



TEKNIikka JA LIIKENNE

Rakennustekniikka

Rakennetekniikka

INSINÖÖRITYÖ

TERÄSRAKENTEEN PALOMITOITUS

**Työn tekijä: Tuomas Forsberg
Työn ohjaaja: Juhani Syrjä
Työn ohjaaja: Jouni Kalliomäki**

Työ hyväksytty: ____ . ____ . 2010

**Jouni Kalliomäki
lehtori**



ALKULAUSE

Tämä insinööri työ tehtiin insinööritoimisto Magnus Malmberg Oy:lle. Haluan kiittää projektissa mukana olleita.

Helsingissä 28.4.2010

Tuomas Forsberg

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Tuomas Forsberg	
Työn nimi: Teräsrakenteen palomitoitus	
Päivämäärä: 28.4.2010	Sivumäärä: 47 s.
Koulutusohjelma: Rakennustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Rakennetekniikka
Työn ohjaaja: lehtori Jouni Kalliomäki	
Työn ohjaaja: osastopäällikkö Juhani Syrjä	
<p>Tämä insinööri työ tehtiin Magnus Malmberg Oy:lle. Työn tarkoituksena oli luoda yleiskatsaus teräsrakenteiden palosuunnitteluun. Työssä selvitettiin myös, kuinka eurokoodien käyttöönotto vaikuttaa teräsrakenteiden palomitoitukseen.</p> <p>Insinööri työn osana ohjelmoitiin Excel-laskentapohja. Laskentapohja laskee teräsrakenteen lämpötilan kehityksen palotilanteessa ja antaa tietoa teräksen lujuusominaisuuksien muutoksista palotilanteessa.</p> <p>Työ sisältää yleisimmät palomitoitusta ohjaavat määräykset ja ohjeet, paloturvallisuusvaatimukset, palotilan lämpötilan kehityksen määrittämisperiaatteet, teräsrakenteen yleisimmät palosuojausmenetelmät ja -materiaalit, teräsrakenteen lämpötilan määrittämisperiaatteet, teräsrakenteen kestävyuden laskennan palotilanteessa sekä eurokoodin aiheuttamat muutokset palomitoitukseen.</p> <p>Työssä saatiin selville, että Suomen rakentamismääräyskokoelman paloturvallisuusvaatimukset voidaan täyttää rakentamalla ja suunnittelemalla rakennus noudattaen joko Suomen rakentamismääräyskokoelman paloluokkia ja lukuarvoja tai toiminnalliseen palomitoitukseen perustuen. Yksittäisen teräsrakenteen osalta palomitoitus voidaan tehdä joko eurokoodin tai rakentamismääräyskokoelman B7:n mukaisesti.</p> <p>Työssä saatiin selville, että B7:ään perustuvia palosuojaustuotteille myönnettyjä varmennettuja käyttöselosteita ei voida käyttää eurokoodin mukaisessa suunnittelussa. Eurokoodin mukaisessa suunnittelussa tuotteilta vaaditaan joko ETA-hyväksyntä tai CE-merkintä.</p> <p>Insinööri työ soveltuu hyvin teräsrakenteiden palomitoituksen perehdytysmateriaaliksi. Lisäksi sitä voidaan käyttää tämän työn ohessa ohjelmoidun laskentapohjan manuaalina.</p>	
Avainsanat: Teräsrakenne, Toiminnallinen palomitoitus, Standardipalo, CE-merkintä, Eurokoodi	

ABSTRACT

Name: Tuomas Forsberg	
Title: Fire Engineering Design of Steel Structures	
Date: 28 April 2010	Number of pages: 47 p.
Department: Civil Engineering	Study Programme: Structural Engineering
Instructor: Jouni Kalliomäki, Senior Lecturer	
Supervisor: Juhani Syrjä, Departmental manager	
<p>This graduate was done for Magnus Malmberg Oy. The purpose of this study was to give a general overview of fire engineering design of steel structures. The effect of the introduction of Eurocodes on the fire engineering design was also considered in this engineering study.</p> <p>As a part of this study, an Excel-program was created, which calculates the temperature of a steel structure in a fire situation. The Excel-program also gives information about the strength of steel in a fire situation.</p> <p>The study contains general instructions and regulations about fire engineering design, fire safety demands, the principles of determining the temperature of fire, general methods and materials of insulation of steel structures, the basics of determining the temperature of steel, the principles of determining the durability of steel structure and the effect of Eurocodes on the fire engineering design of steel structures.</p> <p>The study clarified that the fire safety demands in The National Building Code of Finland can be fulfilled by applying the fire classes and numerical criteria provided by The National Building Code of Finland. The fire safety demands can also be fulfilled by using performance-based fire engineering design. Individual steel structures can be designed by using the instructions given in the Eurocodes or using the instructions of part B7 in The National Building Code of Finland.</p> <p>The study also showed out that certified instructions of fire safety insulation products cannot be used when structures are designed by using Eurocodes. While using Eurocodes in the design, the fire safety insulation products have to have an ETA-approval or CE-marking.</p> <p>This engineering study is suitable for orientation of fire engineering design of steel structures. It can also be used as an instruction manual to the Excel-program created.</p>	
Keywords: Steel structure, Performance-based fire engineering design, Standard fire, CE-marking, Eurocodes	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tavoitteet	1
1.2	Tutkimuksen rakenne	1
2	LAINSÄÄDÄNTÖ, MÄÄRÄYKSET JA OHJEET	2
2.1	Pelastuslaki	3
2.2	Maankäyttö- ja rakennuslaki ja -asetus	3
2.3	Rakentamismääräyskokoelma	4
2.4	Eurokoodi	5
2.5	Varmennettu käyttöseloste	6
2.6	CE-merkintä ja ETA-hyväksyntä	6
3	PALOTURVALLISUUSVAATIMUSTEN TÄYTTYMINEN	8
4	PALOTILAN LÄMPÖTILAN KEHITYS	10
4.1	Standardipalo	11
4.2	Toiminnallinen palomitoitus	12
4.3	Laskentapohja	15
5	RAKENTEEN PALOSUOJAUS	17
5.1	Palosuojausmenetelmät	18
5.1.1	<i>Levyt</i>	20
5.1.2	<i>Ruiskutteet</i>	22
5.1.3	<i>Maali</i>	23
5.1.4	<i>Betoni ja tiili</i>	23
5.1.5	<i>Rappaus</i>	24
5.1.6	<i>Puu</i>	24
5.1.7	<i>Vesi</i>	24
5.2	Laskentapohja	24
6	TERÄKSEN LÄMPÖTILAN KEHITYS	25
6.1	Suojaamaton teräsrakenne	26

6.1.1	<i>Laskentapohja</i>	30
6.2	Palosuojattu rakenne	30
6.2.1	<i>Varmennettujen käyttöselosteiden vaikutus B7:n mukaiseen laskentaan</i>	32
6.2.2	<i>Laskentapohja</i>	34
7	TERÄSRAKENTEEN KESTÄVYYS PALOTILANTEESSA	36
7.1.1	<i>Eurokoodin mukaiset lujuusominaisuudet</i>	36
7.1.2	<i>B7:n mukaiset lujuusominaisuudet</i>	37
7.1.3	<i>Laskentapohja</i>	38
7.2	Teräsrakenteen kestävyys laskenta	38
7.2.1	<i>Yksinkertaistettu kriittisen lämpötilan laskenta</i>	40
8	EUROKOODIN VAIKUTUS PALOMITOITUKSEEN	42
8.1	Laskentapohja	43
9	YHTEENVETO	43
9.1	Tulokset	44
9.2	Laskentapohja ja sen soveltuvuus	44
	VIITELUETTELO	46

KÄSITELUETTELO

CE-merkintä	Conformité Européenne/European conformity, merkintä, joka osoittaa, että tuote on EU:n direktiivien mukainen
CEN	Comité Européen de Normalisation/European Committee for Standardization, Euroopan standardisointikomitea
EN	European Standard, eurooppalainen standardi, joka on laadittu CENissä
EOTA	The European Organisation for Technical Approvals, Eurooppalainen hyväksymislaitosten järjestelmä
ETA	A European Technical Approval, Eurooppalainen tekninen hyväksyntä
ETAG	A European Technical Approval guideline, Eurooppalainen tekninen hyväksyntäohje
Eurokoodi	Rakenteiden suunnitteluohjeet, jotka julkaistaan eurooppalaisina standardeina
hEN	Harmonized European Standard, EU:n rakennustuotedirektiiviin liittyvä yhdenmukaistettu tuotestandardi (harmonisoitu tuotestandardi)
Nordtest NT FIRE 021	Standardi, jossa annetaan ohjeet lämmönjohtavuuden määrittämiselle polttokokein.
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Standardisoinnin keskusjärjestö Suomessa
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoitteena on laatia kirjallisuusselvitys teräsrakenteiden palomitoituksesta. Insinööriyön osana ohjelmoidaan Excel-laskentapohja, joka laskee teräksen lämpötilan kehityksen palotilanteessa. Lämpötilan laskennan lisäksi laskentapohja antaa tietoa teräksen materiaaliominaisuuksien muutoksista tulipalon aikana. Laskentapohjan avulla eri palosuojausmenetelmiä pystytään varioimaan parhaan lopputuloksen löytämiseksi.

Insinööriyössä selvitetään myös, kuinka palotuotteiden ominaisuudet määritetään, kun kantavien rakenteiden suunnittelussa siirrytään kansallisista määräyksistä eurokoodien käyttöön.

1.2 Tutkimuksen rakenne

Kirjallisuusselvityksen avulla täsmentyy, mitkä tekijät on otettava huomioon teräsrakenteiden palomitoituksessa. Lisäksi selvitys toimii laskentapohjan käyttäjän manuaalina. Työ sisältää yleisimmät palomitoitusta ohjaavat määräykset ja ohjeet, paloturvallisuusvaatimukset, palotilan lämpötilan kehityksen määrittämisperiaatteet, teräsrakenteen yleisimmät palosuojausmenetelmät ja materiaalit, teräsrakenteen lämpötilan määrittämisperiaatteet, teräksen kestävyuden laskennan palotilanteessa sekä eurokoodin aiheuttamat muutokset palomitoitukseen. Työ on jaettu lukuihin, jotka käsittelevät edellä mainittuja aiheita. Jokaiseen lukuun on lisätty laskentapohjaa käsittelevä kappale, jossa esitetään laskentapohjaan valitut ratkaisut.

Ensimmäinen luku käsittelee määräyksiä ja ohjeita. Siihen on kerätty rakentamista ohjaavia kansallisia ja yleiseurooppalaisia käytäntöjä.

Paloturvallisuusvaatimuksia käsittelevässä luvussa selvitetään, kuinka paloturvallisuusvaatimusten täyttyminen voidaan osoittaa.

Palotilan lämpötilan kehittymistä käsittelevässä luvussa lämpötilan kehittymiseen ei perehdytä syventävästi, vaan sitä käsitellään yleisluontoisesti. Lämpötilan kehitys voi perustua joko standardin ISO-834 mukaiseen standardilämpötila-aikakäyrään tai toiminnalliseen palomitoitukseen, jossa huo-

mioidaan rakennusten erilaiset käyttötarkoitukset ja rakennuskohtaiset ominaisuudet.

Palosuojausmenetelmiä käsittelevässä luvussa esitellään, kuinka teräsrakenteita voidaan palosuojata. Vaikka esitetyt menetelmät soveltuvat erityisesti teräsrakenteiden suojaamiseen, on niiden käyttö tavallisesti mahdollista muidenkin rakennusmateriaalien palosuojamisessa.

Teräsrakenteen lämpötilan kehittymistä käsittelevässä luvussa vertaillaan SFS EN 1993-1-2 ja rakentamismääräyskokoelman B7 mukaisia laskentaperiaatteita. Lisäksi esitetään, kuinka laskenta suoritetaan varmennetuissa käyttöselosteissa.

Teräksen kestävyyttä palotilanteessa käsittelevässä luvussa selvitetään, kuinka teräsrakenteiden lujuusominaisuudet muuttuvat lämpötilan noustessa ja kuinka lujuusominaisuuksien muuttuminen huomioidaan kestävyuden laskennassa.

Eurokoodien vaikutusta palomitoitukseen käsittelevässä luvussa selvitetään, kuinka palosuojamateriaalien ominaisuuksien määrittäminen tapahtuu, kun rakenteiden suunnittelussa siirrytään rakentamismääräyskokoelman B-sarjan käytöstä eurokoodien käyttöön.

Viimeisessä luvussa esitetään yhteenveto tämän insinööriyön keskeisistä tuloksista sekä pohditaan työn käyttökelpoisuutta ja onnistumista.

2 LAINSÄÄDÄNTÖ, MÄÄRÄYKSET JA OHJEET

Rakentamista koskevia määräyksiä ja ohjeita on aina yleisluontoisista lakipykälästä täsmällisiin rakentamista koskeviin teknisiin asiakirjoihin. Tämän luvun tarkoituksena on selventää keskeisten määräysten ja ohjeiden sisältö ja hierarkia.

Insinööriyön kannalta keskeiset rakentamista ohjaavat määräykset koskevat paloturvallisuutta ja paloturvallisuuden täyttämistä.

Pelastuslaissa ja Maankäyttö- ja rakennuslaissa ja -asetuksessa määrätään paloturvallisuuden minimivaatimuksista. Rakentamismääräyskokoelma sen sijaan on laissa asetettuja määräyksiä koskeva tekninen asiakirja, jossa annetaan ohjeet siitä, kuinka lakien vaatimukset täytetään. Rakentamismää-

räyskokoelman B-osassa kerrotaan, kuinka kantavat rakenteet tulee Suomessa suunnitella. EU:ssa ollaan kuitenkin siirtymässä kantavien rakenteiden suunnittelussa eurokoodien käyttöön, ja eurokoodit tulevat korvaamaan nykyisen rakentamismääräyskokoelman B-sarjan. Eurokoodeihin siirtyminen tulee aiheuttamaan muutoksia kantavien rakenteiden suunnitteluun ja myös tämän insinööriyön kannalta keskeisiin paloturvallisuutta koskeviin menettelyihin.

Seuraavaksi kerrotaan hieman tarkemmin paloturvallisuuteen vaikuttavista määräyksistä ja ohjeista.

