

Teräksestä valmistetun kantavan muotolevyn kestävyys tulipalossa

Yhteyshenkilö: Pekka Yrjölä
Teräsrakenneyhdistys ry
PL 381, 00131 Helsinki
pekka.yrjola@terasrakenneyhdistys.fi

Menetelmän kuvaus: Tässä normikortissa esitetään palotilanteen vaatimukset ja mitoitusohjeita rakennuksen yläpohjarakenteina käytettäville teräksisille muotolevyille nykyisten Suomessa käytettävien määräysten, asetusten, ohjeiden ja standardien puitteissa.

Teräsrakenneyhdistyksen Normitoimikunta on 12.12.2011 käsitellyt ja hyväksynyt tämän Teräsnormikortin. Teräsnormikortin käyttäjällä on vastuu kortin ohjeiden käytöstä.

Tätä normikorttia käytetään seuraavien rakenteellisten tarkastelujen suorittamiseksi:

- muotolevyrakenteiden toiminta yläpohjassa
- muotolevyrakenteiden toiminta köysirakenteina.

Tämä normikortti on voimassa toistaiseksi sen mukaan, miten viittauksina olevat sovellettavat ohjeet ja standardit ovat voimassa Suomessa.

Helsingissä joulukuun 19. päivänä 2011

TERÄSRAKENNEYHDISTYS RY



Raimo Kotola
puheenjohtaja



Markku Leino
toimitusjohtaja

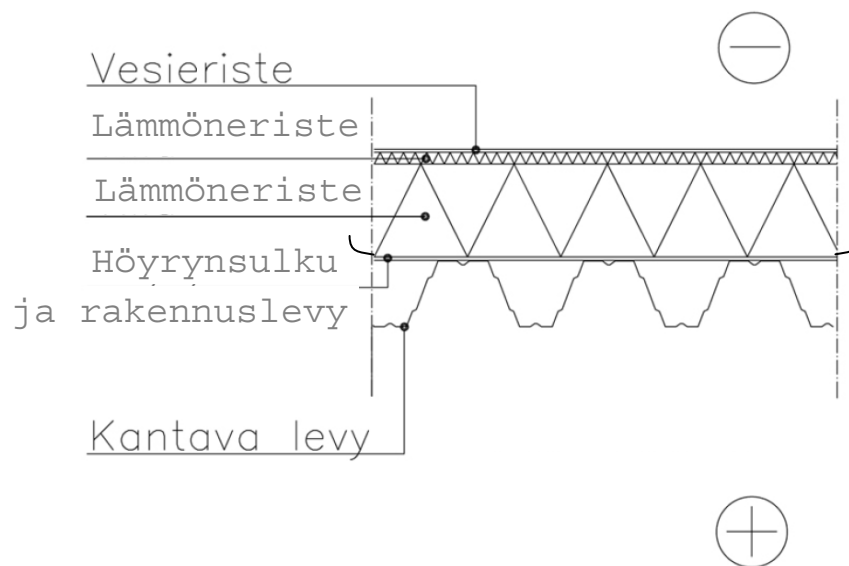
Sisällysluettelo

1	Yleistä	3
2	Normikortissa esitetyt tärkeimmät johtopäätökset	4
3	Teräsrakenteiden toiminta tulipalossa	4
3.1	Kantavien rakenteiden palotekniset vaatimukset	4
3.2	Materiaaliominaisuudet ja valmistusta koskevat vaatimukset	5
3.3	Rakenteiden mitoitus palotilanteessa	5
4	Teräksestä valmistettujen yläpohjarakenteiden vaatimukset ja mitoitus palotilanteessa	7
4.1	Määräykset ja ohjeet	7
4.1.1	Yleiset luokkavaatimukset enintään 2-kerroksisille rakennuksille	7
4.1.2	Enintään 2-kerroksisen rakennuksen yläpohjan rakenteiden vaatimukset	8
4.2	Yläpohjan kattokannattimien sivuttaistukina toimivat muotolevyt	9
4.2.1	Määräykset	9
4.2.2	Yläpohjan muotolevyjen toiminta	10
4.2.3	Yläpohjan muotolevyrakenteiden rakenneluokka ja seuraamusluokka	11
4.2.4	Ohjeistus ja tulosten laajentaminen/soveltaminen	13
5	Muotolevyn laskenta köysirakenteena tulipalotilanteessa	13
6	Rakenneratkaisut eri palonkestoluokissa	16
7	Yhteenveto	16
	Lähdeluettelo	17
Liite A	Rakennedetaljeja	
Liite B	Laskennallisia tarkasteluja: teräsrakenteisen hallirakennuksen yläpohjassa olevien muotolevyrakenteiden toiminta erilaisissa palotapauksissa.	
Liite C	Esimerkki muotolevyn laskennasta köysikäyränä	

1 Yleistä

Tässä normikortissa esitetään rakennuksen teräksisten muotolevystä tehtyjen ylä- tai välipohjarakenteiden palotekninen toiminta ja palomitoitusmenettelyt sekä käytännön ohjeita rakenteiden suunnitteluun ja toteutukseen. Kuvassa 1 on esitetty poikkileikkaus tyypillisestä käsiteltävästä rakenteesta. Tämä normikortti ei koske ns. alaslaskettuja kattoja.

Normikortissa esitetään perusteet ja ohje korkeintaan 2-kerroksisen rakennuksen yläpohjassa kattokannattimien sivuttaistukena käytettävien muotolevyrakenteiden paloluokan määrittämiseksi sekä ohje köysikäyrävaikutuksen huomioon ottamiseksi.



Kuva 1. Esimerkki eristetystä yläpohjarakenteesta. [1].

Suomessa voidaan käyttää kantavien teräsrakenteiden suunnittelussa seuraavia suunnittelujärjestelmiä:

- Suomen rakentamismääräyskokoelman voimassa oleva B-sarja (paloturvallisuutta koskevat vaatimukset esitetään RakMK osassa E1)
- Eurocode-järjestelmän mukaiset standardit kansallisine liitteineen.

Normikortti koskee em. suunnitteluohjeiden ja -standardien sovellusalueeseen kuuluvista teräsmateriaaleista valmistettuja muotolevyjä. Palotilanteen mukaisessa mitoituksessa käytetään tämän normikortin kohdassa 3.2 esitettyjen standardien ja ohjeiden mukaisia materiaaliominaisuuksien pienennystekijöitä.

