadittavaksi turvallisuusselvityksen poistumisturvallisuuden kannalta erittäin vaativasta kohteesta.

Ympäristöministeriön asetuksella voidaan antaa uuden rakennuksen rakentamista, rakennuksen korjaus- ja muutostyötä sekä rakennuksen käyttötarkoituksen muutosta varten tarvittavia tarkempia säännöksiä:

- 1) palon syttymisen ja leviämisen rajoittamisesta sekä taloteknisten ja lämmitykseen käytettävien laitteistojen paloturvallisuudesta;
- 2) rakenteiden kantavuudesta palotilanteessa ja tähän liittyvistä rakennustuotteiden ominaisuuksista;
- 3) palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rajoittamisesta ja tähän liittyvien rakennustuotteiden ja laitteistojen ominaisuuksista;
- 4) poistumisturvallisuudesta ja turvallisuusselvityksestä;
- 5) sammutus- ja pelastustehtävien järjestelystä” [2].

## 4 Palotilan lämmönkehitys

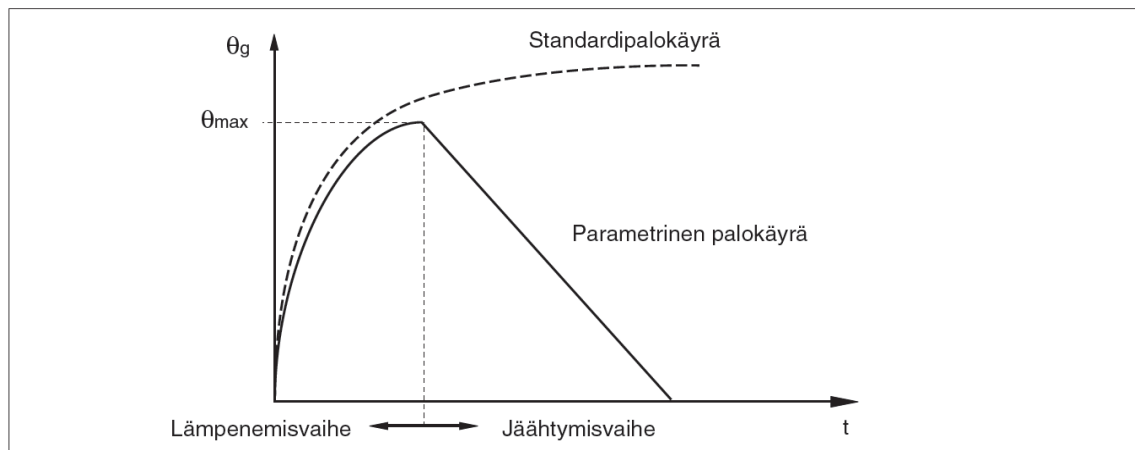
Palotilan lämmönkehitystä voidaan tarkastella joko toiminnallisen palomitoituksen perusteella tai nimellistä lämpötilakäyrää tarkastellen. Tässä työssä tarkastellaan vain tietylle ajanjaksolle määritetyistä nimellis lämpötilakäyristä standardipalokäyrää ja hiilivetykäyrää. Tulipalon kytemis-, syttymis-, lämpiämis-, lieskahdus- ja jäähtymisvaiheen pituus voi vaihdella huomattavasti.



Kuva 1. Palon eri vaiheet.

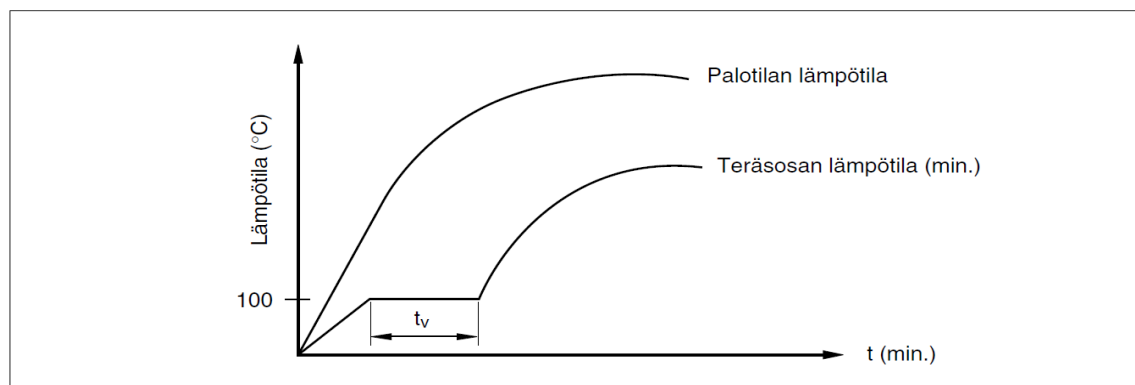
Palotilassa oleva palava materiaali syttyy palamaan lieskahdusvaiheessa palotilan lämpötilan ollessa noin 350–550 °C. Tulipalon ollessa kuumimmillaan voi lämpötila kohota jopa yli 1000 °C. Nimelliset lämpötila-aikakäyrät eivät huomioi palokuorman suuruutta,

palo-osaston kokoa tai tuuletusaukkojen määrää. Palotilassa oletetaan vallitsevan sama lämpötila riippumatta siitä missä kohtaa tilaa lämpötila mitattaisiin.



**Kuva 2. Standardipalokäyrän jatkuvuus.**

Palosuoja-aineessa voi olla sitoutuneena kosteutta hidastamassa teräksen lämpiämistä, kunnes kosteus haihtuu. Tästä aiheutuu viiveaika, jolloin teräksen lämpötilan oletetaan pysyvän 100 °C:ssa sillä palosuojamateriaalissa oleva kosteus poistuu palon vastakkaisen pinnan kautta. Kuitenkin palosuojamateriaalien kosteussisällön ja kosteuden kulkeutumisen vaikutus voidaan varmalla puolella olevana oletuksena jättää huomioimatta [6;10].