2.1 Pelastuslaki

Pelastuslakia sovelletaan tulipalojen ja muiden onnettomuuksien ehkäisyyn, pelastustoimintaan sekä väestönsuojeluun. Se on ylin rakennusten palo-suunnittelua ohjaava määräys, jota maankäyttö- ja rakennuslaki ja asetus ohjeineen ja määräyksineen tarkentavat. Pelastuslaissa sanotaan seuraavasti:

Rakennusten yleinen paloturvallisuus

Rakennus, rakennelma ja sen ympäristö on suunniteltava, rakennettava ja pidettävä kunnossa siten, että tulipalon syttymisen tai leviämisen vaara on vähäinen ja että pelastustoiminta on onnettomuuden sattuessa mahdollista. Suunnittelusta, rakentamisesta ja kunnossapidosta on lisäksi voimassa, mitä niistä säädetään maankäyttö- ja rakennuslaissa [132/1999] tai sen nojalla annetuissa säädöksissä. /1, 21 §./

2.2 Maankäyttö- ja rakennuslaki ja -asetus

Maankäyttö- ja rakennuslaki ja -asetus sisältävät säännöksiä muun muassa kaavoituksesta, kuntien rakennusjärjestyksestä, ranta-alueiden suunnittelusta ja rakentamisesta, tonttijaosta, yhdyskuntarakentamiseen liittyvästä lunnastamisesta, rakentamiselle asetettavista yleisistä vaatimuksista sekä rakentamisen luvista ja muusta rakentamisen valvonnasta.

Maankäyttö- ja rakennuslaissa ei oteta kantaa rakennusten suunnittelua koskeviin teknisiin asioihin, vaan se on yleinen kaavoitusta ja rakentamista koskeva laki. Lakia täydentäviä rakentamista koskevia teknisiä ja näitä vastaavia yleisiä määräyksiä ja ohjeita julkaistaan Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. /2, 13 §./

Maankäyttö- ja rakennuslakia täydentävässä maankäyttö- ja rakennusasetuksessa sanotaan paloturvallisuuteen liittyen kuitenkin seuraavasti:

Rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan /3, 50 §/.

Käytännössä lain vaatimus varmistetaan riittävällä rakenteilla tai rakenteen lämpötilan nousua rajoittamalla. Lämpötilan nousua voidaan rajoittaa joko rakenteita eristämällä tai rakenteen lämmönvaraamiskykyä parantamalla. Eristäminen ja lämmönvaraamiskyvyn parantaminen voidaan toteuttaa useilla eri menetelmillä ja materiaaleilla.

2.3 Rakentamismääräyskokoelma

Rakentamismääräyskokoelma (RakMK) on kokoelma ohjeita ja määräyksiä, joiden avulla pyritään varmistamaan rakentamisen riittävä laatu ja turvallisuustaso. Rakentamismääräyskokoelmassa sanotaan seuraavasti:

Rakentamismääräyskokoelman määräykset ovat velvoittavia. Ohjeet sen sijaan eivät ole velvoittavia, vaan muitakin kuin niissä esitetyjä ratkaisuja voidaan käyttää, jos ne täyttävät rakentamiselle asetetut vaatimukset.

Rakentamismääräyskokoelman määräykset koskevat uuden rakennuksen rakentamista. Rakennuksen korjaus- ja muutostyössä määräyksiä sovelletaan, jollei määräyksissä nimenomaisesti määrätä toisin, vain siltä osin kuin toimenpiteen laatu ja laajuus sekä rakennuksen tai sen osan mahdollisesti muutettava käyttötapa edellyttävät. /7./

Rakentamismääräyskokoelmassa on kuvattu konkreettisesti, kuinka pelastuslaissa ja maankäyttö- ja rakennuslaissa ja -asetuksessa esitetyt paloturvallisuusvaatimukset täytetään.

Rakennusten paloturvallisuutta käsitellään rakentamismääräyskokoelman E-sarjassa (Rakenteellinen paloturvallisuus) ja kantavien rakenteiden palomitoitusta B-sarjassa (Rakenteiden lujuus). Teräsrakenteiden palomitoitusta käsitellään kohdassa B7 (Teräsrakenteet) ja B6 (Teräsohutellevyrakenteet). /7./

Rakentamismääräyskokoelmassa rakennukset jaetaan kolmeen eri paloluokkaan P1, P2, P3. P1-luokkaan kuuluvan rakennuksen tulee kestää tulipalo sortumatta. Rakennukselle ei aseteta kokoa ja henkilömäärää rajoittavia vaatimuksia. P2-luokkaan kuuluvan rakennuksen paloturvallisuus saavu-

tetaan asettamalla vaatimuksia käytettäville pintamateriaaleille sekä rajoittamalla kerroslukua ja henkilömäärää. P2-luokan rakennukselle asetetut vaatimukset kantavien rakenteiden kestävyys suhteen ovat matalampia kuin P1-luokan rakennuksessa. P3-luokan rakennukselle ei aseteta vaatimuksia kantavien rakenteiden palonkeston suhteen, vaan riittävä turvallisuus saavutetaan rajoittamalla kerroslukua ja henkilömäärää. /8, s. 9./ Rakennuksen paloluokka vaikuttaa edellä mainittujen seikkojen lisäksi myös palo-osastointiin, jonka avulla palon leviämistä voidaan rajoittaa /8, s. 12/.

Rakennusosan kantavuudelle asetetut vaatimukset ilmaistaan luokkavaatimuksella, kuten esimerkiksi R30, missä R on kantavuusvaatimus ja 30 palonkestävyyssäika minuutteina. Kantavuuden mitoitus voi perustua standardilämpötila-aika käyrän mukaisiin rasituksiin tai oletetun palonkehityksen mukaisiin rasituksiin (toiminnallinen palomitoitus). /8, s. 15./

Rakentamismääräyskokoelman rinnalla on ollut mahdollista käyttää kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja eurokoodeja 1.11.2007 alkaen /4/.

2.4 Eurokoodi

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja. Ne on laatinut eurooppalainen standardisointijärjestö (CEN) Euroopan komission toimeksiannosta. Eurokoodit on kehitetty eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailun ja kilpailukyvyyn parantamiseksi sekä Euroopan Unionin alueella että muualla maailmassa. Yhteisillä määräyksillä pyritään poistamaan kaupan teknisiä esteitä ja edesauttamaan Euroopan Unionin integraatiota sekä parantamaan sisämarkkinoiden toimintaa. /4/

Eurokoodit kattavat varmuuden määrittämisperiaatteet, erilaiset kuormat kuten hyöty-, lumi- ja tuuli-, lämpö-, onnettomuus- ja nosturikuormat. Myös rakennusmateriaaleille on olemassa omat yksityiskohtaiset suunnitteluohjeet. Yhteensä eurokoodistandardeja on 58. Standardien soveltaminen edellyttää kansallisten liitteiden laatimista. Suomessa rakennuksia koskevien liitteiden laatimisesta vastaa ympäristöministeriö. Eurokoodeja saa siis käyttää vain yhdessä kansallisten liitteiden kanssa. /4/

Kokonaan eurokoodeihin pohjautuvaan kantavien rakenteiden suunnitteluun pyritään siirtymään vuoteen 2011 mennessä tai sen aikana. Ne tulevat kor-

vaamaan aikanaan kansalliset rakenteiden suunnittelua koskevat ohjeet ja määräykset (Rakentamismääräyskokoelman B-sarja). Eurokoodien ensimmäinen paketti otettiin käyttöön 1.11.2007, jonka jälkeen kantavien rakenteiden suunnittelu on voitu tehdä joko eurokoodien tai rakentamismääräyskokoelman mukaisesti. /4./

Rakenteiden palorasituksia käsitellään eurokoodin osassa EN 1991-1-2 (Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset) ja teräsrakenteiden palomitoitusta eurokoodin osassa EN 1993-1-2 (Rakenteellinen palomitoitus) /4/.

2.5 Varmennettu käyttöseloste

Varmennettu käyttöseloste Suomen rakentamismääräyskokoelmaan liittyvä rakennustuotteille laadittava tuoteohje, joka perustuu kokeisiin sekä muihin selvityksiin. Se sisältää tarpeelliset tiedot tuotteen ominaisuuksista, käyttökelppoisuudesta, käyttötavoista ja käyttöön liittyvistä seikoista. /21./

Palosuojatuotteiden osalta ominaisuuksien määrittäminen perustuu Nordtest standardiin NT FIRE 021 ja sen palosuojamaaleja koskevaan lisäohjeeseen. NT FIRE 021 on rakentamismääräyskokoelman B7:ssä hyväksytty menettely palosuojatuotteiden ominaisuuksien määrittämiseksi. Standardi NT FIRE 021 sisältää muun muassa ohjeet palosuojatuotteiden ominaisuuksien testausmenettelystä ja tulosten arvioinnista. /12, s. 52./

Käyttöselosteet tuotteille varmentaa ympäristöministeriön hyväksymä toimielin. Teräs- ja teräsohuttlevyrakenteissa käytettäville tuotteille käyttöselosteita varmentaa Teräsrakenneyhdistys ry. /20./

Varmennettujen käyttöselosteiden myöntäminen ja käyttäminen loppuu, kun rakenteiden suunnittelussa siirrytään eurokoodien käyttöön. Eurokoodeihin perustuvassa suunnittelussa tulee käyttää EU-direktiivien mukaisia tuotteita (CE-merkintä) tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän (ETA) saaneita tuotteita. CE-merkinnästä ja ETA-hyväksynnästä kerrotaan lisää seuraavassa luvussa. /15./

2.6 CE-merkintä ja ETA-hyväksyntä

Rakennustuotedirektiivi on EU-direktiivi, joka ohjaa kansallista lainsäädäntöä ja määräyksiä. Sen tarkoitus on parantaa EU:n sisämarkkinoiden kilpailukykyä yhdenmukaistamalla rakennustuotteita koskevia vaatimuksia. Direktiivis-

sä määrätään olennaiset terveyttä ja turvallisuutta koskevat vaatimukset. Harmonisoitu tuotestandardi (hEN) on Euroopan standardisointikomitean (CEN) laatima standardi, joka voidaan johtaa suoraan rakennustuotedirektiivissä esitetyistä vaatimuksista. CE-merkintä voidaan kiinnittää tuotteeseen, kun tuote täyttää harmonisoidussa tuotestandardissa esitetyt vaatimukset. CE-merkinnän myöntää Euroopan jäsenvaltioiden hyväksymä komissiolle ilmoitettu laitos. Suomessa CE-merkinnät myöntää Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). /22, s. 3 - 7./

Eurooppalainen tekninen hyväksyntä (ETA) vastaa CE-merkintää, ja sitä käytetään, kun tuotteelle ei ole olemassa harmonisoitua tuotestandardia tai kun tuote poikkeaa huomattavasti standardista. Käytännössä ETA-hyväksyntä tarkoittaa sitä, että tuotteelle voidaan myöntää CE-merkintä. /22, s. 4./

ETA-hyväksynnän myöntää Eurooppalainen hyväksymislaitosten järjestelmä (EOTA), joka koostuu EU:n jäsenvaltioiden nimeämistä organisaatioista. Suomen edustaja EOTA:ssa on VTT. VTT suorittaa tuotteelle vaadittavat testit, jotka tehdään EOTA:n laatimien Eurooppalaisten teknisten hyväksyntäohjeiden (ETAG) mukaisesti. /22, s. 4./

Suurimmalle osalle palosuojatuotteista ei ole olemassa harmonisoitua tuotestandardia. Tuotteiden valmistajien tulee hakea palosuojatuotteelle ETA-hyväksyntää. Palosuojatuotteille ETA-hyväksyntä myönnetään ETAG 018 mukaisesti. /15./ ETAG 018 sisältää esimerkiksi tuotteille asetetut vaatimukset, tuotteen ominaisuuksien testaamisessa käytettävän menetelmän, tulosten arviointimenettelyn ja listan tuotteilta vaadittavista dokumenteista /28/. Palosuojamateriaalien ominaisuuksien testausmenettely ja tulosten arviointi tehdään ETAG 018:n mukaisessa menettelyssä esistandardien ENV 13381-1, ENV 13381-2 tai ENV 13381-4 koemenetelmien mukaisesti /6, s. 25/. ETAG 018:n osa 2 sisältää ohjeet reaktiivisten pinnoitteiden, kuten palosuojamaalien, ominaisuuksien määrittämisestä. /24./ EOTA pitää luetteloa kaikista EU:n alueella myönnettyistä ETA-hyväksynnöistä /24/. Myös VTT:ltä voi tiedustella tuotteen hyväksyntätilanteesta, kuten

- kuuluuko tuote harmonisoidun standardisoinnin piiriin (CE-merkintä), jolloin hyväksyntää ei voi saada,
- onko tuotteelle olemassa ETA-hyväksyntäohje. /23./

3 PALOTURVALLISUUSVAATIMUSTEN TÄYTTYMINEN

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa E1 on esitetty rakennuksia koskevat paloturvallisuusvaatimukset. Osan E1 mukaan rakenteiden tulee kestää palon sattuessa niille asetetun vähimmäisajan. Muut paloturvallisuutta koskevat vaatimukset liittyvät henkilöturvallisuuteen, palon leviämisen rajoittamiseen, pelastustoiminnan mahdollistamiseen ja turvaamiseen sekä aineellisten tuhojen minimointiin. Seuraavassa on lueteltu olennaiset rakentamismääräyskokoelmassa esitetyt vaatimukset /8, s. 6/:

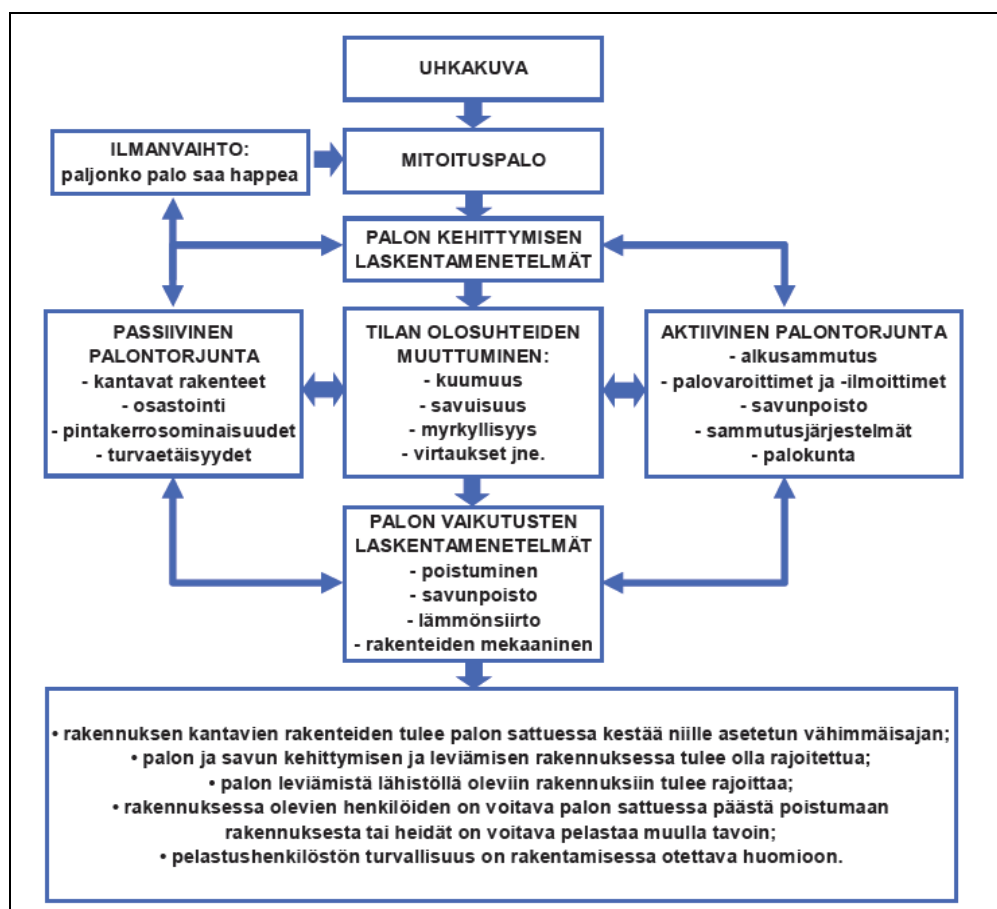
- Kantavien rakenteiden tulee kestää sortumatta niille asetetun vähimmäisajan.
- Palon ja savun kehittymistä ja leviämistä tulee rajoittaa.
- Palon leviäminen lähirakennuksiin tulee estää.
- Ihmisten tulee pystyä poistumaan tai heidät tulee pystyä pelastamaan palon sattuessa.
- Pelastushenkilökunnan turvallisuus ja toimintamahdollisuudet tulee varmistaa.