2 Normikortissa esitetyt tärkeimmät johtopäätökset

Tässä normikortissa esitettyjen tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että tapauksessa, jossa

- rakennus on korkeintaan 2-kerroksinen ja teräsrakenteinen,
- tarkastellaan yläpohjan rakenteita ja niiden palonkestävyysvaatimuksia ja
- rakennuksen yläpohjan kantava runko ja rakennuksen kokonaisjäykistyksen ja yläpohjan jäykistyksen varmistavat vinositeet tai vastaavat rakenteet on luokiteltu paloluokkaan R 60,

yläpohjan kattokannattimien (esimerkiksi kattoristikot) yläpaarten sivuttaistukina toimivat muotolevyrakenteet eivät ole yläpohjan kantavan rungon tai jäykisteiden olennaisia osia E1 (2011) [2] taulukossa 6.2.1 tarkoitettussa merkityksessä ja ne luokitellaan paloluokkaan R 15.

Tämän normikortin luvussa 5 esitettyä menetelmää voidaan käyttää mitoitettaessa ohutlevyrakenteen toimintaa köysirakenteena.

Teknisesti rakenteiden toiminta ei riipu rakennuksen kerrosluvusta tai siitä, ovatko ne ylä- vai välipohjan osia. Olennaista on, että itse kattokannattaja tai välipohjapalkki säilyttää kantavuutensa vaaditun palonkestoajan.

3 Teräsrakenteiden toiminta tulipalossa

3.1 Kantavien rakenteiden palotekniset vaatimukset

Rakenteille asetetaan palotekniset vaatimukset ja ohjeet, jotka on Suomessa esitetty rakentamismääräyskokoelman sarjassa E. Sarjan osa E1 [2] Rakennusten paloturvallisuus on uusittu 15.4.2011. Osissa E2 [3] ja E4 [4] on esitetty lisäohjeita tuotanto- ja varastorakennuksille ja autosuojille.

Osaan E1 vuonna 2011 tehdyt muutokset liittyvät pääasiassa puurakenteisiin ja P2-luokan rakennuksiin, mutta sen taulukkoon 6.2.1 tehdyt muutokset vaikuttavat myös teräsrakentamiseen. Näitä muutoksia käsitellään tämän normikortin luvussa 4.

Rakennuksen ja muun rakennuskohteen olennaisista vaatimuksista on voimassa, mitä maankäyttö- ja rakennuslaissa ja -asetuksessa tai muutoin on erikseen säädetty tai määrätty. Paloturvallisuuden kannalta on osassa E1 [2] säädetty, että:

- rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan
- palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rakennuksessa tulee olla rajoitettua
- palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa
- rakennuksessa olevien henkilöiden on voitava palon sattuessa päästä poistumaan rakennuksesta tai heidät on voitava pelastaa muulla tavoin
- pelastushenkilöstön turvallisuus on rakentamisessa otettava huomioon.

Sekä kotimaisissa viranomaismääräyksissä että eurooppalaisissa suunnitteluohjeissa hyväksytään kaksi erilaista tapaa osoittaa näiden olennaisten vaatimusten täyttyminen:

1. Paloturvallisuusvaatimuksen katsotaan täyttyvän, mikäli rakennus suunnitellaan ja rakennetaan noudattaen annettujen määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja. Tämä tarkoittaa ns. taulukkomitoitusta tai luokitukseen perustuvaa mitoitusta, jonka lähtökohtana on standardipalokäyrän mukainen lämpötilakehitys koko palotilassa.
2. Toiminnallisen palomitoituksen käyttö rakennusten paloturvallisuussuunnittelussa. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 [2] todetaan, että ”paloturvallisuusvaatimuksen katsotaan täyttyvän myös, mikäli rakennus suunnitellaan ja rakennetaan perustuen oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. Vaatimuksen täytyminen todennetaan tapauskohtaisesti ottaen huomioon rakennuksen ominaisuudet ja käyttö.” Toiminnallista mitoitusta voidaan käyttää myös standardipalomitoitusta täydentävänä ja joissakin kohdissa määräyksiin on sallittu lievennyksiä perustuen toiminnallisiin tarkasteluihin.

On tärkeää huomata, että standardipalokäyrä on alun perin kehitetty erityisesti materiaalien ja rakenteiden paloteknistä luokittelua varten. Standardipalokäyrän mukainen palo ei todellisuudessa käytännössä milloinkaan vastaa luonnollista palonkehitystä, sillä se ei esimerkiksi ota lainkaan palon jäähtymisvaihetta huomioon. Standardipalokäyrän käyttö mitoituksen perustana onkin pohjimmiltaan nähtävä keinona yksinkertaistaa laskentamenettelyä tyypillisissä rakennuksissa, ei todenmukaisena esityksenä palon kehittymisestä. Annettujen palonkestoaikavaatimusten taustalla ovat kuitenkin usein toiminnalliset, luonnollisiin palotapauksiin perustuvat tarkastelut, joiden tulokset on tulkittu standardipalomitoituksen antamien luokitusten mukaisesti. Tämä on tärkeää ymmärtää, jotta palomääräysten perusteena olevaa rakennusten todellista palokäyttäytymistä voidaan käsitellä realistisemmin ja tarkoituksenmukaisemmin myös standardipalomitoitusta käytettäessä.

Käytännön projekteissa viranomainen päättää vaadittavan palonkestoajan yleensä yhdessä rakennesuunnittelijan ja mahdollisen erillisen paloturvallisuussuunnittelijan kanssa käymiensä keskustelujen tuloksena. Vaadittava palonkesto aika voi perustua joko luokitukseen tai toiminnallisiin tarkasteluihin.

3.2 Materiaaliominaisuudet ja valmistusta koskevat vaatimukset

Rakenneteräksen materiaaliominaisuuksien arvoina käytetään voimassa olevien käytettäviksi valittujen suunnitteluohjeiden tai -standardien mukaisia arvoja.

Rakenneterästen ja ruostumattoman teräksen materiaaliarvojen lisäksi standardissa SFS-EN 1993-1-2 [5] on esitetty poikkileikkausluokan 4 rakenteiden palomitoituksessa käytettävät ns. 0,2-rajaan perustuvan myötörajan pienennystekijät lämpötilan funktiona (standardin liite E).

3.3 Rakenteiden mitoitus palotilanteessa

Palotilanteen mukaisessa rakenteiden mitoituksessa käytetään eri mitoitukskuormitusyhdistelmiä ja osavarmuuslukuja kuin normaalilämpötilamitoituksessa ja

teräksen mekaaniset ominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa kohdassa 3.2 mainittujen lähteiden mukaisesti.