**Kuva 3. Kosteudesta aiheutuva viiveaika**

#### 4.1 Standardipalo

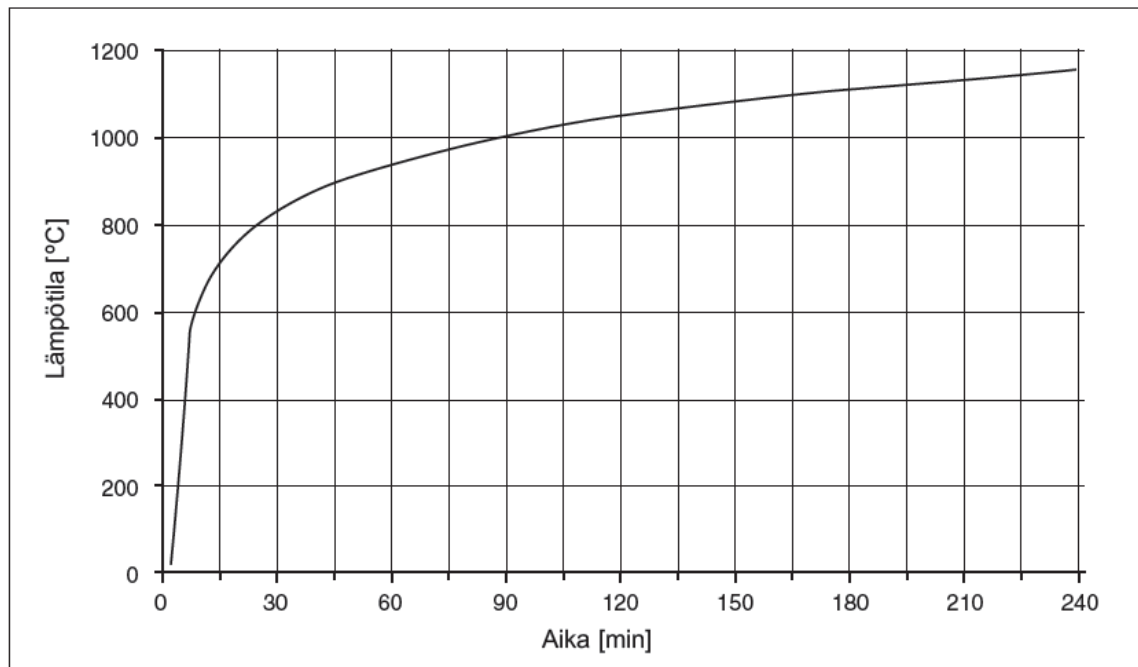
Standardipalotilanteessa tulee rakenneosien täyttää R-ehto siten, että rakenteen kantavuus säilyy vaaditun ajan paloaltistuksessa. Standardipalokäyrästä on jätetty lieskahdusta ennen tapahtuva syttymisvaihe ja kytemisvaihe huomioimatta. Standardikäyrää käytettäessä saadaan aikaiseksi melko yksinkertaisesti tuloksia. Kuitenkin ylimitoitusta saattaa aiheuttaa nimellisten palokäyrien palonkehityksen ollessa rajumpaa, kuin todellisessa tulipalossa. Seuraavan kuvan lämpötila-aikakäyrän lämpötila määräytyy ISO 834-standardin mukaan seuraavasti:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1)$$

missä:

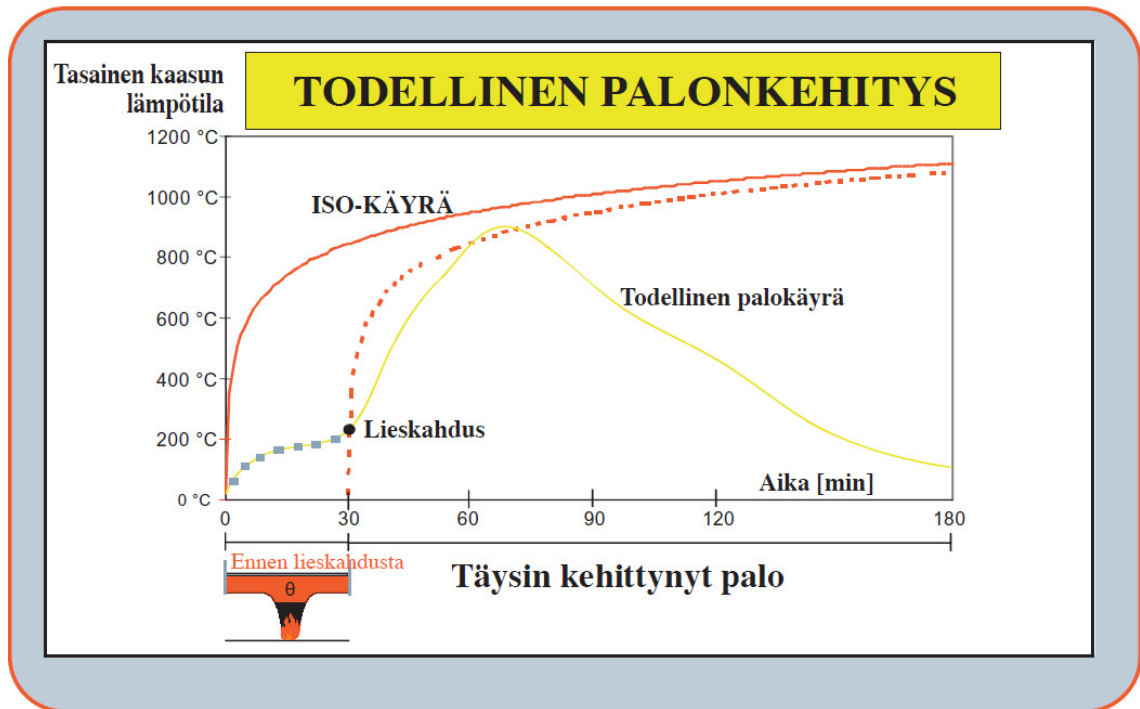
$\theta_g$  on kaasun lämpötila palotilanteessa [°C]

t on aika [min] [12].



Kuva 4. Standardipalokäyrä.

Standardipalotilanteessa tulipalon oletetaan jatkuvan sammumattomana eikä sen jäähtymisvaihetta huomioida, kuten alla olevan kuvan lämpötila-aikakäyrien vertailusta ilmenee.



Kuva 5. Todellinen palonkehitys.