Paloturvallisuusvaatimusten katsotaan täyttyvän, kun rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa noudatetaan rakentamismääräyskokoelman määräyksiä ja ohjeita /13/. Rakentamismääräyskokoelmaan perustuva menettely on kuitenkin jäykkä ohjeisiin perustuva menettely, joka ei huomioi kaikki rakennuksen erityispiirteitä, kuten esimerkiksi sprinklauksen vaikutusta palon kehitykseen. Joustavampi tapa paloturvallisuusvaatimusten täyttämiseksi on toiminnalliseen palomitoitukseen perustuva menettely. /8, s. 6./

Toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvassa menettelyssä rakennus suunnitellaan ja rakennetaan perustuen oletettuun palonkehitykseen. Oletettu palonkehitys perustuu arvioon todennäköisistä rakennuksessa esiintyvistä palotilanteista. Paloturvallisuusvaatimuksien täyttymisen todentamisessa otetaan huomioon rakennuksen ominaisuudet ja käyttö tapauskohtaisesti. Rakenteisiin kohdistuvien palokuormien lisäksi myös vaadittu palonkesto aika määritetään siis tapauskohtaisesti. /13./

Toiminnallinen palomitoitus on sekä kotimaisissa (RakMK) että eurooppalaisissa viranomaismääräyksissä (EN-standardit) hyväksytty menetelmä paloturvallisuuden varmistamiseksi /8, s. 6/.

Kuvassa 1 on esitetty toiminnallisen palosuunnittelun tärkeimmät osatekijät ja niiden riippuvuudet.



Kuva 1. Toiminnallisen palomitoituksen tärkeimmät osatekijät ja riippuvuudet /18, s. 3/.

Toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvat tapauskohtaiset palomallit soveltuvat periaatteessa kaikkiin rakennuksiin ja tiloihin. Parhaiten ne soveltuvat kuitenkin suuriin tiloihin, kuten ostoskeskuksiin ja urheilutiloihin, jolloin tilojen erityisominaisuudet tulevat paremmin huomioitua. Toiminnallisen palomitoituksen avulla voidaan ottaa huomioon rakennuksen yksilölliset ominaispiirteet. Lisäksi sen avulla rakenteiden paloturvallisuussuunnittelussa voidaan huomioida passiiviset palontorjuntatoimet, esimerkiksi palo-osastointi, ja aktiiviset toimet, esimerkiksi sprinklaus. /14, s. 10./ Paloskenaarioiden valitsemiseen, lämpötilan kehityksen laskentaan ja esimerkiksi automaattisten sammutuslaitteistojen vaikutuksen onnistuneeseen arviointiin tarvitaan kuitenkin laajaa paloturvallisuussuunnittelun asiantuntemusta ja kokemusta. Suunnittelun perusteet, käytetyt laskentamenetelmät ja tulokset on esitettävä rakennuslupamenettelyn yhteydessä. /8, s. 7./

4 PALOTILAN LÄMPÖTILAN KEHITYS

Kaikkien materiaalien lujuusominaisuudet heikkenevät lämpötilan noustessa. Lujuuden heikentyminen tulee huomioida rakenteiden kestävyysmitoituksessa. Rakenteen lämpötilan nousuun vaikuttaa voimakkaasti palotilan lämpötilan kehitys.

Rakenteiden palonkestävyysaikaa arvioitaessa palotilan lämpötilan oletetaan kehittyvän joko nimellisen lämpötilakäyrän mukaisesti tai toiminnallisen palomitoituksen perusteella saadun oletetun lämpötilan kehityksen mukaisesti /10, s. 8/.

Nimelliseen lämpötilakäyrään perustuva palomitoitus soveltuu pieniin ja keskisuuriin tavanomaisiin rakennuksiin ja tiloihin. Nimelliset lämpötilakäyrät ovat vakiokäyriä, jotka eivät ota huomioon tilan erityispiirteitä. Palotilan lämpötilan oletetaan olevan kaikkialla tilassa yhtä suuri. Nimellisiin lämpötilakäyriin perustuva laskenta on yksinkertainen suorittaa, mutta voi johtaa merkittäväänkin ylimitoitukseen. Ylimitoitus aiheutuu siitä, että nimellisten lämpötilakäyrien palon kehitys on todellista lämpötilan kehitystä rajumpaa. /14. s. 10./ Erilaisia nimellisiä mitoituspälokäyriä ovat standardipälokäyrä, ulkopuolisen palon käyrä ja hiilivetykäyrä /5, s. 40 - 42/.

Toiminnallinen palomitoitus perustuu oletettuun palonkehitykseen, joka arvioidaan tapauskohtaisesti. Lämpötilan kehitys pystytään arvioimaan huomattavasti todenmukaisemmin kuin käyttämällä nimellisiä lämpötilakäyriä, mutta toiminnallinen palomitoitus vaatii kehittyneitä laskentaa ja erittäin kokeneen palosuunnittelijan.

Rakenteet voidaan siis suunnitella olettaen, että tulipalo aiheuttaa nimellispalon mukaisen lämpötilan kehityksen tai sitten lämpötilan kehitys pitää mallintaa toiminnallisen palomitoituksen avulla. Palotilan lämpötilan kehityksen mallintamiselle ja mallintajalle on asetettu kuitenkin tiukat viranomaisvaatimukset.

Tässä insinööriyössä nimellispalonkäyristä hiilivetyälokäyrä ja ulkopuolisen palon käyrä rajataan työn ulkopuolelle. Työssä tarkastellaan vain standardipälokäyrän mukaista lämpötilan kehitystä ja toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvaa lämpötilankehitystä.

4.1 Standardipalo

Yksinkertaisimmillaan palotilan lämpötilan kehitystä kuvataan standardilämpötila-aikakäyrällä, joka kuvaa kaasun lämpötilan nousua ajan funktiona.

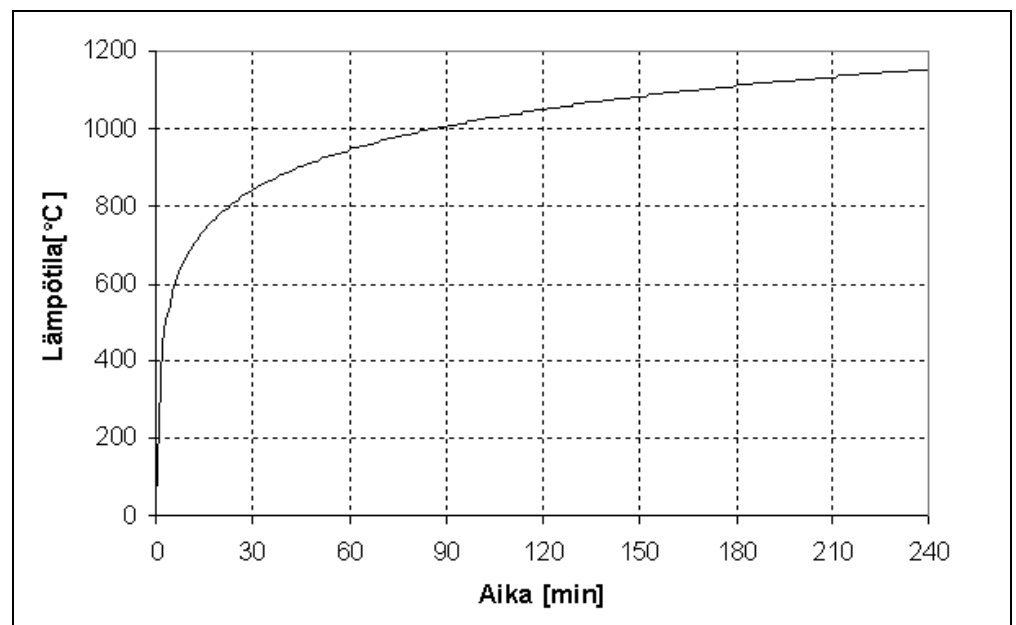
Standardilämpötila-aikakäyrä (ISO-834) lasketaan kaavasta 1.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1),$$

missä

θ_g on kaasun lämpötila palotilassa [°C]

t on aika [min].



Kuva 2. Standardi lämpötila-aikakäyrä /10, s. 9/.

Standardipalossa lämpötilan nousu on aluksi hyvin jyrkkää ja jatkaa hitaampaa nousua tarkastelun lopettamiseen saakka (Kuva 2). Todellisella tulipalolla on kuitenkin useita erilaisia palovaiheita ja ominaisuuksia, joita standardipalo ei ota huomioon. Standardipalossa ei huomioida esimerkiksi palotilan geometriaa, palokuorman tyyppiä, sijaintia eikä palon saamaa hapen määrää. Lisäksi palotilan lämpötilan oletetaan vaikuttavan koko tilassa riippumatta tilan koosta eikä tulipalon oleteta loppuvan koskaan. Standardipalon käyttö mitoituspaloa johtaakin usein rakenteiden ylimitoitukseen. Ylimitoitus ai-

heutuu siitä, että standardipalon tulee kattaa rasituksiltaan kaikki palotilanteiden variaatiot. Standardipalon käyttö mitoituspalona soveltuukin parhaiten vain pienien ja tavanomaisten tilojen palomitoitukseen. /13./

Tarkemman approksimaation palotilan lämpötilan kehityksestä antaa toiminnalliseen palonkehitykseen perustuva mitoitus, joka huomioi palon todelliset ominaisuudet. Mutta kuten edellä mainittiin, toiminnallisen palomitoituksen laskenta on vaikea suorittaa ja edellyttää kehittyneiden tietokoneohjelmistojen käyttöä. Siksi pieniä ja tavanomaisia tiloja ei ole mielekästä mitoittaa todelliseen palonkehitykseen perustuvan lämpötilankehityksen perusteella.

4.2 Toiminnallinen palomitoitus

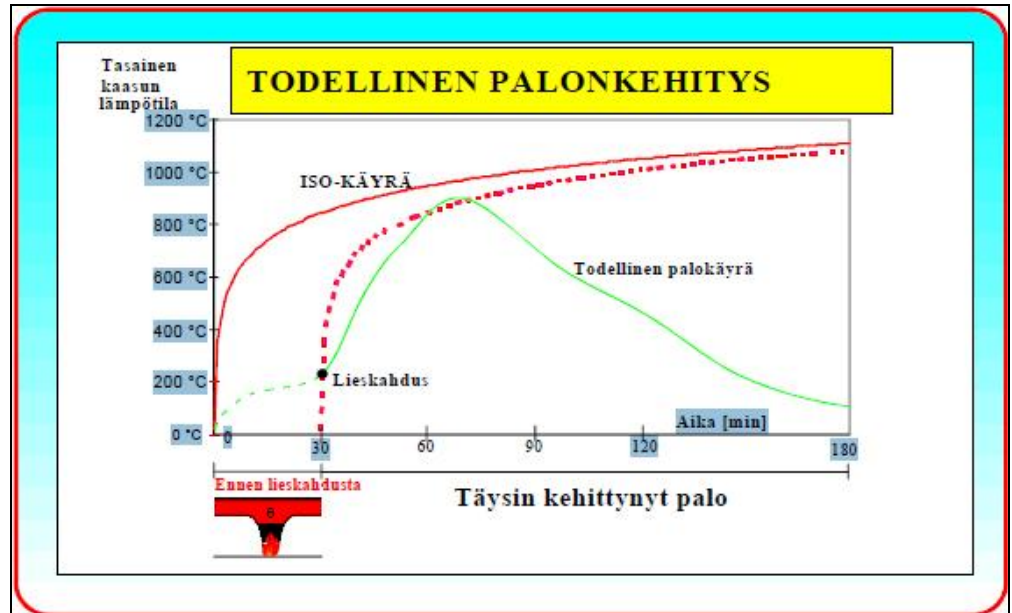
Toiminnallisella palomitoituksella pyritään huomioimaan kaikki paloon vaikuttavat seikat ja luomaan todellista palonkehitystä kuvaava malli. Todellisen palon vaiheita ovat /13/:

- **Kytemisvaihe**
 - Kytemisvaiheeseen lasketaan kuuluvan syttyminen ja kytevä palo, jonka kesto on kuitenkin vaikea arvioida.
- **Kasvuvaihe**
 - Lieskahdusta edeltävä vaihe (paikallinen palo tai leviävä palo). Vaiheen kesto riippuu pääosin palo-osaston ominaisuuksista.
- **Lieskahdus**
 - Koko tilan yleispalovaihe, jonka kesto on yleensä melko lyhyt. Tapahtuu silloin, kun rajatussa tilassa tapahtuvassa palossa eli rakennuspalossa palavan huonetilan yläosaan kertyneet palokaasut syttyvät äkillisesti ja palotilan tarvikkeiden pinnat syttyvät kokonaan.
- **Lieskahduksen jälkeinen vaihe**
 - Vaiheen kesto riippuu palokuormasta ja ilmanvaihdosta. Tässä vaiheessa palo on tehokkaimmillaan ja lämpötilat korkeimmillaan.