Palotilan ja rakenteiden lämpötila arvioidaan standardipaloon perustuvan mitoituksen tai toiminnallisen palomitoituksen (ns. luonnolliset palomallit) mukaisesti. Tarkasteltavia mitoituspaloja määritettäessä on huomattava, että standardin SFS-EN 1991-1-2 [6] kohdassa 3.3.1.3 todetaan, että

”Jos tilan lieskahtaminen on epätodennäköistä, otetaan huomioon paikallisen palon aiheuttamat lämpörasitukset.”

Kyseisen standardin liitteessä C on annettu laskentaohjeet paikallisen palon tapaukselle.

Rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat otetaan yleensä vastaan rungon jäykistävillä rakenteilla (vinositeillä), jotka sijaitsevat rakennuksen katto- ja seinärakenteissa. Teräsristikoiden tai palkkien yläpaarteiden sivuttaistuenta hoidetaan usein kantavien muotolevyjen avulla.

Palosuojaamattomien ohutlevyrakenteiden kestävyys tyypillisillä kuormilla standardipalon mukaisessa lämpörasituksessa saavutetaan yleensä n. 15 minuutin kohdalla (R 15). Luokituksiin perustuva mitoitus on järkevää tavanomaisissa suunnittelukohteissa, joissa rakennuksen palokuormasta johtuen on oletettava, että palo leviää laajalle alueelle ja sen vaikutus rakennuksen korkeussuunnassa yläpohjaan asti on merkittävä. Todellisessa palotilanteessa standardipalon mukainen R 15-luokitus ei kuitenkaan tarkoita sitä, että ko. rakenneosa olisi täysin menettänyt toimintakykynsä ja kantavuutensa 15 minuutin kuluttua palon alkamisesta.

Toisaalta, jos rakennuksen kerrosala ja kerroskorkeus ovat suuria ja palokuorma rajoittuu tietylle alueelle, palo rajoittuu käytännössä aina paikalliseksi ja tilan lieskahtaminen on hyvin epätodennäköistä (esim. suuret tilat). Sama koskee rakennusta, joka on varustettu automaattisilla paloilmaisimilla ja hälytyksensiirolla palokunnalle sekä automaattisella sammutuslaitteistolla (sprinklerijärjestelmä). Suurillakin palokuormilla jää sprinklereiden rajoittaman palon aiheuttama lämpötilan nousu vähäiseksi, jolloin rakenteiden kestävyys ei yleensä aiheuta riskiä henkilöturvallisuudelle.

Rakenteiden toimintaa edellä esitetyn mukaisissa tilanteissa on tutkittu kokeellisesti ja laskennallisesti useissa tutkimuksissa. VTT [7], Sokol et al. [8], [9] ja Lu et al. [10] ovat tutkineet kuormitettujen teräksestä tehtyjen muotolevyrakenteiden yläpohjien toimintaa tulipalossa, TTY [11] kuormittamattoman jatkoksellisen teräksestä tehdyn muotolevyn toimintaa palossa. Kuormitetuilla rakenteilla tehtyjen tutkimusten perusteella on todettu, että altistuessaan tulipalosta aiheutuvalle lämpörasitukselle kuormitettu muotolevy alkaa toimia ns. köysirakenteena (ks. tämän normikortin luku 5).

Rakenteiden paloteknisestä suunnittelusta löytyy runsaasti tietoa mm. Paloturvallisuussuunnittelijan oppimisympäristö -sivuilta [12].

4 Teräksestä valmistettujen yläpohjarakenteiden vaatimukset ja mitoitus palotilanteessa

4.1 Määräykset ja ohjeet

4.1.1 Yleiset luokkavaatimukset enintään 2-kerroksisille rakennuksille

Luokitukseen perustuvaa mitoitusta (ns. taulukkomitoitusta) koskevat kantavien rakenteiden palonkestovaatimukset on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 [2] taulukossa 6.2.1, jonka mukaan enintään 2-kerroksisen rakennuksen palonkestovaatimus vaihtelee paloluokassa P1 välillä R 60 – R 120. Paloluokassa P2 vaatimus on R 30 ja paloluokan P3 mukaisille rakennuksille ei ole palonkestävyysvaatimusta.

Näihin vaatimuksiin voidaan tehdä lievennyksiä, mikäli rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. Rakentamismääräyskokoelman osan E1 [2] kohdan 11.5.3 mukaan:

”voidaan sallia lievennyksiä:

- rakennuksen kerrosalaa ja sen palo-osaston pinta-alaa koskevista määräyksistä,
- kulkureitin pituutta uloskäytävään koskevista määräyksistä,
- palokuormaryhmiin sijoittamista koskevista määräyksistä,
- rakenteita koskevista määräyksistä niin, että lämpötilan hitaamman nousun yleensä ja kantavien rakennusosien jäähtymisen saa ottaa huomioon mitoituksessa,
- pintoja koskevista määräyksistä,
- määräyksistä, jotka on tarkoitettu estämään palon leviäminen naapurirakennuksiin ja torjumaan aluepalon vaara.

Lievennyksiä harkittaessa tulee kiinnittää huomiota pelastushenkilöstön mahdollisuuksiin sammuttaa tai rajoittaa alkanut palo henkilöturvallisuutta vaarantamatta.”

Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa E1 [2] noudatetaan myös varasto- ja tuotantorakennusten kantavia rakenteita suunniteltaessa. Kuitenkin määräyskokoelman osassa E2 [5] todetaan, että:

”yksikerroksisessa rakennuksessa voidaan sallia lievennyksiä siten, että kantavat ja runkoa jäykistävät rakenteet saadaan tehdä

- P1-luokan rakennuksessa luokkaan R 15, jos rakennus suojataan automaattisella sammutuslaitteistolla ja nämä rakenteet ovat vähintään A2-s1, d0-luokan rakennustarviketta;
- P1-luokan rakennuksessa luokkaan R 30, jos rakennus suojataan automaattisella sammutuslaitteistolla;
- P2-luokkaisessa palovaarallisuusluokan 1 rakennuksessa luokkaan R 15, jos nämä rakenteet ovat vähintään A2-s1, d0-luokan rakennustarviketta;
- P2-luokkaisessa palovaarallisuusluokan 2 rakennuksessa luokkaan R 15, jos rakennus suojataan automaattisella sammutuslaitteistolla ja nämä rakenteet ovat vähintään A2-s1, d0-luokan rakennustarviketta.

Vaatimukset yläpohjan rakenteille, jotka eivät ole rakennuksen kantavan rungon tai jäykisteiden olennainen osa, on esitetty määräyskokoelman osan E1 taulukossa 6.2.1.