#### 4.2 Hiilivetypalo

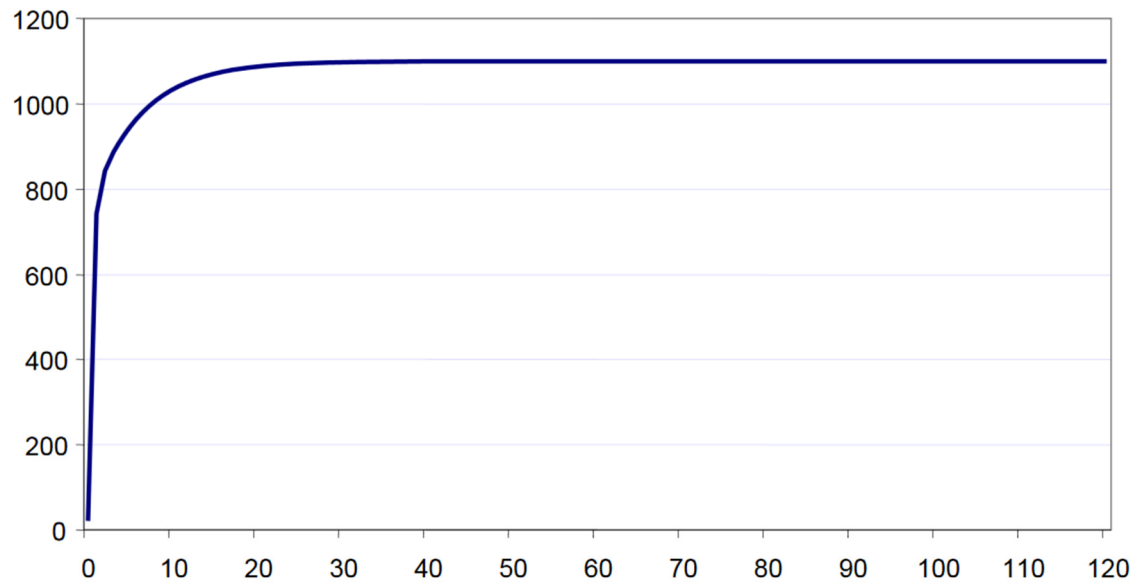
Hiilivetypalotilanteessa käytetään hiilivetykäyrää kuitenkin soveltamalla R-ehto siten, että viitattaessa paloaltistuskäyrään käytetään HC-merkintää. Alla olevan kuvan lämpötila-aikakäyrä määräytyy seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\theta_g = 1080 [1 - 0,325 e^{-0,167 t} - 0,675 e^{-2,5 t}] + 20$$

missä:

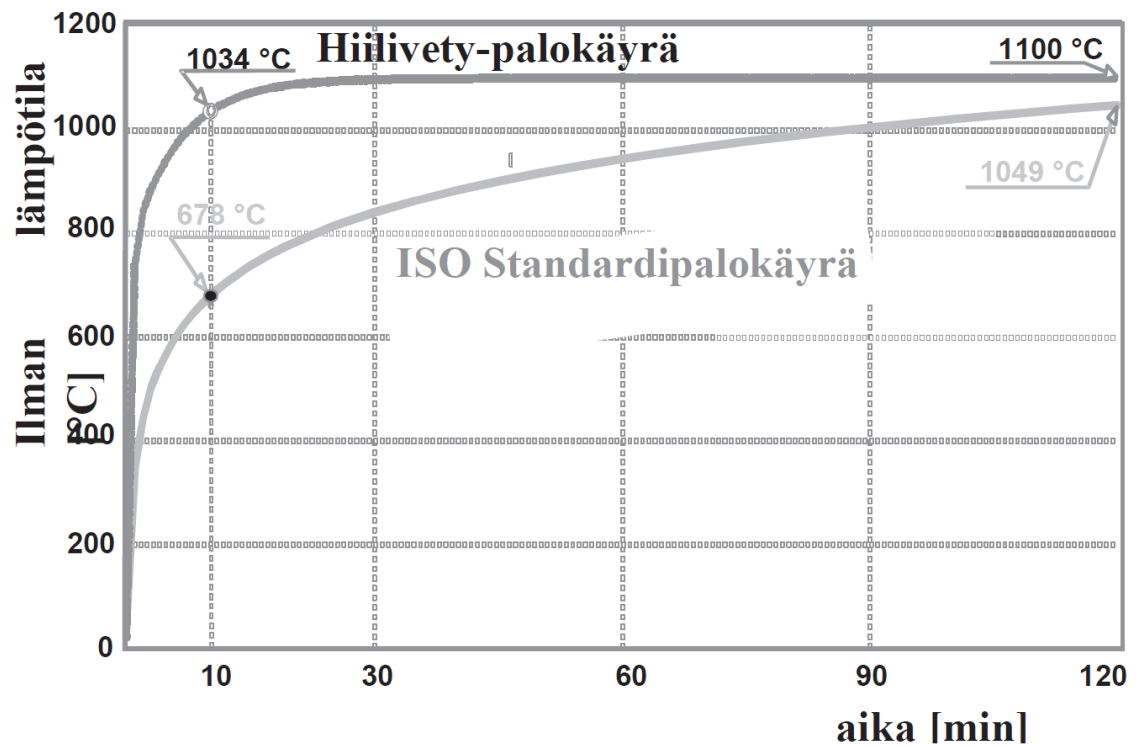
$\theta_g$  on kaasun lämpötila palotilanteessa [°C].

t on aika minuuteissa [13].



Kuva 6. Hiilivety-palokäyrä.

Verrattaessa hiilivety-palokäyrää ISO Standardipalokäyrään on huomattavissa, että palotilan lämpötila nousee hiilivetypalossa rajusti nopeammin kuin Standardipalossa. Hiilivety-palokäyrässä liekkien lämpötila on nousurajan jälkeen vakio 1100 °C [8].

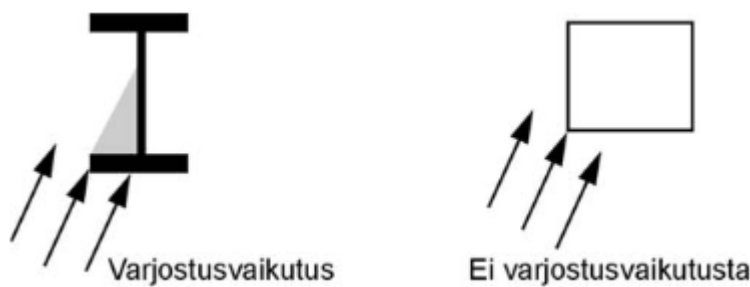


Kuva 7. Hiilivety-palokäyrä verrattuna ISO Standardipalokäyrään.