- **Hiipumisvaihe**

- Palo alkaa hiipua, kun syttyvä materiaali on palanut.

Standardipalon ja todellisen palon kehityksen erot ovat hyvin havaittavissa kuvasta 3.



Kuva 3. Standardikäyrä (ISO) sekä todellisen palon vaiheet /13/.

Erlaisia paloskenaarioita on olemassa lukematon määrä, mutta vain osa niistä on kriittisiä ja vaatii laajempaa tarkastelua. Skenaarioille on määritettävä esiintymistodennäköisyys ja kriittisyysaste, joiden perusteella kriittiset paloskenaariot valitaan. /13./

Tarkasteltavien paloskenaarioiden lämpötilan kehittymistä voidaan kuvata yksinkertaisilla malleilla tai virtauslaskennan ja palamisen reaktioid yhdistäville kehittyneillä malleilla. /10, s. 8./

- Yksinkertaiset mallit: parametrinen palo (huonepalo) ja paikallinen palo
- Kehittyneet mallit: vyöhyke- ja kenttämallit

Yksinkertaiset palomallit perustuvat niille ominaisiin, rajallisiin fysikaalisiin parametreihin. Niitä käytetään usein esisuunnitteluvaiheessa tai jos tilan yksinkertaisuudesta ja tavanomaisuudesta johtuen tarkempien mallien käyttö ei ole mielekästä. Tarkimman kuvan todellisesta palonkehityksestä antavat kehittyneemmät vyöhyke- ja kenttämallit. Kehittyneet palomallit huomioivat

kaasun ominaisuuksia, massan- ja energian vaihtumista, virtausdynamiikkaa ja lämpötilan epätasaista jakautumista. /19, s. 5 - 6./

Yksinkertaiset mallit

Eurokoodi mahdollistaa parametrinen palomallin käytön, kun tilan lattiapinta-ala on enintään 500 m², kun katossa ei ole aukkoja ja korkeus on enintään 4 m. Parametrinen palon mallissa otetaan huomioon ainakin palokuorman tiheys ja ilmanvaihto. /5, s. 50./ Parametrisessa palossa lämpötilojen oletetaan olevan samansuuruiset koko tarkasteltavassa tilassa. Menetelmää voidaan soveltaa vain rajallisesti, eikä se huomioi kaikkia palonkehitykseen ja vaadittavaan palonkesto aikaan vaikuttavia tekijöitä. Menetelmä antaa kuitenkin jo huomattavasti realistisemmän kuvan palotilan lämpötilan kehittymisestä kuin standardipalon käyrä. /19, s. 6./

Paikallisella palolla tarkoitetaan paloa, jossa tilan lieskahtamista ei tapahdu, vaan palo jää paikalliseksi. Paloteho on myös alhainen tilan kokoon nähden. Kaikki palot ovat aluksi paikallisia paloja, mutta isossa tilassa palo saattaa säilyä paikallisena palon alusta loppuun saakka. Palon kehittymistä arvioidaan aikaisempien laskelmien sekä laboratoriokokeiden perusteella. Laskennassa voidaan käyttää virtausmekaniikan menetelmiä. /17, s. 19 - 22./

Kehittyneet mallit

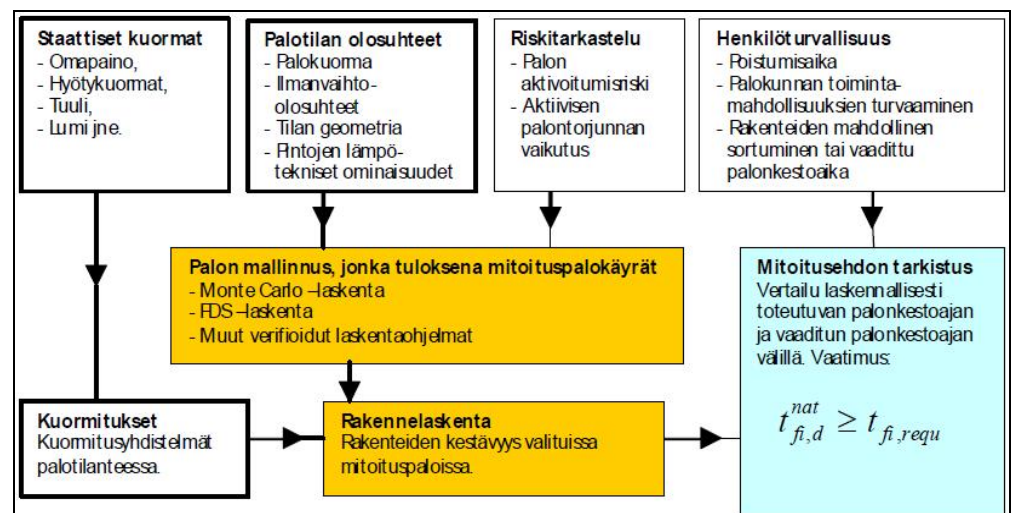
Vyöhykemalleilla voidaan ottaa huomioon kaikki tärkeimmät paloon vaikuttavat tekijät /8/. Vyöhykemalli on tietokonemalli, jossa tutkittava tila jaetaan eri vyöhykkeisiin. Yksivyöhykemalleissa tilan lämpötila oletetaan kaikkialla yhtä suureksi. Kaksivyöhykemalleissa tila jaetaan kahteen vyöhykkeeseen, kuumaan ylävyöhykkeeseen ja kylmään alavyöhykkeeseen. Jotkin mallit mahdollistavat vaihdon yksivyöhykemallista kaksivyöhykemalliin, kun tietyt olosuhteet saavutetaan (esim. lieskahdus). Tietokonemallin pohjana olevat yhtälöt perustuvat kokeellisiin testeihin ja malleista saatuihin havaintoihin. Syötettävät tiedot ovat yleensä tietoja huoneen geometriasta ja rakenteesta, ilmastointiaukkojen määrästä ja koosta sekä irtaimistosta. Erilaisia vyöhykemalleihin perustuvia tietokoneohjelmia on lukuisia, savunhallinnan suunnittelutyökaluista monivyöhykemalleja hyödyntäviin ohjelmiin, joilla lämmön siirtymistä voidaan tehokkaasti mallintaa. /16, s. 5 - 8./

Kenttämallit ovat ainoa keino laskea monimutkaista geometriaa omaavia kohteita /13/. Kenttämalleissa voidaan ottaa huomioon erilaisia vyöhykkeitä, mutta kenttämallisissa erilaisia vyöhykkeitä voi olla tuhansia. Kenttämalleissa tietokone laskee jokaiselle vyöhykkeelle ajasta riippuvaisia differentiaaliyhtälöitä. Laskenta on aikaa vievää ja vaikeaa, mutta mahdollistaa monimutkaisemman tilageometrian ja vähentää olettamuksen määrää. Syötettävät tiedot ovat samoja kuin vyöhykemalleissa, mutta niiden lisäksi voidaan lisätä tietoja polttoaineen tai palamisen ominaispiirteistä sekä pyörteiden- ja säteilyn parametreista. Kenttämalleihin perustuvilla tietokoneohjelmilla saadaan tietoa esimerkiksi savun liikkeistä ja sprinklerisuihkujen vaikutuksesta. /16, s. 8 - 9./

Rakenteen palonkeston varmistaminen

Paloturvallisuuden varmistaminen voidaan tehdä vertaamalla rakenteen vaadittua palonkestoaikaa ja laskennallisesti toteutuvaa rakenteen palonkestoaikaa. Huomioitavaa on kuitenkin, että myös vaadittu palonkesto aika määritetään toiminnallisesti. /13./

Kuvassa 4 on kuvattu toiminnallisen palomitoituksen kulku pääpiirteissään.



Kuva 4. Toiminnallisen palomitoituksen kulku yksinkertaistettuna /8/.

4.3 Laskentapohja

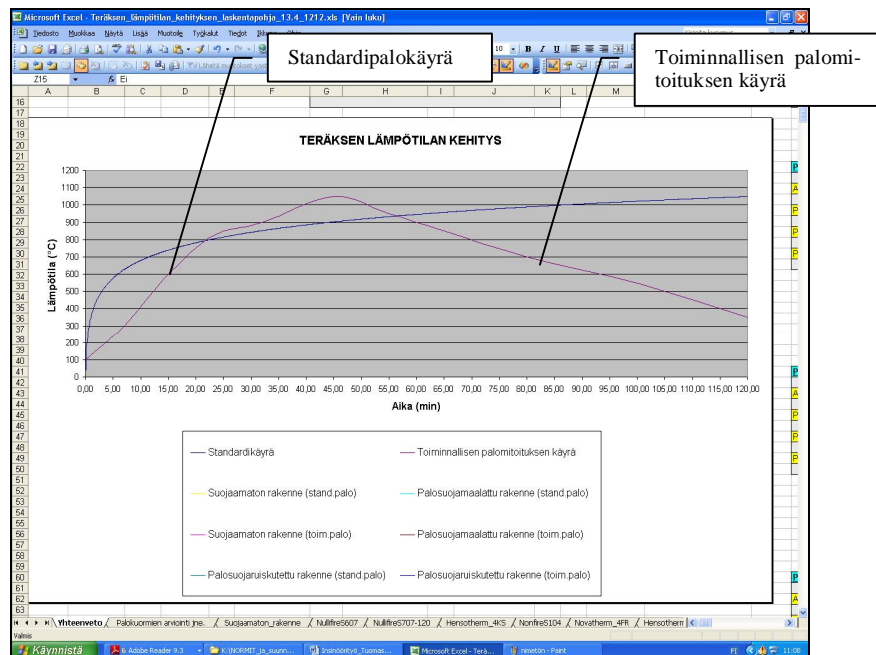
Insinööriyön yhtenä osana tehty laskentapohja laskee standardipalon mukaisen palotilan lämpötilan kehityksen. Mitoituspalon perustuessa toiminnalliseen palomitoitukseen tulee laskentapohjan käyttäjän määrittellä palotilan lämpötilan kehitys syöttämällä eri ajanhetkillä vaikuttavia lämpötiloja (Kuva

5). Sekä ajanhetket että palotilan lämpötilat ovat vapaasti valittavissa, mutta ajanhetkien lukumäärä on rajoitettu. Syötettyjen pisteiden väliarvot laskentapohja interpoloi lineaarisesti. Pisteiden avulla käyttäjän tulee mahdollisimman hyvin pyrkiä jäljittelemään todellista palonkehitystä. Palotilan lämpötilan oletetaan olevan kaikkialla yhtä suuri. Kuvassa 6 on esitetty standardipaloon ja toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvat palotilan lämpötilakäyrät laskentapohjassa.

TOIMINNALLINEN PALOMITOITUS	
Aika [min]	Lämpötila [°C]
0	100
7	300
15	600
23	820
32	900
45	1050
55	950
65	850
80	700
100	550
120	350

PIIRTOTYÖKALU	
Piirrä standardikäyrä	
Piirrä toiminnallinenkäyrä	
Piirrä suojaamattoman käyrä (stand.palo)	
Piirrä suojaamattoman käyrä (toim.palo)	
Piirrä maalatun käyrä (stand.palo)	
Piirrä maalatun käyrä (toim.palo)	
Piirrä ruiskutetun käyrä (stand.palo)	
Piirrä ruiskutetun käyrä (toim.palo)	

Kuva 5. Toiminnallisen palomitoituksen lämpötilat eri ajanhetkillä laskentapohja.



Kuva 6. Standardikäyrä ja toiminnallisen palomitoituksen käyrä laskentapohjassa.

Laskentapohja on ohjelmoitu siten, että se huomauttaa käyttäjää, jos toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvan lämpötilan kehityksen kokonaispalokuorma astesekunteina on suurempi kuin standardipalon palokuorma (Kuva 7). Suunnittelijan tulee tällöin arvioida toiminnalliseen palomitoitukseen sisältyviä riskejä laskentapohjan kannalta. Toiminnalliseen palomitoitukseen sisältyvistä riskeistä kerrotaan luvussa 6.2.2.

	O	P	Q	R	S	T	U	V
2								
3		PALOKUORMA [°Cmin]						PIIRI
4		Aika [min]	Stand.k	Toim.käyrä	Erotus			
5		10	5368	2468,75	2898,8	OK		Piiri
6		20	12725	8343,75	4381,2	OK		Piiri
7		30	20861	17046,111	3814,9	OK		Piiri
8		40	29504	27741,154	1762,8	OK		Piiri
9		50	38524	38895	-370,76	HUOM!		Piiri
10		60	47845	48520	-674,51	HUOM!		Piiri
11		70	57417	57020	397,11	OK		Piiri
12		80	67203	64520	2683,1	OK		Piiri
13		90	77177	71145	6031,6	OK		Piiri
14		100	87317	77020	10297	OK		Piiri
15		110	97607	82020	15587	OK		Piiri
16		120	1E+05	86020	22013	OK		Piiri
17								Piiri
18								Piiri
19								Piiri
20								Piiri
21								Piiri

Kuva 7. Palokuormat astesekunteina laskentapohjassa.

5 RAKENTEEN PALOSUOJAUS

Rakenteen palonaikainen stabiilitietin ja lujuuden säilyminen on pelastautumisen ja pelastustoiminnan kannalta erittäin tärkeää. Rakenteet tulee mitoitaa siten, että niillä on riittävä palonaikainen kestävyys sortumista vastaan. Palonkestävyysvaatimukset esitetään aikaluokkina, jonka ajan rakenteen tulee kestää sortumatta. Lisäksi osastoivien rakenteiden tulee estää palonvastaisten pintojen liiallinen lämpötilan nousu sekä liekkiä läpäisy. /11./

Kantavien rakenteiden riittävä palonaikainen kestävyys varmistetaan käyttämällä riittävän kestäviä rakenteita tai rakenneosan lämpötilan nousua rajoittamalla. Lämpötilan nousua voidaan rajoittaa joko paloeristämällä rakenteen tai rakenteen lämmönvaraamiskykyä parantamalla.