Lievennysten käyttö edellyttää, että yläpohjan lämmöneriste on tehty vähintään A2-s1, d0-luokan rakennustarvikkeista, ns. jatkuva sortuminen on estetty ja osastointiin liittyvät vaatimukset ja ohjeet täyttyvät.”

Huom. Eurocode-järjestelmään liittyen ohjeita jatkuvan sortumisen estämiseksi esitetään standardissa SFS-EN 1991-1-7 [13] ja sen kansallisessa liitteessä.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 [2] kohdassa 6.3.1 todetaan lisäksi, että toiminnallista palomitoitusta käytettäessä:

”rakennusta pidetään riittävän paloturvallisena kantavien rakenteiden osalta, mikäli:

- yli kaksikerroksinen rakennus ei yleensä sorru palon eikä jäähtymisvaiheen aikana tai
- enintään kaksikerroksinen rakennus ei sorru poistumisen turvaamiseen, pelastustoimintaan ja palon hallintaan saamiseen tarvittavana aikana.

Palorasituksena käytetään oletetun palonkehityksen mukaisia olosuhteita siten, että palorasitus todennäköisesti kattaa kyseisessä rakennuksessa esiintyvät tilanteet.”

Tällöin ei käytetä em. luokitukseen perustuvaa palonkestoaikaa, vaan rakennuksen paloturvallisuus todetaan toiminnallisen tarkastelun perusteella.

Yllä olevilla lainauksilla on haluttu tuoda esille Suomen rakentamismääräyskokoelman sallimat toiminnallisen mitoituksen laajat käyttömahdollisuudet. Lainauksissa on lihavoitettua tekstiä siirrettäessä teksti normikorttiin. Lihavoitettua tekstiä pyritään kiinnittämään huomiota erityisesti tämän normikortin soveltamiseen liittyviin kohtiin.


4.1.2 Enintään 2-kerroksisen rakennuksen yläpohjan rakenteiden vaatimukset

Edellä mainittujen kantavia rakenteita koskevien yleisten vaatimusten yhteydessä osan E1 [2] taulukossa 6.2.1 annetaan enintään 2-kerroksisten rakennusten yläpohjan rakenteille erilliset vaatimukset. Tämä osa taulukosta 6.2.1 on kopioitu tämän normikortin taulukkoon 1. Vaatimukset riippuvat rakennuksen paloluokasta ja palokuormasta sekä siitä, katsotaanko yläpohjan rakenteiden olevan kantavan rungon tai jäykistysjärjestelmän olennaisia osia vai ei.

Uutena mahdollisuutena v. 2011 julkaistussa osassa E1 on mm. se, että yläpohjassa sallitaan myös muuta kuin vähintään luokkaa A2-s1, d0 olevat eristemateriaalit, jos ne on suojattu syttymiseltä, hiiltymiseltä tai muulta vaurioitumiselta taulukossa esitetyillä tavoilla.

Taulukko 1 Ote Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 [2] taulukosta 6.2.1. Yläpohjan rakenteiden luokkavaatimukset. Palokuorma on ilmoitettu lattia-m² kohden. HUOM. Kaikki alla mainitut taulukon merkinnät eivät kohdistu tässä esitettyyn otteeseen.

Rakennuksen paloluokka							
P1			P2			P3	
Palokuorma MJ/m ²			Palokuorma MJ/m ²				
ylä	600-	alle	ylä	600-	alle		
1200	1200	600	1200	1200	600		
Sarake	1	2	3	4	5	6	7

<p>Yläpohjan rakenteiden vaatimukset enintään 2-kerroksisessa rakennuksessa, jossa ei ullakkoa, mikäli yläpohjan eristeet ovat vähintään A2-s1, d0-luokkaa, tai mikäli yläpohjan eristeet on suojattu syttymiseltä, hiiltymiseltä tai muulta vaurioitumiselta:</p> <ul style="list-style-type: none"> - P1-luokan rakennuksissa K₂ 60-luokan suojaverhous tai EI 60-luokan rakenne ja - P2-luokan rakennuksissa K₂ 30-luokan suojaverhous tai EI 30-luokan rakenne. <p>Läpiviennit ja muut asennukset tulee toteuttaa siten, että eristeiden suojaus ei niiden johdosta heikkene.</p>							
- rakenteet, jotka ovat rakennuksen kantavan rungon tai jäykisteiden olennainen osa ¹⁾	R 60	R 60	R 60	R 30	R 30	R 30	-
- rakenteet, jotka eivät ole rakennuksen kantavan rungon tai jäykisteiden olennainen osa ¹⁾	R 15	R 15	R 15	R 15	R 15	R 15	-
Ullakon tai ontelon vesikattorarakenteet, jotka eivät ole rakennuksen rungon olennaisia kantavia tai palossa runkoa jäykistäviä rakenteita	-	-	-	-	-	-	-
Taulukon huomautukset:	<p>Parvekkeiden palonkestävyysvaatimus on puolet kerroksen kantavien rakenteiden vaatimuksesta.</p> <p>Tuotanto- ja varastorakennuksessa sallitaan lievennyksiä Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden E2 mukaisesti.</p> <p>¹⁾ Ohje: Taulukossa 6.2.1 tarkoitettuja kantavan rungon tai jäykisteiden olennaisia osia ovat pääkannattajat, runkoa jäykistävät sekundaarikannattajat ja yläpohjan jäykisteet ja muut sellaiset yksittäiset rakenteet, jotka toimivat yläpohjan stabiiliteetin säilyttämiseksi, sekä näiden väliset liitokset.</p>						
Taulukon merkinnät:	<p>* = rakennuksen eristeiden ja muiden täytteiden tulee olla vähintään A2-s1, d0-luokan tarvikkeista.</p> <p> = kantavat rakenteet on tehtävä vähintään luokan A2-s1, d0 tarvikkeista</p> <p>- = ei luokkavaatimusta (katso kohta 6.1.2)</p> <p>ei mahd. = ei mahdollinen</p>						

4.2 Yläpohjan kattokannattimien sivuttaistukina toimivat muotolevyt

4.2.1 Määräykset

Aikaisemman RakMK osan E1 (2002) [14] taulukossa 6.2.1 olennaisille ja ei-olennaisille osille ei annettu tarkempaa määritelmää, mikä on joidenkin rakennejärjestelmien tapauksessa johtanut erilaisiin tulkintoihin käytännön rakennusprojekteissa. Rakennuksen yläpohjan kattokannattimien (esim. kattoristikoiden yläparre) sivuttaistukena käytettävien muotolevyrakenteiden kohdalla on yleinen tulkinta kuitenkin ollut se, että ne eivät ole

taulukossa 6.2.1 tarkoitettuja kantavan rungon tai jäykisteiden olennaisia osia, sillä ne tukevat vain yksittäisiä rakennusosia, eivät koko yläpohjaa (olettaen, että rakennuksen kokonaisjäykistys on hoidettu asianmukaisin vinositein paloluokkaan R 60). Muotolevyjen paloluokkavaatimuksen R 15 ei ole osoitettu aiheuttaneen vaaraa todellisissa rakennuksissa.