## 5 Teräsrakenteen lämpötilan kehitys

Teräsrakenteeseen voi tulipalossa siirtyä lämpöä johtamalla, säteilemällä tai kuljettamalla. Teräsrakenteen palonkestävyyteen ja lämpötilan kehitykseen vaikuttaa oleellisesti sen poikkileikkaustekijä. Mitä suurempi on teräksen määrä suhteessa tulipalolle altistettuun pinta-alaan, sitä parempi palonkestävyys sillä on. Pienessä ja paksussa teräsosassa lämpötila nousee hitaasti, kun taas suuren poikkileikkaustekijän omaavassa osassa lämpötila nousee palotilanteessa nopeasti. Käytännössä siis ohuet teräsrakenteet on suojattava paksummilla eristyslevyillä. Raskaasti kuormitettu teräs menettää suunnitellun varmuusmarginaalinsa noin 550 °C lämpötilassa riippumatta teräksen laadusta [3;5].

Suojaamatonta sisätiloihin sijoitettavaa teräsrakennetta tarkasteltaessa otetaan huomioon erilaisia lämpötilan kehitykseen vaikuttavia tekijöitä, kuten esimerkiksi varjostustekijä. Varjostustekijän arvoksi saadaan 1, jos teräsprofiili on muodoltaan esimerkiksi pyöreä tai suorakaide, jolloin palo pääsee kohdistumaan siihen joka puolelta.



**Kuva 8. Varjostusvaikutus.**

Toisen muotoisissa profiileissa taas on erilaisia kohtia, joihin lämpösäteily ei pääse yhtä voimakkaasti vaikuttamaan. Tämän tyyppiset esimerkiksi I ja H -profiilit omaavat tietynlaisia varjostusvaikutuksen alaisia katvealueita [10].

Lämpötilan kehittymisen laskenta suojaamattomalle sisällä olevalle teräsrakenteelle, kun poikkileikkauksessa vallitsee ekvivalentti tasainen lämpötilan jakauma, suoritetaan kaavalla:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{Am/V}{c_a\rho_a} h_{net}\Delta t$$

missä:

$k_{sh}$	on	varjostusvaikutuksen korjaustekijä
$Am/V$	on	suojaamattoman terässauvan poikkileikkaustekijä [1/m]
$Am$	on	sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti [m <sup>2</sup> /m]
$V$	on	sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m <sup>3</sup> /m]
$c_a$	on	teräksen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
$h_{net}$	on	pinta-ala yksikköä kohti laskettu nettolämpövuoto
$\Delta t$	on	aikaväli sekunteina
$\rho_a$	on	teräksen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]

I-profiilille nimellispalorasituksessa varjostusvaikutuksen korjaustekijä voidaan laskea kaavasta:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{[Am/V]_b}{[Am/V]}$$

missä:

$[Am/V]_b$  on poikkileikkaustekijän arvo, kun poikkileikkausta käsitellään kotelona

Kaikissa muissa tapauksissa  $k_{sh}$  lasketaan kaavasta:

$$k_{sh} = \frac{[Am/V]_b}{[Am/V]}$$

Valitsemalla varjostustekijän arvoksi ( $k_{sh}= 1$ ) saadaan varmalla puolella olevia tuloksia.

Nettolämpövuon mitoitusarvo  $h_{net,d} = h_{net,c} + h_{net,r}$

missä:

$h_{net.c}$  on kuljettumalla tapahtuva nettolämpövuoto [ $W/m^2$ ]

$h_{net.r}$  on säteilemällä tapahtuva nettolämpövuoto [ $W/m^2$ ]

Kuljettumalla tapahtuva nettolämpövuoto:

$$h_{net.c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

missä:

$\alpha_c$  on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin [ $W/(m^2K)$ ]

$\theta_g$  on palotilan kaasun lämpötila rakenneosan ympärillä [ $^{\circ}C$ ]

$\theta_m$  on rakenneosan pintalämpötila [ $^{\circ}C$ ]

Säteilemällä tapahtuva nettolämpövuoto:

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

missä:

$\Phi$  on näkyvyyskerroin,  $\Phi = 1,0$

$\varepsilon_m$  on rakenneosan pinnan säteilykerroin

$\varepsilon_f$  on palon säteilykerroin,  $\varepsilon_f = 1,0$

$\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$

$\theta_r$  on paloympäristön tehollinen säteilylämpötila [ $^{\circ}C$ ]

$\theta_m$  on rakenneosan pintalämpötila [ $^{\circ}C$ ]

Teräksen ominaislämpökapasiteetin arvoksi voidaan ottaa  $c_a = 600 \text{ J}/(\text{kgK})$ , tai se voidaan laskea tarkemmin seuraavasti:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3$$

$$\text{kun } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C}$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$$

$$\text{kun } 600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C}$$

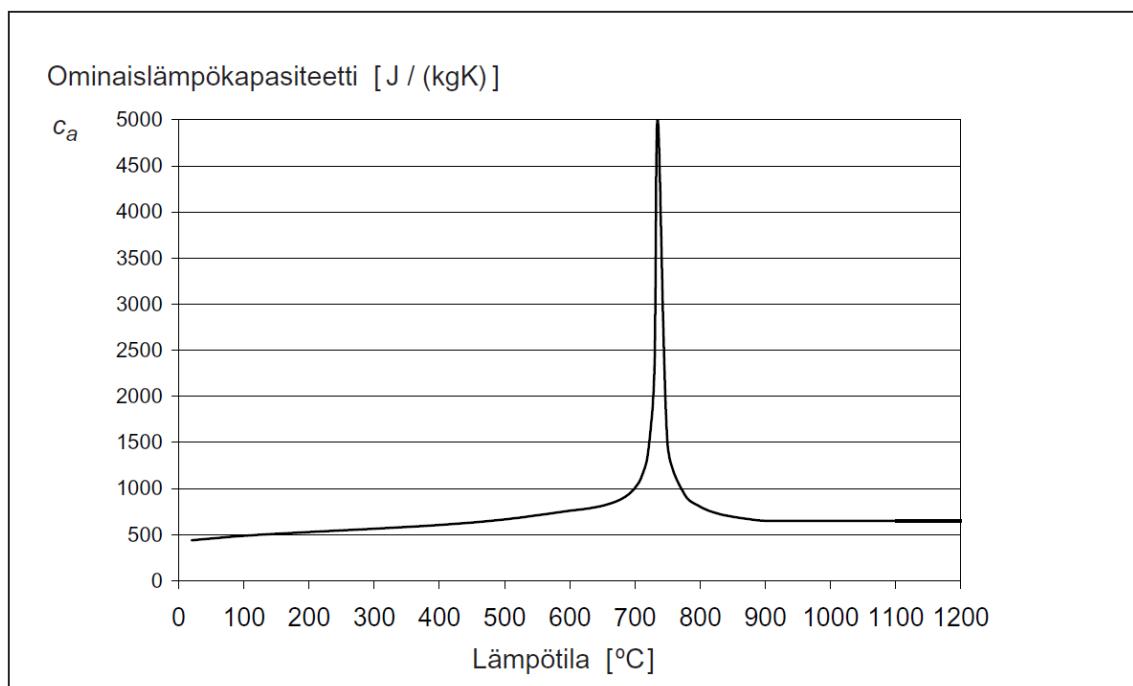
$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$$