Betonirakenteiden osalta riittävä kestävyys saavutetaan yleensä ilman erillistä palosuojausta, koska betoni säilyttää hyvin lujuusominaisuutensa palon

aikana. Sen sijaan teräsbetonissa sijaitsevat betoniteräksiset menettävät nopeasti lujuusominaisuutensa lämpötilan noustessa (luku 7.1). Lämpötilan nousu heikentää lisäksi teräksen ja betonin tartuntaa. Teräsbetonirakenteiden palonkestävyyden varmistamiseksi onkin betoniterästen suojaaminen riittävän paksulla suojabetonikerroksella ensiarvoisen tärkeää. Suojabetonikerros eristää teräsrakenteen ja pitää sen lämpötilan riittävän alhaisena.

Teräksen mekaaniset ominaisuudet heikkenevät voimakkaasti lämpötilan noustessa. Hyvien normaalilämpötilan lujuusominaisuuksien vuoksi teräksestä tehdyt rakenteet ovat usein hoikkia. Tulipalon sattuessa teräsrakenteet menettävätkin helposti stabiiliutensa. Riittävää kestävyyttä ei siksi useimmiten voida saavuttaa ilman palosuojausta.

Palosuojausmenetelmän valintaan vaikuttavat asennus- ja käyttöolosuhteet sekä kustannukset. Kustannusvertailussa tulee ottaa huomioon hankinta- ja asennuskustannusten lisäksi myös huoltokustannukset ja palosuojuatuotteen elinkaari. /12, s. 51./ Palosuojausmenetelmiä ja -materiaaleja ei voida kuitenkaan asettaa yleiseen paremmuusjärjestykseen, vaan menetelmän ja materiaalin valinta tehdään kussakin tapauksessa erikseen. Lopulliseen valintaan vaikuttavat usein arkkitehtoniset seikat.

5.1 Palosuojausmenetelmät

Palosuojauksessa käytetään joko lämmöneristämiseen perustuvia tai rakenteen lämmönvaraamiskykyä parantavia menetelmiä. Jotkin palosuojausmenetelmät, esimerkiksi kipsilevytys, sisältävät lämmöneristysominaisuuden lisäksi veden höyrystymiseen perustuvan palon vaikutusta hidastavan ominaisuuden. Materiaalin sisältämän veden höyrystyminen sitoo palon lämpöenergiaa ja vähentää siten teräsrakenteeseen siirtyvää lämpökuormaa.

Teräsrakenteen lämmönvaraamiskyvyn parantaminen voidaan toteuttaa täyttämällä teräsputki joko betonilla tai vedellä, jolloin suuri osa teräkseen tulevasta lämmöstä siirtyy rakenteen sisäosiin.

Teräsrakenteen eristämiseen perustuvat menetelmät voidaan toteuttaa palosuojalevytyksellä, -ruiskutteella, -maalilla, -rappauksella, -betonilla tai muurauksella. Myös alaslaskettua kattoa voidaan käyttää välipohjarakenteiden palosuojauksena. Alaslaskettua kattoa käytettäessä on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteen tiiviyyteen, jotta palokaasut ja lämpö eivät

pääse palosuojalevyjen saumakohtista alaslasketun katon ja välipohjarakenteen väliseen tilaan. /12, s. 51./

Palosuojausmenetelmät voidaan jakaa kuiviin ja märkiin menetelmiin toteutustavan perusteella. Kuiviin menetelmiin perustuvat tuotteet kiinnitetään yleensä mekaanisilla kiinnikkeillä suojattavaan rakenteeseen tai koteloksi rakenteen ympärille. Asennuksessa on noudatettava tuotekohtaisia ehtoja ja ohjeita. /12, s. 51./

Kuivia menetelmiä ovat:

- mineraalivillalevyt, vermikuliittilevyt, perliittilevyt, kalsiumsilikaattilevyt, puukipsilevyt, kipsilevyt ja -elementit, sementti-selluloosalevyt,
- tiili, kevytbetoniharkko,
- puu.

Märkiä menetelmiä ovat:

- mineraalikuitu- ja vermikuliittiruiskutus,
- palosuojamaali,
- rappaus,
- betoni,
- vesi.

Suojauspaksuuteen vaikuttavat palosuojamateriaalin ominaisuuksista lämmönjohtavuus, kosteussisältö, ominaislämpö sekä tiheys. Palosuojamateriaalin lämpötila vaikuttaa materiaalin aineominaisuuksiin ja erityisesti lämmönjohtavuuteen.

Jos palosuojamateriaalille ei ole määritetty luotettavia lämpötilan mukaan muuttuvia lämmönjohtavuuden arvoja, rajoittuu kyseisen materiaalin käyttö tavallisesti standardipalon mukaiseen mitoitukseen. Materiaalin lämmönjohtavuuden arvona käytetään tällöin materiaalille yleisesti hyväksyttyä vakioarvoa. Koska lämpötilan vaikutus palosuojaa-aineiden tiheyteen ja ominaisläm-

pöön on usein vähäinen, myös niiden arvoina käytetään tavallisesti vakioarvoja.

Kun mitoituspalo perustuu toiminnalliseen palomitoitukseen, edellytetään lämpötilan mukaan muuttuvia lämmönjohtavuuden arvoja. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa palosuojamateriaalien lämmönjohtavuuden arvot on määritetty yleensä Nordtest standardin NT FIRE 021 mukaan. Lämmönjohtavuuden arvot kerrotaan tuotteille myönnettyissä varmennetuissa käyttöselosteissa. /12, s. 51 - 52./

5.1.1 Levyt

Mineraalivillalevyt

Mineraalivillalevyt ovat tehokkaita lämmöneristeitä. Mineraalivillalevyjä voidaan käyttää palosuojaukseen, jos niiden sintraantumislämpötila on riittävän korkea 800–1100 °C. Levyjen tiheys on 100–400 kg/m³, ja niiden paksuus vaihtelee 10–120 mm. Levyt kiinnitetään joko mekaanisesti tai liimaamalla. Liimatessa tulee alustan olla puhdas ja kuiva. Asennuksen yhteydessä on kiinnitettävä huomiota saumojen tiivyyteen. /12, s. 52./

Vermikuliittilevyt

Vermikuliittilevyjen perusaineena on paisutettu kille ja sideaineena silikaattipitoinen materiaali kuten sementti. Materiaalin palosuojauskyky perustuu sen sisältämään suureen vesimäärään sekä hyvään lämmöneristävytyteen. Tulipalon alkuvaiheessa lämpöenergiaa kuluu materiaalin sideaineen sisältämän veden höyrystymiseen. Vermikuliittilevyjen tiheys on 350–500 kg/m³ ja levyjen paksuus 16–80 mm. /12, s. 53./

Levyt kiinnitetään yleensä lämpöä kestävästä laastin ja nauhojen tai ruuvien avulla. Levyt voidaan kiinnittää alustaan myös liimaamalla. Tällöin on kuitenkin huolehdittava alustan puhtaudesta. Liimauksen edellytyksenä on yli 0 °C:n lämpötila. /12, s. 53./

Kalsiumsilikaattilevyt

Kalsiumsilikaattilevyt ovat kuituvahvistettuja, ja niiden paksuus vaihtelee 6–65 mm. Levyjen tiheys on yleensä 430–950 kg/m³, ja levyjä voidaan käsitellä

puuntyöstövälineillä. Levyt kiinnitetään yleensä rakenteen ympärille koteloksi itseporautuvien ruuvein tai hakasin. /12, s. 53./

Kipsilevyt ja -elementit

Kipsilevyjen palosuojausominaisuus perustuu, kuten vermikuliittilevyjenkin, runsaaseen kideveden määrään, jonka höyrystymiseen kuluu lämpöenergiaa. Kideveden haihduttua levy rikkoontuu ja sen eristämiskyky lakkaa. Levyjä voidaan vahvistaa lisäämällä levyyn lasikuituja parantamaan levyn pysymistä ehjänä. Kipsilevyt valmistetaan yleensä kipsin, perliitin ja lasikuidun seoksesta.

Kipsilevyjen tiheys on 770–980 kg/m³. Suojauksessa käytetään yleensä 13 mm paksuja levyjä yhtenä tai useampana kerroksena. Levyt kiinnitetään suojattavan rakenteen ympärille teräsohutlevyjen avulla. [12, s. 55.]

Puukipsilevyt

Puukipsilevyt valmistetaan puukuidun ja kipsin seoksesta puristamalla. Levyjen tiheys on 1200 kg/m³ ja paksuus 15 tai 22 mm. Kiinnityksessä käytetään ruuveja tai nautoja. /12, s. 55./

Sementti-selluloosa-levyt

Sementti-selluloosa-levyjen valmistuksessa käytetään sementtiä, selluloosaa ja erilaisia mineraalisia ainesosia. Levyjen tiheys on 1100 kg/m³. Levyjä käytetään enimmäkseen kevyissä osastoivissa seinissä. Levyt kiinnitetään suoraan teräsrunkoon joko ruuveilla tai kiinnityslistojen avulla. /12, s. 56./



Kuva 8. Mineraalivillalevyllä suojattua rakennetta /26/.

5.1.2 Ruiskutteet

Ruiskutteiden palosuojauskyky perustuu lämmöneristävyyteen. Jotkin valmisteet sisältävät myös sitoutunutta vettä, jonka höyrystyminen sitoo lämpöenergiaa. Palosuojaruiskutteiden etuna levytykseen verrattuna on menetelmän soveltuminen mutkikkaitten ja sokkeloisten pintojen suojaukseen sekä palosuojauksen saumattomuus. Tartunnan varmistamiseksi pintojen on oltava puhtaita. Mikäli eristepaksuus on alle 45 mm, ei yleensä tarvita tukiraudoitusta. Tarvittaessa voidaan kuitenkin käyttää sinkittyä teräsverkkoa. Ruiskutteen kuivumislämpötilan on oltava riittävän korkea, vähintään +5 °C. /12, s. 56 - 57./

Mineraalivillakuituruiskutus

Mineraalivillakuituruiskutuksessa mineraalivillakuidut ja sementti ruiskutetaan veden kanssa suojattavalle pinnalle tai tukiverkolle. Valmiin kerroksen paksuus on yleensä 10–60 mm. Ruiskutuksen tiheys on 220–500 kg/m³. Mineraalivillakuituruiskute on huokoista eikä kestä mekaanista kulutusta, ja siksi se usein suojataan rappauksella, levyrakenteella tai lasikuitukankaalla. /12, s. 57./

Vermikuliittiruiskutus

Vermikuliittiruiskutus toteutetaan ja suojataan samoin kuin mineraalivillakuituruiskutus. Ruiskutteen runkoaineena käytetään vermikuliittia, sementtiä, kalkkia tai kipsiä sekä vettä. Ruiskutuksen tiheys on 300–800 kg/m³ ja kerrospaksuus sama kuin mineraalivillaruiskutteella. /12, s. 58./



Kuva 9. Palosuojaruiskutteen asennusta /25/.

5.1.3 Maali

Palosuojamaalit toimivat käyttölämpötiloissa kuten tavalliset maalit, mutta paisuvat, kun lämpötila ylittää n. 250–300 °C. Teräsrakenteen pinnalle muodostunut eristävä vaahtokerros hiihtyy palon aikana ja suojaa teräsrakennetta. Jotkin maalityypit eivät kestä pitkäaikaista paloa, vaan maalikerros alkaa kuoriutua rakenteen pinnalta. Palosuojamaalien käyttö rajoittuu usein 60 minuutin palonkestovaatimukseen. Saatavilla on kuitenkin useita 120 minuutin palonkestovaatimuksen täyttäviä maaleja, joille on myönnetty varmennettu käyttöseloste. /12, s. 58./

Palosuojamaali voidaan levittää rakenteen pinnalle siveltimellä, telalla tai ruiskuttamalla. Kuivakalvon paksuus on yleensä 0,2-3 mm. Mekaanista kuluusta ja kosteutta maalaus kestää huonosti, mikä on otettava huomioon suunnittelussa, työsuorituksessa ja mahdollisessa kuljetuksessa. /12, s. 58./

Palosuojamaalauksen etuna on se, ettei sen ulkonäkö eroa tavanomaisesta korroosiomaalauksesta. Lisäksi rakenteen suojapaksuus on pieni, jolloin rakenteen arkkitehtuuri on helppo säilyttää. /12, s. 59./



Kuva 10. Palosuojamaalattuja kattoristikoita /27/.

5.1.4 Betoni ja tiili

Tiili sopii materiaalina vain suojattavan rakenteen verhoukseen, mutta betonia voidaan käyttää verhouksen lisäksi koteloprofiilien täyteenä. Betonin ja tiilen palosuojauskyky perustuu niiden suureen lämpökapasiteettiin, jolloin suuri osa teräkseen tulevasta lämmöstä siirtyy rakenteen sisäosiin. /12, s. 59./ Betonitäyttö lisää palonkestävyyden lisäksi rakenteen kantavuutta käyttölämpötiloissa. Lämpökapasiteetin lisäämisen ja käyttölämpötilan kanta-

vuuden parantamisen lisäksi betoni kantaa yhdessä betoniterästen kanssa rakenteen palonaikaiset kuormat.

5.1.5 Rappaus

Rappauksen suojauskyky perustuu, kuten betonin ja tiilenkin, materiaalin suureen lämpökapasiteettiin. Rappauksena voidaan käyttää esimerkiksi kipsilaastia tai sementti-kalkki-hiekka-laastia. Rappauksen tukena voidaan käyttää teräsverkkoa. /12, s. 59./

5.1.6 Puu

Jos palosuojausmateriaalin sallitaan olla palavaa materiaalia, on puu hyvä palosuojausmateriaali lämmöneristävyytensä johdosta. Riittävän suojauspaksuuden määrittäminen saadaan puun hiiltymissyvyyden perusteella. Huomioitavaa kuitenkin on, että puumateriaalin käyttö palosuojauksessa lisää tilan palokuormaa. /12, s. 60./

5.1.7 Vesi

Teräsputkiprofiilit voidaan palosuojata putken sisällä olevan veden avulla. Palotilanteessa rakenteeseen siirtyvä lämpöenergia kuluu veden lämpenemiseen ja höyrystymiseen. Höyrystyneen veden tilalle on järjestettävä korvausvesi yläpuolisesta vesisäiliöstä. /12, s. 60./

Toinen veteen perustuva palosuojausjärjestelmä on sprinklaus. Menetelmä perustuu rakenteen pinnalle ruiskutettavaan veteen. Ruiskutettava vesi viilentää palotilan lämpötilaa, ja rakenteen pinnalle muodostunut kalvo estää teräsosan kuumenemisen yli 100 °C asteen. /12, s. 60./

5.2 Laskentapohja

Laskentapohjaan on sisällytetty palosuojamateriaaleista vain maaleja ja ruiskutteita, joille Teräsrakenneyhdistys ry on myöntänyt varmennetun käytöselosteen. Laskentapohjaan valittujen palosuojatuotteiden lukumäärä rajoitettiin kuuteen maaliin ja kolmeen ruiskutteeseen. Useiden eri valmistajien tuotteiden joukosta pyrittiin valitsemaan lämmöneristyskyvyltään parhaimmat ja käyttöalueeltaan laaja-alaisimmat tuotteet. Palosuojatuotteiden hintaa, asennettavuutta tai elinkaarta ei käytetty valintakriteerinä.