RakMK E1 (2011) [2] määritelmä (taulukon 6.2.1 huomautus 1) on edelleen tulkittavissa siten, että vain paikallisina sivuttaistukina toimivat muotolevyt eivät ole tässä tarkoitettuja olennaisia osia: ne toimivat yksittäisten rakenneosien jäykisteinä, mutta eivät yläpohjan stabiiliuden kannalta olennaisina osina.

E1 (2011) [2] taulukkoa 6.2.1 luettaessa on lisäksi huomattava, että korkeintaan 2-kerroksisten rakennusten yläpohjia koskevassa kohdassa (taulukon alaosa) itse asiassa sovelletaan toiminnallista mitoitustarkastelua lievennettäessä standardipalomitoituksen yleisiä vaatimuksia (taulukon yläosa). Yläpohjille sallitaan lievemmät vaatimukset, koska oletetaan, että henkilöt ovat poistuneet tilasta jo 15 minuutin sisällä palon alkamisesta, eivätkä näiden rakenteiden mahdolliset vauriot sen jälkeen aiheuta henkilöille vaaraa.

4.2.2 Yläpohjan muotolevyjen toiminta

Muotolevyille on palotilanteessa tyypillistä toimiminen köysirakenteena, kun vetovoiman suuntainen kiinnitys on riittävän vahva (ks. normikortin Luku 5). Myös köysirakenteena toimiessaan muotolevy tukee ristikkoa sivusuunnassa, jos vetovaikutus on molemmilla puolilla ristikkoa. Tällöin ei muotolevyä ole tarpeellista palosuojata erikseen (mahdollista liitosalueiden suojausta lukuunottamatta), eikä ristikoiden palonaikaisen stabiiliuden takaamiseksi tarvita erillisiä nurjahdustukia. Lisäksi Luvun 5 ja Liitteen C tarkastelujen perusteella yläpohjan muotolevy toimii köysirakenteena turvallisesti 60 minuutin standardipalossa, riippuen käyttöasteesta.

Luokitusten ymmärtämiseksi on tarkasteltava todellisia palotapauksia, kuten on tehty normikortin liitteen B laskelmissa. Standardipalotapauksessa on selvää, että suojaamattomat teräsrakenteet menettävät kantavuutensa noin 15 minuutin jälkeen palon alkamisesta. Jos sen sijaan tarkastellaan realistisempia palotapauksia, huomataan, että ne eivät tyypillisissä hallirakennuksissa käytännössä milloinkaan vastaa standardipalolosuhteita, mikä on myös E1 [2] Taulukon 6.2.1 yläpohjarakenteiden määräyksiä koskevan osuuden taustalla. Vaikka palokuorma olisi suuri ja se olisi sijoitettu tasaisesti koko hallin alueelle (kohta B2.2), ei tilanne vastaa standardipaloa, sillä palo etenee vaiheittain hallin eri osiin – koko hallin lieskahdusta ei yleensä tapahdu. Tämän vuoksi myös rasiusten jakaantuminen eri tavoilla palon eri aikoina on mahdollista.

Tuotantokäytössä olevissa hallirakennuksissa on tämän tyyppinen globaali palo harvinainen. Palot sen sijaan alkavat paikallisina ja yleensä myös pysyvät paikallisina johtuen toisaalta palokuorman vähäisyydestä ja sen sijoituksesta sekä todennäköisistä sammutustoimenpiteistä, ks. kohta B2.3. Koko hallirakennus kestää mitoituspalon alusta loppuun (kesto 40 minuuttia), vaikka kaikki rakenteet ovat suojaamattomia ja mitään sammutustoimenpiteitä ei suoriteta. Suoraan palolähteen yläpuolella oleva ristikko menettää kantokykynsä, mutta ei romahda sitä tukevien köysikäyrinä toimivien kattoorsien ansiosta. Rasiuksen jakaantuvat muille ristikoille. On selvää, että jos ristikot, pilarit

ja vinositeet on suojattu R 60 luokituksen mukaisesti, on hallin palonkestävyys vielä merkittävästi parempi kuin tarkastellussa palosuojaamattomassa tapauksessa.

Koska kantavien rakenteiden standardipalomitoitusta koskevissa määräyksissä voidaan kuitenkin viitata vain standardipalokäyrän mukaisiin R-paloluokkiin, on edellä kuvattu hallirakennuksen toiminta ilmaistava määräyksissä näiden luokkien avulla, kuten on E1 [2] Taulukossa 6.2.1 tehty. Yläpohjarakenteen muotolevyjen R 15 -luokitus ei kuitenkaan tarkoita sitä, että yläpohjan muotolevyrakenteet olisi tarpeen poistaa rakennemallista 15 minuutin jälkeen, sillä ne tukevat kattoristikoida tämän jälkeenkin, kuormat jakaantuvat rakenteille uudestaan palotilanteessa ja yläpohjan tai rakennuksen sortumista ei yleensä tapahdu.

Yhteenvedona voidaan todeta, että rungon ja jäykisteiden olennaisia ja ei-olennaisia osia koskevien vaatimusten tarkoitus on estää jatkuvan sortuman tai koko rakennuksen rungon sortuminen 60 minuutin aikana palon alkamisesta. Jatkuva sortuma on tässä normikortissa käsiteltävissä rakennuksissa estetty R 60 -luokiteltujen runkorakenteiden ja jäykistykseen käytettävien vinositeiden avulla.

Lisäksi on syytä huomata, että käsiteltävän yläpohjarakenteen tekninen toiminta ei ole riippuvainen rakennuksen kerrosluvusta.