$$\text{kun } 735^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 900^\circ\text{C}$$

$$c_a = 650 \text{ J}/(\text{kgK})$$

$$\text{kun } 900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$$

missä  $\theta_a$  on teräksen lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]



**Kuva 9. Hiiliteräksen ominaislämpökapasiteetti.**

Poikkileikkaustekijän  $Am/V$  arvon tulee olla vähintään  $10 \text{ m}^{-1}$ .

$\Delta t$ :n arvo saa olla enintään 5 sekuntia.

Lämpötilan kehittymisen laskenta palosuojatulle sisällä olevalle teräsrakenteelle aikavälin aikana, kun lämpötila jakaantuu tasaisesti, suoritetaan kaavalla:

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

missä:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p/V$$

missä:

$A_p/V$	on	palosuojamateriaalilla eristetyn terässauvan poikkileikkaustekijä [1/m]
$A_p$	on	palosuojamateriaalilla suojatun pinnan pinta-ala pituusyksikköä kohti [m <sup>2</sup> /m]
$V$	on	sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m <sup>3</sup> /m]
$c_a$	on	lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
$c_p$	on	palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
$d_p$	on	palosuojamateriaalin paksuus [m]
$\Delta t$	on	aikaväli sekunteina
$\theta_{a,t}$	on	teräksen lämpötila ajan hetkellä $t$ [°C]
$\theta_{g,t}$	on	palotilan lämpötila ajan hetkellä $t$ [°C]

$\Delta\theta_{g,t}$  on palotilan lämpötilan nousu ajanjakson  $\Delta t$  aikana

$\lambda_p$  on palosuojajärjestelmän lämmönjohtavuus [W/mK]

$\rho_a$  on teräksen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_p$  on palosuojamateriaalin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\Delta t$ :n arvo saa olla enintään 30 sekuntia [12.].

## 6 Laskentatyökalu

Excel-pohjainen laskentatyökalu laskee suojatun ja suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan kehityksen palotilanteessa ja piirtää siitä lämpötila-aikakäyrän.

### 6.1 Lämpötilan kehityksen laskentatyökalun tarkoitus

Laskentatyökalun tarkoituksena on helpottaa ja nopeuttaa teräsrakenteiden suunnittelijan työtä teräsrakenteen lämpötilan kehityksen selvittämisen osalta. Teräsrakenteen lämpötilan kehitystä laskettaessa käytetään useita monimutkaisia kaavoja ja arvoja, joista ei välttämättä saa ensikatsomalta enempää perehtymättä selvyttä. Tähän ratkaisuun työkaluun on syötetty tarvittavat kaavat valmiiksi ja ohjeistettuna erilaisten arvojen tarkoitukset laskennassa. Laskentaa on helpotettu jättämällä laskijalle työkaluun syötettäväksi vain muutamia tarvittavia tietoja ja yksinkertaistettu valikoilla, jotta virheitä välttäisiin. Työkalu perustuu eurokoodin SFS-EN 1993-1-2 ja SFS-EN 1363-2 nimellisen paloaltistuksen laskentaohjeisiin.

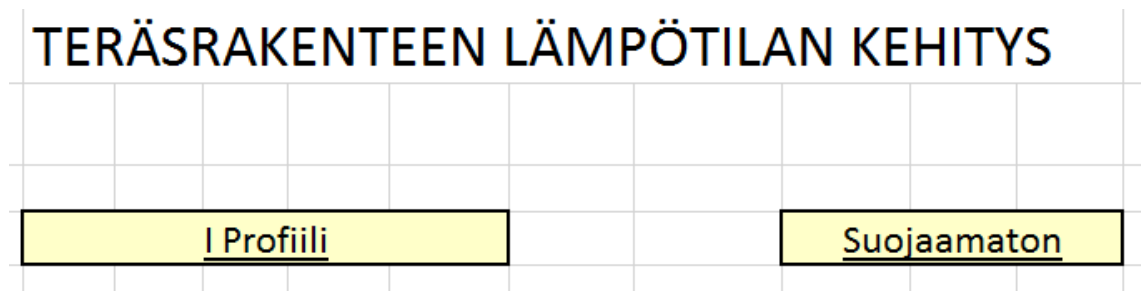
### 6.2 Työkalun toimintaohjeet

Työkalu perustuu yksinkertaisesti värikoodeihin ja helppokäyttöisten valikoiden käyttöön. Tietty väri kertoo, mitkä solut käyttäjän tulee täyttää ja mistä nähdään laskujen tulokset.

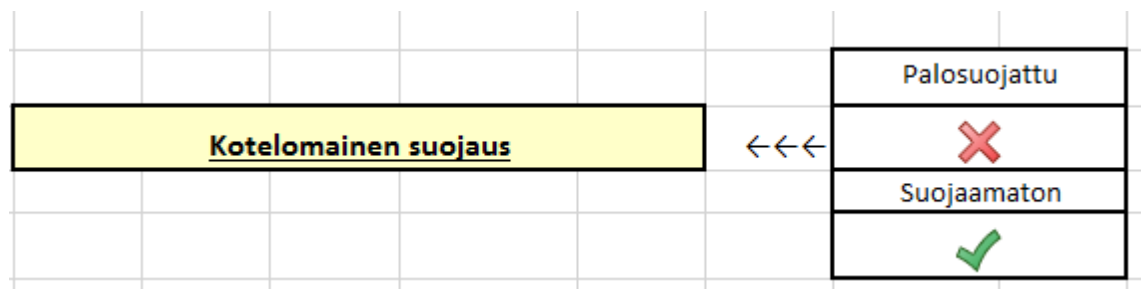
Työkalussa käytetyt värit ja reunukset	
	- Täytä solu vaadituilla tiedoilla
	- Valitse pudotusvalikosta
	- Työkalun laskema tulos
	- Työkalun laskema tulos
	- Ohjeita vaaditulle arvolle
	- Työkalun lasketusta tuloksesta poimittu arvo tai valmiiksi täytetty oletusarvo

Kuva 10. Työkalun värikoodit.