6 TERÄKSEN LÄMPÖTILAN KEHITYS

Lämpö siirtyy teräsrakenteeseen säteilemällä tai kuljettumalla ja rakenteessa pääasiassa johtumalla. Teräksen jännitystiloilla ei ole käytännössä vaikutusta lämmönsiirtymisominaisuuksiin. Rakenteen lämpötila koko teräsosan poikkileikkauksessa oletetaan yhtä suureksi, koska lämmön johtuminen teräksessä on hyvin nopeaa. Lämpötilan nousuun vaikuttavia tekijöitä ovat mm. palotilan lämpötilan kehitys, teräsosan poikkileikkaustekijä ja rakenteen palosuojaus. Poikkileikkaustekijällä tarkoitetaan teräsosan palolle alttiin pinta-alan suhdetta osan tilavuuteen. Raskaat rakenteet, joilla on pieni poikkileikkaustekijän arvo, kuumenevat hitaammin kuin kevyet, joiden poikkileikkaustekijän arvo on suuri. Lämpötilan oletetaan muuttuvan suoraviivaisesti palosuojauksen paksuussuunnassa. /10, s. 15./

Teräksen lämpötilan kehityksen määrittäminen voidaan tehdä joko rakentamismääräyskokoelman B7:n tai standardin SFS EN-1993-1-2:n mukaisesti.

Eurokoodin (EN) mukaisessa suojaamattoman rakenteen mitoituksessa voidaan ottaa huomioon useampia lämpötilan kehitykseen vaikuttavia tekijöitä kuin B7:n mukaisessa mitoituksessa. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi varjostustekijä k_{sh} ja näkyvyystekijä Φ .

Kuten edellä mainittiin, siirtyy lämpö rakenteeseen säteilemällä tai kuljettumalla. Varjostustekijä k_{sh} :n avulla otetaan huomioon, ettei lämpö pääse siirtymään tehokkaasti koko profiilin pinta-alalle, vaan useilla profiileilla (esim. I-profiileilla) on katve-alueita, joihin erityisesti säteily ei pääse suoraan vaikuttamaan. Varjostustekijä k_{sh} :n laskenta on esitetty kaavoissa 6a ja b. Putki-profiileilla ja muilla kuperilla profiileilla, joihin palo pääsee vaikuttamaan joka puolelta, varjostusvaikutuksella ei ole merkitystä ja varjostusvaikutuksen arvoksi saadaan 1. /28, s. 9./

Taulukossa 1 on esitetty varjostustekijän vaikutus teräksen lämpötilaan 30 minuutin standardipalossa, kun profiileina ovat HEB100, 200, 300 ja 400. Lämpötilan laskenta on esitetty kaavassa 2.

Taulukko 1. Varjostustekijän vaikutus teräksen lämpötilaan.

Profiili [HEB]	A_m/V [m^{-1}]	$[A_m/V]_b$ [m^{-1}]	k_{sh}	B7: T(30min) [°C]	EN: T(30min) [°C]
100	218,2	153,8	0,634	831	809
200	147,4	121,8	0,744	814	782
300	116,1	96	0,744	789	749
400	97,4	82,2	0,76	765	737

Taulukosta 1 huomataan, että kyseisten profiilien kohdalla varjostusvaikutuksella on noin 2–6 %:n vaikutus rakenteen loppulämpötilaan.

Näkyvyyskertoimen Φ avulla voidaan huomioida, ettei kaikki säteilevältä pinnalta lähtevä lämpösäteily saavu vastaanottavalle pinnalle. Vastaanotetun lämpösäteilyn määrä riippuu säteilevän pinnan koosta, säteilevän pinnan ja vastaanottavan pinnan välisestä etäisyydestä ja pintojen keskinäisestä suunnasta. /5, s. 94 - 100./ Näkyvyyskertoimen Φ laskenta on monimutkainen, eikä kertoimen laskentaa käsitellä tässä työssä sen tarkemmin.

Koska varjostustekijän k_{sh} ja näkyvyyskertoimen Φ arvoina käytetään laskennassa useimmiten 1:tä, eivät B7:n ja EN-1993-1-2 menetelmät johda eri tuloksiin. Käyttämällä varjostustekijän k_{sh} ja näkyvyyskertoimen Φ arvoina 1:tä saadaan varmalla puolella olevia tuloksia.

Palosuojatun rakenteen lämpötilan laskennassa ei eurokoodin ja B7:n välillä ole eroja. Palosuojamateriaalien ominaisuuksien testaamiseen käytettävien standardoitujen menetelmien välillä on kuitenkin eroja.

6.1 Suojaamaton teräsrakenne

Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan nousu $\Delta\theta_{a,t}$ ajan funktiona Δt lasketaan SFS EN 1993-1-2:n kaavasta 2. Rakentamismääräyskokoelman B7:n mukainen laskenta on muuten sama, mutta varjostustekijän k_{sh} :n arvo on 1 ja h_{net} :n sisältämän näkyvyyskertoimen Φ arvo on myös 1. Eurokoodin

mukainen kaava antaa siis mahdollisuuden tarkempaan lämpötilan määrittämiseen kuin B7:n mukainen laskenta.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \times \frac{(A_m / V)}{c_a \rho_a} \times h_{net} \times \Delta t \quad (2),$$

missä

$\Delta\theta_{a,t}$ on teräksen lämpötila [$^{\circ}\text{C}$],

Δt on aikaväli [sekuntia], jonka arvo saa olla enintään 5 sekuntia,

A_m on sauvan pinta-ala pituusyksikköä kohti [m^2/m],

V on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m^3/m],

$\frac{A_m}{V}$ on suojaamattoman terässauvan poikkileikkaustekijä [$1/\text{m}$],

c_a on teräksen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK], joka lasketaan kaavasta 3,

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

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \times \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \times \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \times \theta_a^3 \quad [\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}] \quad (3),$$

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

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}] \quad (4),$$

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

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}] \quad (5),$$

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

$$c_a = 650 \quad [\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}],$$

missä

$\Delta\theta_a$ on teräksen lämpötila [°C],

ρ_a on teräksen tiheys 7850 kg/m^3 , jonka voidaan katsoa olevan riippumaton teräksen lämpötilasta,

k_{sh} on varjostusvaikutuksen korjaustekijä, joka voidaan laskea kaavasta 6a

- I-profiilille

$$k_{sh} = 0,9 \times \frac{(A_m / V)_b}{(A_m / V)} \quad (6a),$$

missä

$(A_m / V)_b$ on poikkileikkaustekijän arvo, kun poikkileikkausta käsitellään kotelona.

- Kaikissa muissa tapauksissa k_{sh} lasketaan kaavasta 6b

$$k_{sh} = \frac{(A_m / V)_b}{(A_m / V)} \quad (6b).$$

Huom. 1. Poikkileikkauksissa, joiden muoto on kupera ja joihin palo pääsee vaikuttamaan joka puolelta, varjostusvaikutuksella ei ole merkitystä, ja varjostustekijän k_{sh} arvoksi voidaan valita yksi.

Huom. 2. Varjostusvaikutuksen huomiotta jättäminen johtaa varmalla puolella olevaan tulokseen.

Kaavassa 6a, b poikkileikkaustekijän $\frac{A_m}{V}$ arvon tulee olla vähintään 10 m^{-1} ,

h_{net} on pinta-alan yksikköä kohti laskettu nettolämpövuoto [W/m^2], jonka arvo

määritetään laskemalla yhteen kuljettumalla ja säteilemällä tapahtuva

lämmön siirtyminen kaavasta (7).

$$h'_{net} = h'_{net,c} + h'_{net,r} \quad (7),$$

missä

$h'_{net,c}$ kuljettumisen nettolämpövirta [W/m^2] saadaan kaavasta 8a,

$h'_{net,r}$ säteilyn nettolämpövirta [W/m^2] saadaan kaavasta 8b,

$$h'_{net,c} = \alpha_c \times (\theta_g - \theta_m) \quad [W/m^2] \quad (8a),$$

missä

α_c on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin [$W/m^2\text{°C}$], jonka arvona voidaan käyttää $25 W/m^2\text{°C}$, kun mitoituspalo on standardipalo,

θ_g on kaasun lämpötila palolle altistetun rakenneosan lähellä [°C],

θ_m on rakenneosan pintalämpötila [°C],

$$h'_{net,r} = \Phi \times \varepsilon_m \times \varepsilon_f \times \sigma \times [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [W/m^2] \quad (8b),$$

missä

Φ on näkyvyyskerroin (voidaan käyttää arvoa 1),

ε_m on rakenneosan pinnan säteilykerroin (teräksen pinnan säteilykerroin hiiliteräkselle 0,7),

ε_f on palon säteilykerroin (voidaan käyttää arvoa 1),

σ on Stefan-Boltzmann vakio ($=5,67 \times 10^{-8} W/m^2\text{°C}^4$),

θ_r on paloympäristön tehollinen säteilylämpötila [°C], jonka arvona voidaan käyttää rakenneosaa ympäröivän kaasun lämpötilaa,

θ_m on rakenneosan pintalämpötila [°C].

6.1.1 Laskentapohja

Laskentapohja laskee suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan kehityksen SFS EN-1993-1-2:n mukaisesti. Laskentaa voidaan käyttää myös B7:n mukaiseen suunnitteluun, mutta varjostustekijän ja näkyvyyskerroimen arvoina tulee käyttää tällöin 1:tä.

Lähtötiedot

Käyttäjän tulee syöttää laskentapohjaan poikkileikkaustekijän, varjostustekijän, pinnan säteilykerroimen, palon säteilykerroimen ja näkyvyyskerroimen arvot (Kuva 11). Kaikille paitsi poikkileikkaustekijälle voidaan käyttää varmallalla puolella olevaa arvoa. Varmalla puolella olevat arvot on kerrottu laskentapohjassa.

	A	B	C	D	E	F	G
1	TERÄSRAKENTEEN LÄMPÖTILAN KEHITYS LUE!!!						
2							
3	SUOJAAMATON RAKENNE (EN 1993-1-2)						PALOSUOJA
4							
5	Poikkileikkaustekijä		A _m /V=	100	[1/m]		Käytetty t
6							
7	Varjostustekijä		k _{sh} =	0,4			Poikkileik
8							
9	Pinnan säteilykerroin		ε _m =	0,7			Käytetty ε
10							
11	Palon säteilykerroin		ε _f =	1			Palosuoja
12							
13	Näkyvyyskerroin		Φ=	1			Käytetty φ
14							
15							Palosuoja
16							
17							
18							

Kuva 11. Suojaamattoman teräsrakenteen lähtötiedot laskentapohjassa.

6.2 Palosuojattu rakenne

Palosuojatun rakenteen lämpötilan kehitys lasketaan eurokoodissa ja B7:ssä samalla tavalla. Eroja on vain merkintätavoissa. Kaavassa 9 on esitetty palosuojatun teräsrakenteen lämpötilan ΔT_s nousu ajan funktiona Δt laskenta B7:n mukaisin merkinnöin. Teräksen ominaislämpönä käytetään sovellettavan standardin mukaista arvoa. Eristeen lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin arvona käytetään sovellettavan standardin perusteella kokeista johdettua arvoa. /9, s. 36./ Hyväksytyt sovellettavat standardit on

lueteltu B7:n lopussa. Palosuojamaalilla tai ruiskutteella suojatun rakenteen lämpötilan laskenta tehdään tuotteille myönnettyjen varmennettujen käyttöselosteiden mukaisesti. Varmennetuista käyttöselosteista kerrotaan tarkemmin luvussa 6.2.1.

$$\Delta T_s = \frac{\lambda_i \times (F_i / V)}{d_i \times c_s \times \rho_s} \times \frac{(T - T_s)}{(1 + \mu / 3)} \times \Delta t - (e^{\mu / 10} - 1) \times \Delta T \quad (9),$$

missä

$$\mu = \frac{c_i \times \rho_i}{c_s \times \rho_s} \times d_i \times (F_i / V) \quad (10),$$

ΔT_s on teräksen lämpötila [°C],

Δt on aikaväli [sekuntia], jonka arvo saa olla enintään 30 sekuntia,

F_i on palosuojamateriaalin sisäpinnan pinta-ala sauvan pituusyksikköä kohti [m²/m],

V on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m³/m],

$\frac{F_i}{V}$ on palosuojamateriaalilla eristetyn terässauvan poikkileikkaustekijä [1/m],

c_s on teräksen ominaislämpökapasiteetti [J/kg°C],

c_i on palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti [J/kgK],

ρ_s on teräksen tiheys 7850 kg/m³, jonka voidaan katsoa olevan riippumaton teräksen lämpötilasta,

ρ_i on palosuojamateriaalin tiheys [kg/m³],

d_i on palosuojamateriaalin paksuus [m],

T_s on teräksen lämpötila ajan hetkellä t [°C],

T on palotilan lämpötila ajan hetkellä t [°C],

ΔT on palotilan lämpötilan nousu ajanjakson Δt aikana [°C],

λ_i on palosuojamateriaalin lämmönjohtavuus [W/m°C].

6.2.1 Varmennettujen käyttöselosteiden vaikutus B7:n mukaiseen laskentaan

Varmennettujen käyttöselosteiden laskenta perustuu B7:n mukaisiin ohjeisiin ja merkintöihin. B7:n mukaista laskentaa on tosin hieman muunneltu sopimaan paremmin tuotekohtaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi palosuojamaalien ominaislämpökapasiteetin vaikutus teräksen lämpötilan kehitykseen on jätetty huomioimatta, koska sen vaikutus lämpötilan kehitykseen on mitätön. Lisäksi laskennassa käytetään muunnettua maalikalvon paksuutta ja muunnettua teräsosan poikkileikkaustekijää. Alkuperäiseen B7:n mukaiseen laskentaan tehdyt muutokset ovat kuitenkin varmalla puolella ja käyttöselosteet ovat Teräsrakenneyhdistys ry:n hyväksymiä.