4.2.3 Yläpohjan muotolevyrakenteiden rakenneluokka ja seuraamusluokka

Eurooppalaisen teräsohutlevyrakenteiden suunnittelustandardin SFS-EN 1993-1-3 + AC [15] luvun 2 kohdassa (6) jaetaan ohutlevysauvat ja muotolevyrakenteet kolmeen rakenneluokkaan:

Rakenneluokka I: Rakenteet, joissa kylmämuovatut sauvat ja levyt suunnitellaan siten, että ne vaikuttavat rakenteen kokonaisstabiiliuteen ja -lujuuteen;

Rakenneluokka II: Rakenteet, joissa kylmämuovatut sauvat ja levyt suunnitellaan siten, että ne vaikuttavat yksittäisen rakenneosan stabiiliuteen ja lujuuteen;

Rakenneluokka III: Rakenteet, joissa kylmämuovattua levyä käytetään rakenneosana, joka vain siirtää kuormia rakenteelle.

Yläpohjan kannattimien sivuttaistukina toimivat muotolevyt kuuluvat tämän perusteella rakenneluokka II:een, sillä ne tukevat yksittäisiä rakenteita, eivät koko rakennejärjestelmää.

Eurooppalaisen standardin SFS- EN 1990 Suomen kansallisen liitteen [16] Liitteen B taulukossa B1 (FI) määritellään vuorostaan rakenteiden seuraamusluokat CC (Consequence Class). Taulukko on kopioitu tämän normikortin taulukkoon 2.

Taulukon mukaan standardin SFS-EN 1993-1-3 rakenneluokan II muotolevyrakenteet kuuluvat seuraamusluokkaan CC1, jossa rakenteen kantokyvyn menetyksestä voi seurata ”**vähäiset** seuraamukset ihmishenkien menetyksen *tai pienten* tai **merkityksettömien** taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia” (lihavoinnit kansallisen liitteen mukaisesti).

Taulukko 2 Seuraamusluokkien määrittely (NA(FI) SFS-EN 1990 [16])

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai hyvin suurten</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten <ul style="list-style-type: none"> – yli 8-kerroksiset²⁾ asuin-, konttori- ja liikerakennukset – konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot – raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset Erikoisrakenteet kuten esim. suuret mastot ja tornit Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet hienorakeisten maalajien alueilla siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai merkittävien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai pienten tai merkityksettömien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten esim. varastot Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten <ul style="list-style-type: none"> – matalalla olevat alapohjat, ilman kellaritiloja – ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne – sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana – standardin SFS-EN 1993-1-3:n rakenneluokkien (structural class) II ja III muotolevyrakenteet. – standardin SFS-EN 1993-1-3:n rakenneluokan (structural class) I muotolevyrakenteet levyyn taivutusta aiheuttaville pintaa vasten kohtisuorille kuormille³⁾.

¹⁾ ylä- ja välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2 elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena. Rakennuksen koostuessa erilaisista toisistaan riippumattomista rakennusosista määritetään kunkin osan seuraamusluokka erikseen.

²⁾ kellarikerrokset mukaan luettuina.

³⁾ ei koske kuormituksia, jotka syntyvät, kun muotolevyrakenteita käytetään siirtämään levytason suuntaisia leikkausvoimia (levyvaikutuksen hyväksikäyttö) tai normaalivoimia.

Myös Eurocode-luokituksen mukaan voidaan näin ollen tulkita, että yläpohjan muotolevyrakenteet eivät ole rakennuksen rungon tai jäykistyksen kannalta olennaisia osia E1 [2] Taulukon 6.2.1 huomautuksen 1 tarkoittamassa merkityksessä.

Suomen kansallisessa liitteessä NA SFS-EN 1993-1-3 [17] todetaan, että standardin SFS-EN 1990 kansallisessa liitteessä esitettyjä sääntöjä muotolevyille voidaan soveltaa vain, jos muotolevyjen valmistus on kolmennen osapuolen valvonnassa.

4.2.4 Ohjeistus ja tulosten laajentaminen/soveltaminen

Tässä normikortissa esitettyjen tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että tapauksessa, jossa

- rakennus on korkeintaan 2-kerroksinen ja teräsrakenteinen,
- tarkastellaan yläpohjan rakenteita ja niiden palonkestävyysvaatimuksia ja
- rakennuksen yläpohjan kantava runko ja rakennuksen kokonaisjäykistyksen ja yläpohjan jäykistyksen varmistavat vinositeet tai vastaavat rakenteet on luokiteltu paloluokkaan R 60,

yläpohjan kattokannattimien (esimerkiksi kattoristikot) yläpaarten sivuttaistukina toimivat muotolevyrakenteet tai orret eivät ole yläpohjan kantavan rungon tai jäykisteiden olennaisia osia E1 (2011) [2] Taulukossa 6.2.1 tarkoitetussa merkityksessä, ja ne luokitellaan paloluokkaan R 15.

Näin ollen edellä tarkoitettujen R 15 -luokitellut muotolevyt

- toimivat kattokannattimien sivuttaistukina myös köysirakenteena toimiessaan
- mahdollistavat rakennuksen kuormitusten uudelleen jakautumisen palotilanteessa.
- toimivat kuormaa muille rakenteille jakavina rakenneosina yhden pääkannattimen kantokyvyn heikentyessä
- eivät vaikuta rakennuksen tai sen yläpohjan kokonaiskantavuuteen tai stabiiliuteen heikentävästi.

Koko rakennuksen sortuminen palotilanteessa on estetty R 60 -luokiteltujen kantavien rakenteiden ja vinositeiden sekä palotilanteessa tapahtuvan kuormien uudelleenjakautumisen johdosta.

5 Muotolevyn laskenta köysirakenteena tulipalotilanteessa

Köysirakenteena toimivan teräksestä valmistetun muotolevyrakenteen kestävyys voidaan laskea normaalien köysikäyräyhtälöiden mukaisesti. Menetelmä on suunnitteluohjeesta riippumaton ja esitetty useissa eri lähteissä, esim. Ylinen [18], ESDEP [19]. Köysikäyränä toimivan rakenteen kuormitukset siirtyvät vetorasituksiksi tuille.

On huomattava, että muotolevyjen limitys jatkoskohdissa on suunniteltava ja toteutettava asianmukaisesti (ks. esim. tämän normikortin liite A) ja että kiinnitysten kestävyys palotilanteessa on oleellinen tekijä köysirakenteen toiminnassa. Kiinnikkeiden valinta ja mitoitus tehdään voimassa olevien ohjeiden mukaisesti. Erilaisten kiinnitysten toimintaa palotilanteessa ovat tutkineet mm. Kallerová et al. [20] ja Lu et al. [21].