Ensimmäisenä valitaan pudotusvalikosta käytettävä teräsprofiili ja seuraavasta pudotusvalikosta suoritetaanko laskenta palosuojatulle vai suojaamattomalle rakenteelle. Valittaessa suojaamaton -vaihtoehto, ilmestyy oikeassa reunassa olevaan laatikkoon kohtaan "Suojaamaton" oikeinmerkki. Palosuojatun valitsemisen jälkeen on myös valittava seuraavasta pudotusvalikosta profiilille soveltuva suojaustapa niin, että oikeassa reunassa olevaan laatikkoon ilmestyy kohtaan "Palosuojattu" oikeinmerkki.



Kuva 11. Profiilin valinta.



Kuva 12. Palosuojauksen valinta.

Vasempaan reunaan ilmestyneet nuolet opastavat profiilin valinnan mukaan mitä arvoja täytetään kyseistä profiilia laskettaessa. Työkalu laskee annettujen tietojen perusteella profiilin poikkileikkaustekijän. Vaihtoehtona on myös valita muu laskettu Am/V, jolloin poikkileikkaustekijä on katsottava valmiiksi lasketuista taulukoista tai laskettava itse. Sama pätee myös kohtaan muu laskettu Ap/V, rakenteen ollessa palosuojattu.

		I Profiili			
→→→→	h	270	mm	V	9726,496 mm <sup>2</sup>
→→→→	b	280	mm	Am	1646,792 mm
→→→→	tw	8	mm	Am/V	169,310 1/m
→→→→	tf	13	mm		
→→→→	r	24	mm		

Kuva 13. Opastus nuolet.

Poikkileikkaustekijän selvittyä siirrytään syöttämään haluttu tarkasteltava ajankohta minuutteina ja sekunteina pudotusvalikoista. Tässä kohtaa voidaan selvittää tulokset erikseen joko standardi-, tai hiilivetyypalolle tai vertailla niitä antamalla tiedot molempiin. Työkalu laskee annettujen tietojen perusteella teräksen lämpötilan ja ominaislämpökapasiteetin.

	Standardipalo			Hiilivetyypalo	
	min	sek		min	sek
standardipalokäyrällä	10	0	hiilivetyypalokäyrällä	10	0
standardipalokäyrällä	10,00 min		hiilivetyypalokäyrällä	10,00 min	
	0,166667 h			0,166667 h	

Kuva 14. Tarkasteltava ajankohta.

Teräksen ominaislämpökapasiteetti $c_{\sigma}$		
Kun $\theta_a = 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$	$\theta_a = 518,2$	$c_{\sigma} = 680,6778 \text{ J}/(\text{kgK})$
Kun $\theta_a = 600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$	$\theta_a = 0,0$	$c_{\sigma} = 683,6179 \text{ J}/(\text{kgK})$
Kun $\theta_a = 735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$	$\theta_a = 0,0$	$c_{\sigma} = 520,6224 \text{ J}/(\text{kgK})$
Kun $\theta_a = 900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$	$\theta_a = 0,0$	$c_{\sigma} = 650 \text{ J}/(\text{kgK})$
$\theta_a$ on teräksen lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\theta_a = 518,2$	$c_{\sigma} = 680,6778 \text{ J}/(\text{kgK})$

Kuva 15. Ominaislämpökapasiteetti.

Kuljettumalla ja säteilemällä tapahtuva nettolämpövuoto sekä nettolämpövuonon mitoitusarvo selviää syöttämällä laskuriin kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin. Valmiiksi syötetyt näkyvyyskerroin, rakenneosan pinnan säteilykerroin, palon säteilykerroin ja Stefan Boltzmannin vakio on mahdollista myös muuttaa haluamukseen. Työkalu laskee annettujen tietojen perusteella nettolämpövuonon mitoitusarvon.

<b>Kuljettumalla tapahtuva nettolämpövuoto <math>h_{net,c}</math></b>			
Kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin	$\alpha_c =$	25	W/(m <sup>2</sup> K)
Rakenneosan pintalämpötila	$\theta_m =$	518,2	°C
Palotilan kaasun lämpötila rakenneosan ympärillä	$\theta_g =$	678,4	°C
		$h_{net,c} =$	4005,448 W/m <sup>2</sup>
<b>Säteilemällä tapahtuva nettolämpövuoto <math>h_{net,r}</math></b>			
Näkyvyyskerroin	$\Phi =$	1	
Rakenneosan pinnan säteilykerroin	$\varepsilon_m =$	0,7	
Palon säteilykerroin	$\varepsilon_f =$	1	
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma =$	5,67E-08	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
Rakenneosan pintalämpötila	$\theta_m =$	518,2	°C
Paloympäristön tehollinen säteilylämpötila	$\theta_r =$	678,4	°C
		$h_{net,r} =$	16968,304 W/m <sup>2</sup>
<b>Nettolämpövuonon mitoitusarvo <math>h_{net,d}</math></b>		$h_{net,d} =$	20973,752 W/m <sup>2</sup>

Kuva 16. Nettolämpövuonon mitoitusarvo.

Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan muutoksen laskemiseen tarvittava varjostusvaikutuksen korjaustekijä selviää ”Ohjeita” välilehden neuvoja noudattamalla.



Kuva 17. ”Ohjeita” välilehti.

Syötä varjostusvaikutuksen korjaustekijä ja aikaväli sekunneissa laskuriin ja työkalu laskee lämpötilan muutoksen. Tulokset piirtyvät ohessa oleville käyrille.

Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan muutos $\Delta\theta_{a,t}$			
Varjostusvaikutuksen korjaustekijä	$k_{sh} =$	1	
Sauvan palolle alttiin vaipan pinta- ala pituusyksikköä kohti	$A_m =$	1646,79	mm <sup>2</sup>
Sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti	$V =$	9726,50	mm
Suojaamattoman terässauvan poikkileikkaustekijä	$A_m/V =$	169,31	1/m
Teräksen ominaislämpökapasiteetti	$c_a =$	680,678	J/(kgK)
Sauvan palolle alttiin vaipan pinta-alaa kohti laskettu nettolämpövuoto	$h_{net,d} =$	20973,752	W/m <sup>2</sup>
Aikaväli sekunneissa	$\Delta t =$	5	s
Teräksen tiheys	$\rho_a =$	7850	kg/m <sup>3</sup>
		$\Delta\theta_{a,t} =$	3,3228994 °C
		min	sek
	Ajan hetkellä	10	0
	Teräksen lämpötila	$\theta_a =$	518,2 °C

Kuva 18. Lämpötilan muutos.

Palosuojatun teräsrakenteen lämpötilan muutoksen laskemista varten on syötettävä laskuriin palosuojausjärjestelmän lämmönjohtavuus, palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti, palosuojamateriaalin paksuus, aikaväli sekunteina sekä palosuojamateriaalin tiheys. Muista käydä vaihtamassa laskurin yläreunassa olevista pudotusvalikoista "Palosuojattu" ja palosuojauksen tyyppi niin, että myös oikeassa reunassa olevaan taulukkoon kohtaan "Palosuojattu" ilmestyy oikein-merkki.

<u>Palosuojattu</u>		<u>Vakiopaksuinen suojaus rakenteen pinnassa</u>	←←←	Palosuojattu
				✓
				Suojaamaton
				✗

Kuva 19. "Palosuojattu" valinta.

Palosuojatun teräsrakenteen lämpötilan muutos $\Delta\theta_{a,t}$			
Palosuojausjärjestelmän lämmönjohtavuus	$\lambda_p =$	0,25	W/(mK)
Palosuojamateriaalilla suojatun pinnan pinta-ala sauvan pituusyksikköä kohti	$A_p =$	1646,792	m <sup>2</sup> /m
Sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti	$V =$	9726,496	m <sup>3</sup> /m
Palosuojamateriaalilla eristetyn terässauvan poikkileikkaustekijä	$A_p/V =$	169,309893	1/m
Lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti	$c_{\sigma} =$	515,329	J/(kgK)
Palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti	$c_p =$	1000	J/(kgK)
Palosuojamateriaalin paksuus	$d_p =$	0,02	m
Aikaväli sekunteina	$\Delta t =$	5	s
Palotilan lämpötila ajan hetkellä	$\theta_{g,t} =$	678,427332	°C
Teräksen lämpötila ajan hetkellä	$\theta_{a,t} =$	162,0	°C
Palotilan lämpötilan nousu ajanjakson aikana	$\Delta\theta_{g,t} =$	274,30	K
Teräksen tiheys	$\rho_{\sigma} =$	7850	kg/m <sup>3</sup>
Palosuojamateriaalin tiheys	$\rho_p =$	140	kg/m <sup>3</sup>
	$\phi =$	0,11718891	
	$\Delta\theta_{a,t} =$	1,37074472	°C
		min	sek
Ajan hetkellä		10	0
Teräksen lämpötila	$\theta_a =$	162,0	°C

Kuva 20. Lämpötilan muutos.

Työkalu laskee lämpötilan muutoksen ja tulokset piirtyvät ohessa oleville käyrille.

## 7 Pohdintaa

Opinnäytetyön tavoitteena oli kerätä tietoa teräsrakenteen palonsuojausmateriaaleista ja tehdä laskuri teräsrakenteen lämpötilan kehitykselle standardi- ja hiilivetypalotilanteessa. Laskuri toteutettiin Excel-taulukkomuodossa. Lisäksi ajan riittäessä ajateltiin vielä kehittää teräsrakenteen palomitoitukselle laskentapohja, jossa laskettaisiin rakenteen käyttäytyminen normaalilämpötilassa ja palotilanteessa. Tarkoituksena oli kertoa myös millä menetelmillä teräsrakennetta kannattaa lähteä suojaamaan palotilannetta varten.

Insinööriyön tekeminen toimi hyvänä ylimääräisenä teräsrakenteiden palomitoitukseen keskittyvänä kurssina. Myös Excelin käyttö tuli tutuksi ja oli mielenkiintoista huomata mitä kaikkea kyseisellä ohjelmalla voi oikeasti saada aikaan.

Työtä tehdessä onnistuttiin pitämään suunnitellusta aikataulusta kiinni, jossa suureksi avuksi osoittautui, että hankalaan tilanteeseen jouduttaessa oli mahdollisuus heti kysyä neuvoa ja yleensä ratkaisu löytyi tavalla tai toisella.

### 7.1 Tulokset

Työn tuloksena saatiin Excel-pohjainen laskuri helpottamaan teräsrakenteen palotilanteen lämpötilankehityksen laskentaa ja kirjallista aineistoa tukemaan työkalun käyttöä sekä kertomaan erilaisista palosuojamateriaaleista.

Työkaluun sisällytettiin myös ohjeet ja käyttöä helpottavia lähtötietotaulukoita erilaisista teräsprofiileista. Laskuriin saatiin sisällytettyä toivottu standardi- ja hiilivetypalotilanteiden vertailumahdollisuus ja näiden vaikutus teräsrakenteen lämpötilan kehitykseen.

Laskentakaavat ja -ohjeet otettiin olennaisena osana mukaan myös kirjalliseen raporttiin, jotta pelkästään sitä lukemalla pystyttäisiin havaitsemaan mistä teräsrakenteen lämmönkehityksen laskemisessa on kyse.

Työkalusta saatiin viimeisteltyä käyttäjäystävällinen ja mahdollisimman yksinkertainen. Sen käytöllä voidaan oikeasti nopeuttaa ja helpottaa suunnittelijan työtä, eikä siitä kerry vain ylimääräistä opettelemista.

Laskuria ei viety teräsrakenteen lämpötilankehitystä pidemmälle, jotta se saataisiin hiottua toimivaksi ja helpoksi käyttää eikä kävisi niin, että laskuria jatkettaessa opinnäytetyön tekemiseen suunniteltu aika loppuisi kesken ja työkalu jäisi huonoimmassa tapauksessa puolitiehen eli käyttökelvottomaksi.