Palosuojamateriaalin lämmönjohtavuus λ_i , ominaislämpökapasiteetti c_i ja teräksen ominaislämpökapasiteetti c_s on määritetty Teräsrakenneyhdistys ry:n Teräsnormikortin N:o 4/1996 mukaan. Suojattavan rakenteen ollessa WQ-palkin alalaippa on rakenteen ominaisuudet määritetty Teräsnormikortin N:o 14/2001:n mukaan. Menetelmä perustuu Nordtest standardiin NT FIRE 021:een ja sen palosuojamaaleja koskevaan lisäohjeeseen. /12, s. 52./ Teräsnormikortit N:o 4/1996 ja N:o 14/2001 on sittemmin korvattu uusilla Teräsnormikorteilla N:o 4/2007 ja N:o 16/2004.

NT FIRE 021 -standardissa palosuojaa-aineiden lämmönjohtavuusarvojen määrittäminen perustuu polttokokeisiin. Kokeilla varmennetaan lisäksi käytetyn palosuojaa-aineen pysyminen palo-olosuhteissa rakenteen suojana.

Varmennettujen käyttöselosteiden laskenta valittujen palosuojamaalien osalta on kaavan 11 mukainen.

$$\Delta T_s = \frac{\lambda_i \times (F_i / V)}{d \times c_s \times \rho_s} \times (T - T_s) \times \Delta t \quad (11),$$

missä

λ'_i on palosuojamaalin muunnettu tuotekohtainen lämmönjohtavuus, joka muuttuu palosuojamateriaalin lämpötilan muuttuessa,

d' on muunnettu palosuojamaalin paksuus [m],

$(F_i/V)'$ on muunnettu teräsprofiilin poikkileikkaustekijä [1/m],

Laskentapohjaan valittujen ruiskutteiden osalta laskenta on kaavan 9 mukainen, mutta laskennassa on otettava huomioon myös mahdollinen viiveaikatekijä. Viiveaika tarkoittaa aikaa, jossa teräksen lämpötila pysyy 100 °C asteessa. Viiveaika johtuu palosuojaruiskutteen sisältämän veden höyrystymisestä. Ruiskutteen sisältämän veden höyrystyttyä teräksen lämpötila alkaa jälleen nousta. Viiveaikatekijä t_v saadaan laskettua kaavasta 12.

$$t_v = \frac{p_i \times \rho_i \times d_i^2}{5 \times \lambda_i} \quad (12),$$

missä

p_i on palosuojajäsen kosteussisältö painoprosentteina [%],

ρ_i on palosuojajäsen tiheys [kg/m³],

d_i on palosuojajäsen paksuus [m],

λ_i on palosuojajäsen lämmönjohtavuus [W/m°C].

Ohjeet palosuojamaalin muunnetun kalvonpaksuuden d' , muunnetun poikkileikkaustekijän $\left[\frac{F_i}{V}\right]'$, ruiskutteiden sisältämän kideveden höyrystymisajan

t_v ja teräksen lämpötilan laskentaan löytyvät käyttöselosteista.

Lämpötilan laskentakaavojen lisäksi käyttöselosteissa on tietoa palosuojajäsen käyttöalueesta, palonkestoluokista sekä ohjeet tuotteiden varastointiin ja asentukseen. Käyttöalueisiin liittyvät tiedot voivat koskea esimerkiksi palosuojajäsen sallittuja paksuuksia ja ilmatorasituksia.

Taulukossa 2 on esitetty palosuojauksen (tässä esimerkissä NullifireS607 palosuojamaalin ja Monokote MK-6 palosuojaruiskutteen) vaikutus teräksisen I-profiilin lämpötilaan 60 minuutin standardipalossa, kun profiilina on HEB200. Lämpötilan laskenta on tehty B7:n laskentaa soveltavien varmennettujen käyttöselosteiden mukaisesti.

Taulukko 2. Palosuojauksen vaikutus teräksen lämpötilaan 60 minuutin standardipalossa.

Profiili [HEB]	A_m/V [m^{-1}]	Palosuoja- materiaali	Suojaus- paksuus (mm)	T(60min) [°C]
200	147,4	Ei suojausta	0	941
200	147,4	Maali	0,8	608
200	147,4	Maali	1,2	476
200	147,4	Ruiskute	20	506
200	147,4	Ruiskute	30	341

Taulukosta 2 voidaan huomata, että rakenteen palosuojaamisella on erittäin suuri merkitys rakenneosan lämpötilan kehitykseen. Suojaamattomien teräs-rakenteiden palonkestoajat ovatkin erittäin lyhyitä, ja rakenteet on useimmiten palosuojattava.

6.2.2 Laskentapohja

Laskentapohjan laskenta palosuojatun rakenteen osalta perustuu varmennettuihin käyttöselosteisiin. Laskentapohjan käyttäjän tulee tarkastaa palosuoja-aineiden käyttöalue sekä muut tärkeät tekijät (esimerkiksi maksimi- ja minimisuojauspaksuudet) käyttöselosteesta ennen laskentapohjan käyttöä.

Kun mitoituspalona on standardipaloon perustuva lämpötilan kehitys, saadaan palosuojamateriaalin lämmönjohtavuuden arvot suoraan varmennettu-

jen käyttöselosteiden lämmönjohtavuustaulukoista (Kuva 12). Lämmönjohtavuuden väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti.

Palosuojamaalin keskimääräinen lämpötila [°C]	Palosuojamaalin muunnettu lämmönjohtavuus λ_{ei} [W/m°C]
20	0,0188
350	0,0188
375	0,0173
400	0,0158
425	0,0143
450	0,0123
475	0,00968
500	0,00659
525	0,00504
550	0,00473
575	0,00493
600	0,00528
625	0,00634
650	0,00728
675	0,00816
700	0,00881
725	0,00950
750	0,0102
775	0,0108
800	0,0124
825	0,0149
850	0,0305

Kuva 12. Nullfire S607 palosuojamaalin lämpötilan mukaan muuttuvat lämmönjohtavuuden arvot, kun suojattava rakenne on I-profiili. /21, s.12./

Palosuojamateriaalien ominaisuudet on määritelty standardipalon mukaisilla rasituksilla. Laskentapohja on laadittu olettaen, että palosuojatuotteiden ominaisuudet ovat sovellettavissa myös toiminnallisen palomitoituksen mukaisiin rasituksiin. Ristiriidan aiheuttamasta epävarmuudesta johtuen laskentaan tehtiin varmallalla puolella olevia oletuksia, kun mitoitus perustuu toiminnallisesti määritettyyn lämpötilan kehitykseen. Lämmönjohtavuuden väliarvojen tarkan interpoloinnin sijasta käytetään välin alku- tai loppupisteen arvoa, riippuen siitä, kumpi on huonompi. Palotilan lämpötilan saavuttaessa lakipisteensä ja tilan alkaessa jäähtyä käytetään edellä mainitun vaiheen jälkeen palosuojamateriaalille huonointa taulukoitua lämmönjohtavuuden arvoa.

Käyttäjän on noudatettava suurta varovaisuutta ja harkintaa, kun mitoitus perustuu toiminnalliseen palomitoitukseen, mitoitukseen sisällytetystä varmuudesta huolimatta. Erityistä varovaisuutta on noudatettava, jos toiminnallisesti määritetyn lämpötilan kehityksen rasitukset ovat standardipalon rasituksia suuremmat. Laskentapohjan antamat tulokset toiminnallisen palomitoituksen osalta ovatkin vain suuntaa antavia, eikä laskentapohjan antamien tuloksien perusteella tulisi tehdä äärimmilleen suunniteltuja rakenteita.

Lähtötiedot

Laskentapohjaan tulee syöttää palosuojatun rakenteen lähtötietoina rakeneosan poikkileikkaustekijä, käytettävä palosuojamateriaali, materiaalin paksuus sekä teräsosan profiili (Kuva 13).



Kuva 13. Palosuojatun rakenteen lähtötiedot laskentapohjassa

7 TERÄSRAKENTEEN KESTÄVYYS PALOTILANTEESSA

Teräksen lämpötilan noustessa materiaalin lujuus ja kimmokerroin pienenevät. Lujuusominaisuuksien heikentyminen huomioidaan pienentämällä normaalilämpötilassa olevan teräksen lujuusominaisuuksia pienennystekijöillä. Pienennystekijät voidaan määrittää joko eurokoodin tai rakentamismääräyskokoelman B7:n mukaan. B7:n mukainen laskenta antaa lujuudelle ja kimmokertoimelle pienempiä arvoja kuin eurokoodin mukainen laskenta. Siksi on erittäin tärkeää, että lujuuden määrittäminen perustuu juuri siihen suunniteluohjeeseen, jota rakenteen mitoituksessa käytetään.

7.1.1 Eurokoodin mukaiset lujuusominaisuudet

Kertoimen $k_{p,\theta}$ avulla saadaan määritettyä suhteellisuusraja, jota suuremmilla jännityksen arvoilla teräkseen jää pysyvä eli plastinen muodonmuutos. Tehollinen myötöraja taas saadaan kertoimen $k_{y,\theta}$ avulla, ja se vastaa plastista muodonmuutosta $\epsilon_{y,\theta} = 2\%$. Palonaikainen kimmokerroin saadaan kertoimen $k_{E,\theta}$ avulla. /6, s. 21 - 22./

Pienennystekijöiden arvot eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 14. Pienennuskertoimien väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti.

Teräksen lämpötila	Pienennystekijät lämpötilassa θ_a suhteessa 20 °C lämpötilaa vastaaviin arvoihin f_y tai E_a		
	Tehollisen myötörajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon E_a) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

HUOM. Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarisesta interpoloinnista käyttäen.

Kuva 14. Lujuuden ja kimmokertoimen pienennuskertoimet /10, s.22/.

Kuvasta (14) huomataan, että teräksen lujuus heikkenee vasta, kun lämpötila ylittää 400 °C. Kimmokerroin pienenee kuitenkin jo 100 °C lämpötilassa. Toisin sanoen teräsosien stabiliteetti heikkenee jo melko alhaisissa lämpötiloissa, vaikka materiaalin lujuudessa ei vielä heikkenemistä olisikaan tapahtunut.

7.1.2 B7:n mukaiset lujuusominaisuudet

Teräksen lujuuden laskenta B7:n mukaan perustuu kaavaan 10. Lujuus f_{yT} vastaa 0,2 % plastista muodonmuutosta. /9, s. 35/

$$f_{yT} = f_y \times e^{-1,3 \times \left(\frac{T_s - 20}{580} \right)^{2,3}} \quad (10),$$

missä

f_{yT} on teräksen lujuus palonaikaisessa lämpötilassa [MPa],

f_y on teräksen lujuus normaali lämpötilassa [MPa],

T_s on teräksen lämpötila [°C],

Kimmokertoimen pienennyskertoimen laskenta B7:n mukaan perustuu kaavaan (11).

$$E_T = 210000 \times e^{-0,3 \times \left(\frac{T_s - 20}{430} \right)^{5,9}} \quad (11),$$

missä

E_T on teräksen kimmokerroin palonaikaisessa lämpötilassa [MPa],

T_s on teräksen lämpötila [°C].

7.1.3 Laskentapohja

Laskentapohja laskee pienennyskertoimet sekä eurokoodin että B7:n mukaisesti (Kuva 15), käyttäjän valitsemalla ajanhetkellä. Mitoituspalon perustues- sa toiminnalliseen palomitoitukseen saadaan pienennyskertoimet myös teräksen maksimilämpötilan arvolla.

Time Interval	EN (ky,θ)	B7 [fy]	EN (kp,θ)	B7 [E]	EN (kE,θ)
90 min (tasaminuutteina)	0,18	0,116435307	0,065	0,001700943	0,113
120 min	0,047	0,018461786	0,029	2,8928E-14	0,053
150 min					
180 min					

Kuva 15. Pienennyskertoimien arvot laskentapohjassa.

7.2 Teräsrakenteen kestävyyslaskenta

Teräksen kestävyyslaskenta palotilanteessa etenee tavallisesti siten, että ensin määritetään rakenneosan kriittinen lämpötila. Kriittiseksi lämpötilaksi kutsutaan lämpötilaa, jossa rakenneosan kestävyyslaskenta-arvo on yhtä suuri kuin rakenneosan vaikuttavan voiman laskenta-arvo. /12, s. 36 - 37./

Laskennan seuraavassa vaiheessa rakenteen kriittistä lämpötilaa verrataan teräksen lämpötilaan palotilanteessa. Mikäli teräksen lämpötila on korkeampi kuin kriittinen lämpötila vaaditun palonkestoajan aikana, on rakenteen palosuojausta parannettava tai sen kriittistä lämpötilaa nostettava. Kriittiseen lämpötilaan vaikuttavat rakennemalli, materiaaliominaisuudet, profiilin mitat sekä kuormat. /12, s. 36 - 37./

Rakenneosan kestävyuden mitoitusehto palotilanteessa SFS-EN 1993-1-2 mukaisin merkinnöin on esitetty kaavassa 12.

$$E_{f_i,d} \leq R_{f_i,d,t} \quad (12),$$

missä

$E_{f_i,d}$ on kuormien vaikutusten mitoitusarvo palotilanteessa määritettynä standardin SFS-EN 1991-1-2 mukaan. Määrittäessä tulee huomioida myös lämmön aiheuttama pituuden ja muodon muuttuminen,

$R_{f_i,d,t}$ on rakenneosan kestävyuden laskenta-arvo palotilanteessa ajan hetkellä t . (Huom. Rakenneosan kestävyuden tulee sisältää stabiliteetin tarkastelu)

Palonaikaiset voimasuureet lasketaan palonaikaisilla kuormilla, joita on pienennetty käyttötilanteeseen nähden. Palotilanteen kuormat lasketaan ilman varmuuskertoimia. Lisäksi hyötykuormia pienennetään yhdistelykertoimilla. Palotilanteen kuormat on laskettu SFS-EN 1990 mukaisesti kaavassa 13.

$$G_k + \psi_{f_i} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (13),$$

missä

G_k on pysyvän kuorman ominaisarvo,

ψ_{f_i} on kuormien yhdistelykerroin. Suomen kansallisen liitteen mukaisesti muuttuvan kuorman ollessa luonnonkuorma ψ_{f_i} on $\psi_{1,1}$, muuten $\psi_{2,1}$.