Kun riippuma on pieni tukipisteiden väliin verrattuna, voidaan köysikäyrää likimääräisesti kuvata paraabelilla. Tasaisesti kuormitetun rakenteen köysikäyrän differentiaaliyhtälö on [22]:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q(x)}{H}$$

missä

x ja y ovat tarkasteltavan pisteen koordinaatit
 $q(x)$ on rakenteeseen vaikuttava sen tasoa vastaan kohtisuora tasainen kuormitus
 H on köysivoiman vaakasuuntainen komponentti.

Symmetrisen köysikäyrän tasapainoehdoista seuraa, että köysivoiman vaakasuuntainen komponentti on arvoltaan vakio koko köyden pituudella.

Kun differentiaaliyhtälön ratkaisu tunnetaan, saadaan köysivoima S kaavasta

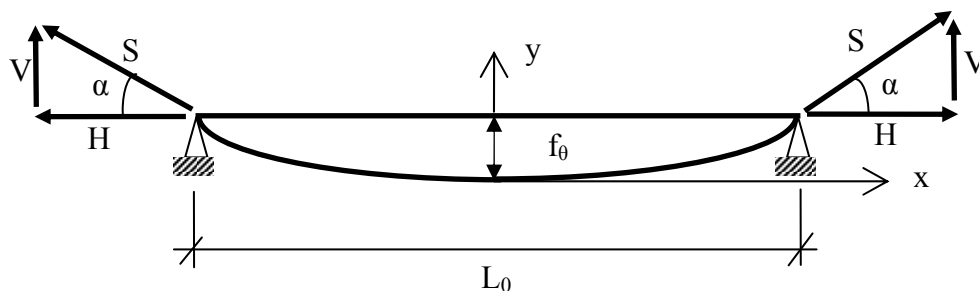
$$S = H \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

Kun q on vakio $q = q(x)$ ja köysikäyrän alin piste valitaan origoksi, saadaan köysikäyrän yhtälöksi

$$y = \frac{q}{2H} x^2$$

Toisaalta paraabelin yhtälö voidaan johtaa köyden pituuden L_0 ja riippuman f perusteella kuvan 2 mukaisesti:

$$y = \frac{4f_\theta}{L_0^2} x^2$$



Kuva 2 Köysikäyrä. Köysivoima S voidaan jakaa vaakasuoraan komponenttiin H ja pystysuoraan komponenttiin V .

Koska palotilanteessa rakenteeseen syntyy venymää sekä lämpölaajenemisen että köydessä vaikuttavan vetovoiman vaikutuksesta, tulee köysivoimien laskennasta iteratiivinen prosessi.

Kun muotolevyn pitenemä voidaan olettaa pieneksi suhteessa tukiväliin ja alkutaipuma nolllaksi, taipumalle f_{θ} voidaan ESDEP-materiaalissa [19] esitetyn kaavan (Luento 7.4.2 Kaava 16) perusteella johtaa lauseke

$$f_{\theta} = \sqrt{\frac{3 \cdot \Delta L_{\theta} \cdot L_0}{8}}$$

Riippuvan köyden origon momenttiehdosta $M(L/2) = qL^2/8 = H \cdot f_{\theta}$ saadaan laskettua köysivoiman vaakasuora komponentti:

$$H = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f_{\theta}}$$

Tuella vaikuttava köysivoima S voidaan laskea, kun tunnetaan H :n lisäksi köysikäyrän kiertymäkulma α , joka saadaan käyrän yhtälön derivaatan perusteella.

Normikortin liitteessä C on esimerkki köysivoimien laskennasta yläpohjan muotolevyrakenteessa tulipalossa. Teräksen lujuuden pienennyskertoimet otettiin SFS-EN 1993-1-2 [5] Liitteen E mukaisesti. Muotolevyn jänneväli on 6 000 mm ja poikkipinta-ala 1 200 mm²/m. Kuormituksiksi palotilanteessa valittiin rakenteiden omapaino $g = 0,6$ kN/m² ja lumikuorma $q = 1,0$ kN/m². Esimerkkirakenne laskettiin standardipalonkestoajoja R 15, R 30 ja R 60 vastaavissa tilanteissa. Tulokset on esitetty Taulukossa 3.

Taulukko 3 Liitteen C mukaisten esimerkkilaskelmien tulokset.

	R15	R30	R60
ΔL	68,7 mm	81,3 mm	94,8 mm
f	395 mm	431 mm	465 mm
H	18 630 N	17 177 N	15 961 N
S	19 267 N	17 870 N	16 712 N
Jännitys s_s	16,06 N/mm ²	14,89 N/mm ²	13,93 N/mm ²
Teräksen lujuus $f_{y\theta}$	38,15 N/mm ²	21,57 N/mm ²	14,33 N/mm ²
Hyväksikäyttöaste	0,42	0,69	0,97

Esimerkkilaskelmien perusteella muotolevy kantaa sille kohdistuvat kuormat turvallisesti vielä 60 minuutin jälkeen standardipalossa, kunhan varmistutaan kiinnitysten kestävydestä. Koska todellisessa palossa

- muotolevyn lämpötilat jäävät usein huomattavasti standardipaloo alhaisemmiksi,
- laskennassa käytettiin poikkileikkausluokka 4:n mukaisia 0,2-rajaan perustuvia lujuuden pienennysarvoja, vaikka kysessä on vedetty rakenne, jolle voitaisiin käyttää SFS-EN 1993-1-2 [5] Taulukon 3.1 mukaisia, 2,0 % venymään perustuvia lujuuden pienennysarvoja,
- teräksen lämpötila oletettiin samaksi kuin kaasun lämpötila, vaikka todellisuudessa se on tätä alhaisempi,

ovat laskelmat varmalla puolella. Rakenteen todellisella hyväksikäyttöasteella on luonnollisesti merkittävä vaikutus sen kestävyteen tulipalossa.

6 Rakenneratkaisut eri palonkestoluokissa

Esimerkkejä yläpohjan teräksisen muotolevyn päätyalueen ja välitukien detaljeista sekä liittymästä osastoivaan väliseinään on esitetty mm. Rautaruukki Oyj:n detaljikansioissa [22] ja SBI:n julkaisussa Sedin ja Thor [23]. Vastaaville rakenteille on Norjassa annettu tekninen hyväksyntä [24].

Useampiaukkoisessa kentässä profiilien limityksen on oltava riittävä. Esimerkkejä muotolevyjatkoksen toteutuksesta on esitetty tämän normikortin Liitteessä A. Kiinnitysten suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Teräksestä valmistettu kantava muotolevyrakente saavuttaa normaalisti palonkestoluokan R 15 suojaamattomana rakenteena. Todellisuudessa se voi toimia hyväksikäyttöasteesta riippuen köysirakenteena 60 minuutin palonkestoon saakka.