## 7.2 Tulevaisuuden näkymiä

Työkalu jätettiin sellaiseen tilaan, että jatkoa ajatellen sitä olisi helppo päivittää laskemaan myös tarkemmin teräsrakenteen palomitoitus loppuun asti, kun lämpötilankehitys saadaan jo selville.

Työkalu muotoiltiin soveltumaan teräsrakennesuunnittelijan käyttöön ja se tuleekin käytettäväksi teräsrakenteiden palomitoituksen tukena.

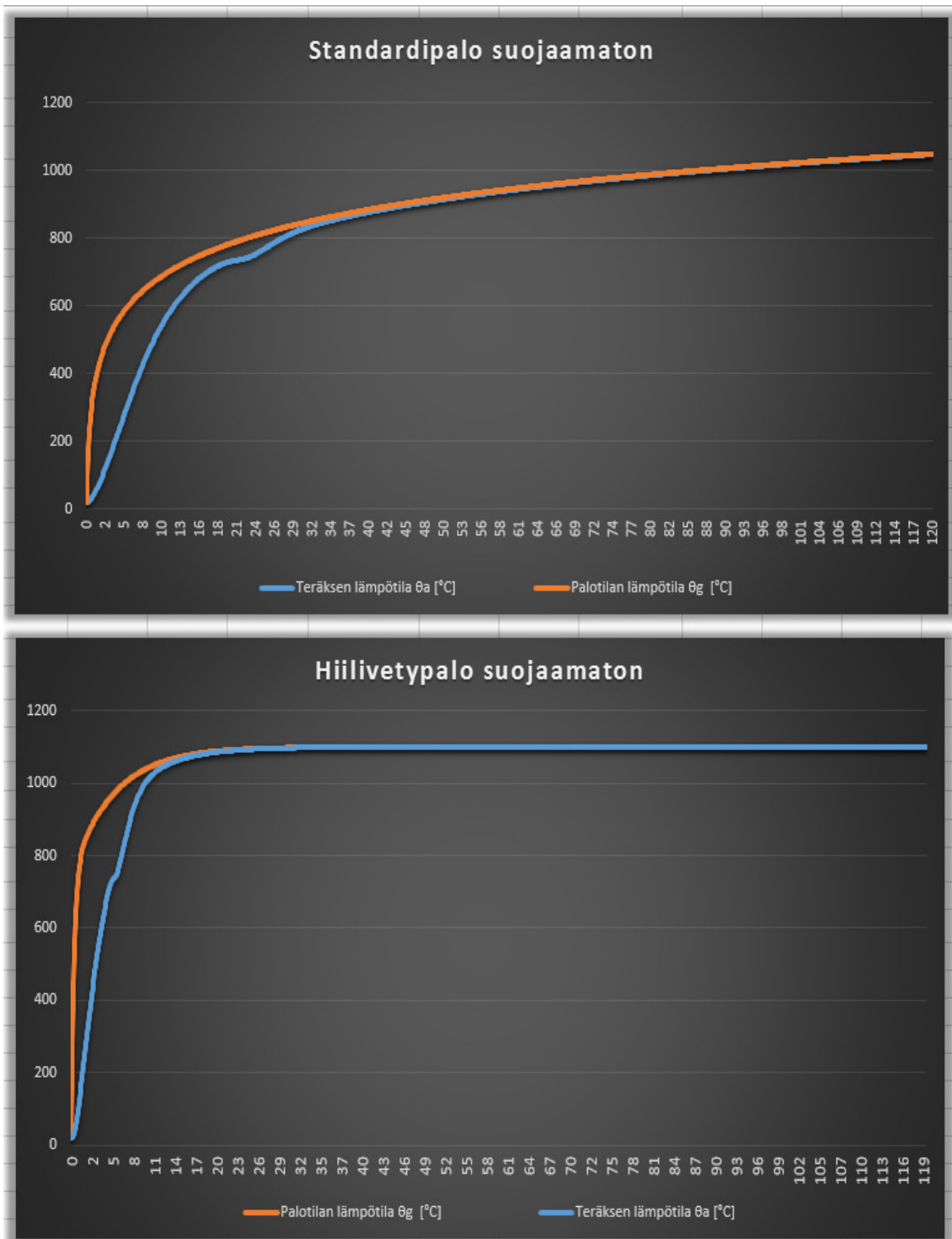
Excel-laskurin soluja ei lukittu millään tavoin, joten käyttäjälle jää mahdollisuus muotoilla työkalua omaan käyttötarkoitukseensa sopivaksi. Kuitenkin laskurin kaavoja muutettaessa on käyttäjän otettava vastuu työkalun oikeasta toiminnasta.

## Lähteet

- 1 Ruukki-Rakenneputket-Käsikirja-2012.
- 2 Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999 117 b §
- 3 <http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/ratkaisut/palo/terasrakenteiden-palosuojaus>
- 4 Swecon verkkosivut, [www.sweco.fi](http://www.sweco.fi), luettu 30.5.2016.
- 5 Pyromaster Oy:n verkkosivut, [www.pyromaster.fi/menetelmät](http://www.pyromaster.fi/menetelmät), luettu 1.6.2016.
- 6 Gyprocin verkkosivut, [www.gyproc.fi/suunnittelu/palositivusto](http://www.gyproc.fi/suunnittelu/palositivusto), luettu 6.6.2016.
- 7 Abresto verkkosivut, [www.abresto.fi/tuotteet/eristyslevyt/skamol-kalsiumsilikaatti.html](http://www.abresto.fi/tuotteet/eristyslevyt/skamol-kalsiumsilikaatti.html), luettu 7.6.2016.
- 8 Rakennusalan tietopalvelun verkkosivut, [www.rakennustieto.fi](http://www.rakennustieto.fi), luettu 13.6.2016.
- 9 Eurokoodi verkkosivut, [www.eurocodes.fi](http://www.eurocodes.fi), luettu 14.6.2016.
- 10 Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Käsikirja-2010
- 11 SFS-EN 1993-1-1
- 12 SFS-EN 1993-1-2
- 13 SFS-EN 1363-2

## Laskentatyökalun lämpötila-aikakäyriä

Standardi- ja hiilivetypalokäytät eroavat toisistaan, koska palotilan lämpötila nousee hiilivetypalossa rajusti nopeammin, kuin standardipalossa.



Kuva 1. Lämpötila-aikakäyrien ero.