$Q_{k,1}$ on määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo,

$\psi_{2,i}$ on muiden muuttuvien kuormien yhdistelykerroin,

$Q_{k,i}$ on muiden muuttuvien kuormien ominaisarvot,

Teräsrakenteiden kestävyyttä tarkasteltaessa on materiaalin kestävyuden lisäksi tarkastettava myös stabiliteetin säilyminen. Pilareiden ja muiden puristettujen sauvojen kriittistä lämpötilaa selvittäessä on huomioitava nurjahduksen ja lommahduksen mahdollisuudet. Kun rakenne on palkki, tulee tarvittaessa huomioida kiepahduksen ja lommahduksen mahdollisuudet. /12, s. 36 - 37./ Stabiliteetin laskentaan ei kuitenkaan tässä työssä tarkastella. Laskentaperiaatteet on esitetty standardissa SFS EN 1993-1-2.

Kriittinen lämpötila saadaan lopuksi iteroimalla eli syöttämällä eri lämpötiloilla laskettuja lujuuden ja kimmokertoimen pienennyskertoimia stabiliteetin ja lujuuden tarkistaviin kaavoihin. Iterointia jatketaan, kunnes rakenneosan kestävyuden laskenta-arvo on vähintään yhtä suuri kuin rakenneosaan vaikuttavien voimien laskenta-arvo.

Teräsrakenteen kestävyuden mitoitus voidaan tehdä myös toisinpäin eli selvittämällä ensin rakenteen maksimilämpötila palotilanteessa ja tarkastamalla, kestäkö rakenne palonaikaiset kuormat kyseisessä lämpötilassa. Yleensä on kannattavampaa kuitenkin selvittää rakenteen kriittinen lämpötila ja mitoittaa palosuojaus sen perusteella, koska palosuojauksen paksuuden arviointi on usein helppoa ja perustuu tietokoneohjelmiin tai mitoituskäyrästöihin. /12, s. 36 - 37./

7.2.1 Yksinkertaistettu kriittisen lämpötilan laskenta

SFS-EN 1993-1-2:ssa on esitetty yksinkertaistettu kaava kriittisen lämpötilan laskentaan. Kaavaa voidaan käyttää, kun siirtymätilaehtoja tai stabiiliutta ei tarvitse ottaa huomioon. Kaavaa voidaan siis hyödyntää vain puhtaasti lujuustarkastelussa eikä esimerkiksi puristetun sauvan mitoituksessa, jossa nurjahdusvaara on olemassa. Kriittisen lämpötilan laskenta SFS-EN 1993-1-2:n mukaan on esitetty kaavassa 14.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \times \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (14),$$

missä

$\theta_{a,cr}$ on kriittinen lämpötila [°C],

$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,o}}$ on poikkileikkausluokkaan 1,2 tai 3 kuuluvien sauvojen ja kaikkien vedettyjen sauvojen hyväksikäyttöaste ajan hetkellä $t=0$. μ_0 :n arvon tulee kuitenkin olla vähintään 0,013.

$E_{fi,d}$ on kuormien vaikutusten mitoitusarvo palotilanteessa määritettynä standardin SFS-EN 1991-1-2:n mukaan lämmön aiheuttama pituuden ja muodon muuttuminen mukaan lukien,

$R_{fi,d,t}$ on rakenneosan kestävyuden laskenta-arvo palotilanteessa varmuuskertoimiseen ajan hetkellä $t=0$.

Poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvien muiden kuin vedettyjen sauvojen kestävyys on riittävä, jos hetkellä t teräksen lämpötila on enintään 350 °C. Suomen kansallisen liitteen mukaan raja-arvona voidaan käyttää 450 °C.

Vaihtoehtoisesti μ_0 :n varmalla puolella oleva arvo voidaan laskea kaavasta 15.

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

missä

$\gamma_{M,fi}$ on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku palotilanteessa, $\gamma_{M,fi} = 1,0$,

γ_{M0} on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku ajanhetkellä $t=0$, $\gamma_{M0} = 1,0$,

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}},$$

missä

G_k on pysyvän kuorman ominaisarvo,

ψ_{fi} on kuormien yhdistelykerroin. Suomen kansallisen liitteen mukaisesti muuttuvan kuorman ollessa luonnonkuorma ψ_{fi} on $\psi_{1,1}$, muuten $\psi_{2,1}$,

$Q_{k,1}$ on määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo,

γ_G on pysyvien kuormien osavarmuuskerroin,

$\gamma_{Q,1}$ on muuttuvan kuorman 1 osavarmuuskerroin.

Kuvassa 16 on esitetty hyväksikäyttöasteen μ_0 vaikutus teräksen kriittiseen lämpötilaan.

μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

Kuva 16. Hyväksikäyttöasteen vaikutus kriittiseen lämpötilaan /6, s. 34/.

8 EUROKOODIN VAIKUTUS PALOMITOITUKSEEN

Varmennettujen käyttöselosteiden sisältämät tiedot on määritelty rakentamismääräyskokoelman B7:n ohjeiden mukaisesti ja ovat käytössä B7:n mukaisessa mitoituksessa. Käyttöselosteet ovat voimassa niin kauan kuin B7 on voimassa tai kunnes niiden 5 vuoden voimassaoloaika päättyy. Käyttöselosteiden sisältämät tiedot materiaalin ominaisuuksista perustuvat Nordtest standardin NT FIRE 021:n mukaisiin kokeisiin. Käyttöselosteita ei voi käyttää eurokoodin mukaiseen mitoitukseen. /15./

Mitoitettaessa rakenteet eurokoodin mukaan vaaditaan palosuojatuotteelta ETA-hyväksyntä tai joissakin tapauksissa CE-merkintä. /22./ Tuotteiden ominaisuudet on määritelty Eurooppalaisen teknisen hyväksyntäohjeen

ETAG 018:n mukaisesti. EOTA pitää luetteloja kaikista EU:n alueella myönnettyistä ETA-hyväksynnöistä. ETA-hyväksytyjä tuotteita ei vielä toistaiseksi ole kuitenkaan kovin useita, mutta hyväksyntää hakevien tuotteiden lukumäärä tulee nousemaan, kun eurokoodien käyttöönotto etenee. /24./

Varmennettujen käyttöselosteiden käyttäminen eurokoodin mukaisessa mitoituksessa saattaisi aiheuttaa ongelmia ainakin palosuojatuotteiden kiinnipysymisessä. Kiinnipysyminen voisi muodostua ongelmaksi, koska eurokoodin mukainen teräksen lujuuden laskenta perustuu 2 %:n venymään kun B7:n laskenta perustuu 0,2 %:n venymään. Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa teräksen venymän sallitaan siis muodostuvan kymmenkertaiseksi B7:ään verrattuna. Ero johtuu siitä, että eurokoodissa otetaan huomioon teräksen myötölujeneminen. Myötölujenemisen huomioiminen tarkoittaa erittäin suuria teräksen muodonmuutoksia ja siirtymiä.

8.1 Laskentapohja

Laskentapohjan laskenta palosuojatun rakenteen osalta perustuu B7:n mukaiseen mitoitukseen (varmennetut käyttöselosteet). Laskentaa ei siis voi soveltaa eurokoodin mukaiseen mitoitukseen. Jos rakenteet halutaan suunnitella eurokoodin mukaisesti ja halutaan käyttää laskentapohjaa apuna mitoituksessa, tulee laskentapohjan kaavat ja palosuojatuotteiden ominaisuudet laskentapohjassa muokata eurokoodin määräyksien ja ohjeiden mukaisiksi.

Suojaamattoman rakenteen laskenta laskentapohjassa perustuu SFS EN 193-1-2:n mukaisiin määräyksiin ja ohjeisiin ja on sovellettavissa eurokoodin mukaiseen mitoitukseen.

9 YHTEENVETO

Tämän insinööriyön tavoitteena oli laatia kirjallisuusselvitys teräsrakenteiden palomitoituksesta. Lisäksi tuli selvittää, kuinka palosuojatuotteiden ominaisuudet määritetään, kun kantavien rakenteiden suunnittelussa siirrytään B7:n käytöstä eurokoodipohjaiseen suunnitteluun. Insinööriyön osana tuli ohjelmoida Excel-laskentapohja, joka laskee teräksen lämpötilan kehityksen palotilanteessa.

9.1 Tulokset

Insinööriyön tuloksena saatiin laadittua melko kattava mutta yleisluonteinen kirjallisuusselvitys teräsrakenteiden palomitoituksesta.

Työssä saatiin selville, että Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 paloturvallisuusvaatimukset voidaan täyttää rakentamalla ja suunnittelemalla rakennus noudattaen rakentamismääräyskokoelman paloluokkia ja lukuarvoja. Toinen hyväksytty menetelmä paloturvallisuusvaatimusten täyttämiseksi on toiminnallinen palomitoitus. Yksittäisten teräsrakenteiden palomitoitus voidaan tehdä joko rakentamismääräyskokoelman osan B7:n tai eurokoodin mukaisesti.

Palosuojattujen rakenteiden eurokoodin mukaisessa mitoituksessa ei voida käyttää B7:ään perustuvia varmennettuja käyttöselosteita, vaan palosuojaustuotteilla tulee olla joko ETA-hyväksyntä tai CE-merkintä. EOTA ylläpitää kotisivuillaan luettelo kaikista ETA-hyväksytyistä tuotteista.

Insinööriyö sopii hyvin yleisluonteiseksi perehdytysmateriaaliksi teräsrakenteiden palomitoitukseen. Lisäksi se toimii insinööriyön ohessa tehdyn laskentapohjan manuaalina.

9.2 Laskentapohja ja sen soveltuvuus

Insinööriyön tuloksena saatiin ohjelmoitua toimiva Excel-laskentapohja teräksen lämpötilan selvittämiseksi. Laskentapohja laskee teräksen lämpötilan kehityksen sekä standardipalon mukaisilla palorasituksilla että toiminnalliseen palomitoitukseen perustuvilla palorasituksilla. Teräsrakenne voi olla suojaamaton tai palosuojattu. Palosuojaustuotteista laskentapohjaan valittiin kuusi käytetyintä ja ominaisuuksiltaan parasta palosuojamaalia sekä kolme yleisintä palosuojaruiskutetta. Teräksen lämpötilatietojen lisäksi laskentapohja antaa tietoa teräksen materiaaliominaisuuksien muutoksista palotilanteessa.

Laskentapohjan laskenta perustuu palosuojattujen rakenteiden osalta varmennettujen käyttöselosteiden mukaisiin ohjeisiin. Laskentapohjaa ei voida sellaisenaan käyttää eurokoodipohjaisessa suunnittelussa. Mikäli laskentapohjaa halutaan käyttää eurokoodipohjaisessa suunnittelussa, tulee laskentapohjan laskenta ja syötettyjen palosuojaustuotteiden ominaisuudet muokata eurokoodin määräysten ja ohjeiden mukaisiksi.

Suojaamattoman rakenteen lämpötilan laskenta laskentapohjassa perustuu standardiin SFS EN 1993-1-2:een, ja sitä voidaan käyttää sellaisenaan eurokoodin mukaiseen mitoitukseen. Laskentapohjaa voidaan käyttää suojaamattoman rakenteen osalta myös B7:n mukaiseen mitoitukseen, mutta tällöin sekä varjostustekijän että näkyvyyskertoimen arvona tulee käyttää 1:tä.

VIITELUETTELO

- /1/ Pelastuslaki 468/2003.
- /2/ Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999.
- /3/ Maankäyttö- ja rakennusasetus 895/1999.
- /4/ Eurokoodi helpdesk, <http://www.eurocodes.fi>. pvm 15.4.2010
- /5/ SFS EN 1991-1-2 Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset, Suomen kansallinen liite.
- /6/ SFS EN 1993-1-2 Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus, Suomen kansallinen liite.
- /7/ Suomen rakennusmääräyskokoelma 22.1.2010.
- /8/ Suomen rakennusmääräyskokoelma, osa E1, Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet.
- /9/ Suomen rakennusmääräyskokoelma, osa B7, Teräsrakenteet.
- /10/ Ala-Outinen, Tiina. Ruostumattomien kantavien teräsrakenteiden palomitoitus. Teräsrakenneyhdistys ry.
- /11/ ESDEP TYÖRYHMÄ 4B: PALOSUOJAUS JA PALOMITOITUS, Luento 4B.4: Käytännön menetelmät palonkestävyyden saavuttamiseksi, Teräsrakenneyhdistys ry.
- /12/ Iso-Mustajärvi, Pertti - Inha, Timo, Kantavien teräsrakenteiden palonsuojaus, Teräsrakenneyhdistys ry.
- /13/ Kaitila, Olli, Teräsrakenteiden toiminnallinen palomitoitus, Teräsrakenneyhdistys ry.
- /14/ Kaitila, Olli, Rakenteiden toiminnallinen palomitoitus-menetelmä ja ohje, Teräsrakenneyhdistys ry.
- /15/ Teräsrakenneyhdistys ry:n Olli Kaitilan kanssa käyty sähköpostikeskustelu, 26.3.2010 klo 15.21.
- /16/ Martinez De Aragon, J.J. - Rey, F. - Chica, J.A. DIFISEK - DISSEMINATION OF FIRE SAFETY ENGINEERING KNOWLEDGE, WP4: PALOMITOITUKSEN OHJELMISTOT, LABEIN Technological Centre, Bilbao, Spain.
- /17/ Paloposki, T. Rak-43.500, Paloturvallisuustekniikan perusteet Luento 4, 10.4.2006, www.tkk.fi.
- /18/ Hietaniemi, Jukka, TOIMINNALLINEN PALOTEKNINEN SUUNNITTELU, VTT.
- /19/ Rakenteiden toiminnallinen palomitoitus, <http://www.ruukki.com>. pvm 13.4.2010

- /20/ Valtion ympäristöhallinto, <http://www.ymparisto.fi>. pvm 17.4.2010
- /21/ Varmennettu käyttöseloste TRY-85-2008, Teräsrakenneyhdistys ry.
- /22/ Rakennustuotteiden CE-merkintä, Suomen standardisoimisliitto SFS Ry.
- /23/ Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT, <http://www.vtt.fi>.
- /24/ European Organisation for Technical Approvals (EOTA), <http://www.eota.be>.
- /25/ <http://www.renotech.fi>. pvm 11.4.2010
- /26/ <http://www.pyromaster.fi>. pvm 11.4.2010
- /27/ <http://www.tematek.fi>. pvm 11.4.2010
- /28/ Twilt, L, DIFISEK - DISSEMINATION OF FIRE SAFETY ENGINEERING KNOWLEDGE WP 2: TERMINEN VASTE, TNO Bouw, Centre for Fire Research, The Netherlands