Jotta kiinnitysten kestävydestä palotilanteessa voidaan varmistua, tulee muotolevyrakenteen liitosalueiden olla useimmissa tapauksissa suojattuja alapuolelta paloluokissa R 30 ja R 60 .

Jos rakenteiden palosuojaus on toteutettu VTT sertifikaatin Nro VTT-C-4921-10 [25] mukaisella vesisprinklauksella, voidaan muotolevyn rakenteellinen toiminta varmistaa palonkestoluokkaan R 90 asti.

7 Yhteenveto

Kun korkeintaan kaksikerroksisen rakennuksen ja sen yläpohjan kokonaisstabiilius on varmistettu R 60 –luokitelluilla vinositeillä tai vastaavilla rakenteilla, voidaan yläpohjan pääkannattimien paikallisina sivuttaistukina (kiepahdustukina) toimivien muotolevyjen katsoa olevan paloluokkaa R 15 ja E1 (2011) [2] Taulukon 6.2.1 tarkoittamia ei-olennaisia osia.

Myös Eurocode-järjestelmä ja Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990 [16] asettavat tässä tarkoitetut muotolevyrakenteet alimpaan seuraamusluokkaan CC1.

Tehtyjen tarkastelujen perusteella yläpohjan muotolevy toimii käyttöasteesta riippuen turvallisesti köysirakenteena vielä 60 minuutin jälkeen palon alkamisesta.

Lähdeluettelo

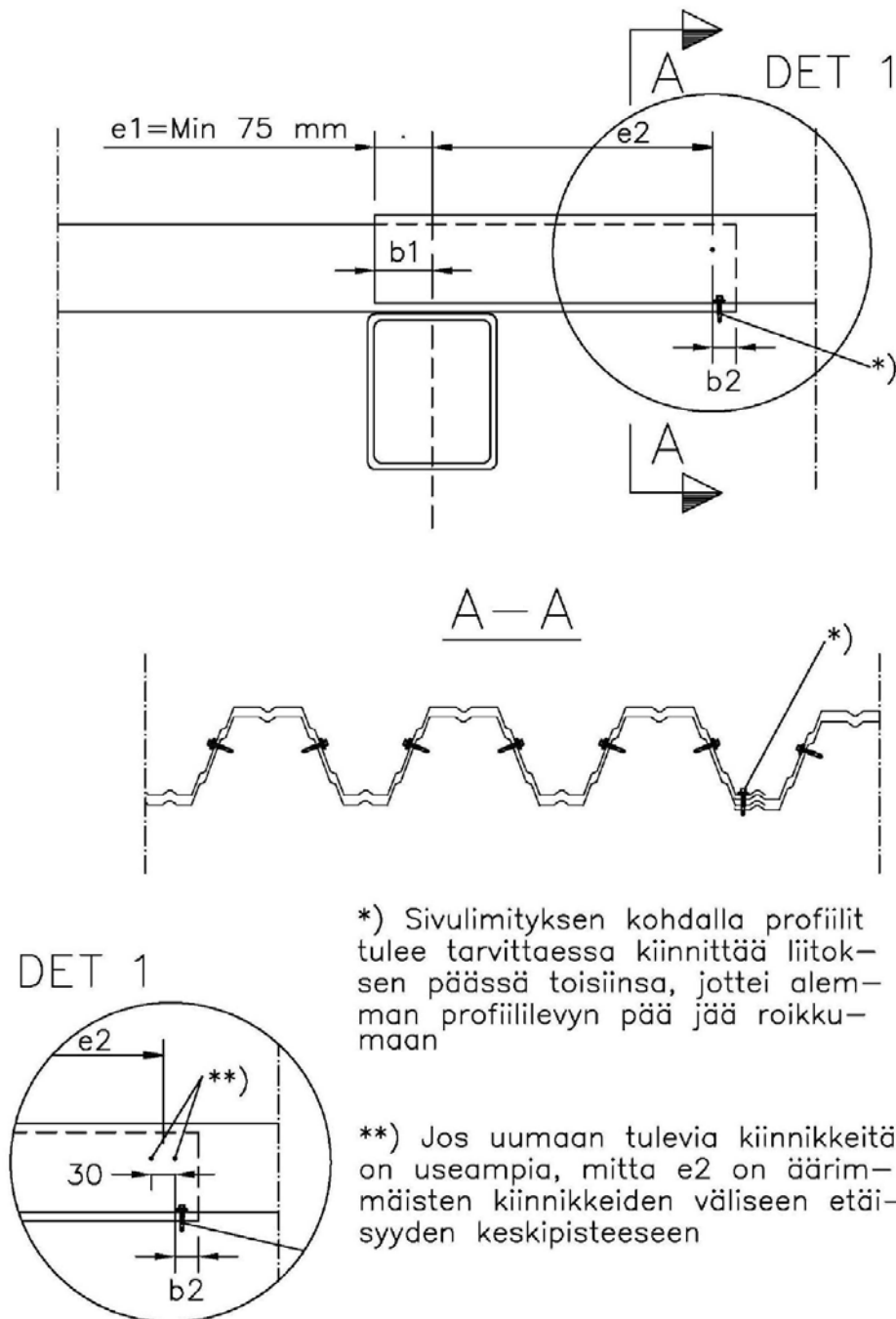
1. Kantavat poimulevyt. Asennusohje. Rautaruukki Oyj 2009. www.ruukki.com
2. E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011. Ympäristöministeriö. www.ymparisto.fi
3. E2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Tuotanto- ja varastorakennusten paloturvallisuus. Ohjeet 2005. Ympäristöministeriö. www.ymparisto.fi
4. E4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Autosuojien paloturvallisuus. Ohjeet 2005. Ympäristöministeriö. www.ymparisto.fi
5. SFS-EN 1993-1-2 Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. SFS 2005.
6. SFS-EN 1991-1-2 Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions. Actions on structures exposed to fire
7. Fire resistance test on a loadbearing separating roof construction of Rannila 113 steel sheet deck profiles. Test report NO. RTE3213/00, VTT Building and Transport, 2001. (EI JULKINEN)
8. Sokol, Z., Wald, F., Design of corrugated sheets exposed to fire, Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures. Taylor & Francis Group, London, 2006.
9. Sokol, Z., Wald, F., Pincemaile, S., Structural Integrity of corrugated sheets exposed to fire, Steel – a New and Traditional Material for Building. Taylor & Francis Group, London, 2006.
10. Lu, W., Mäkeläinen, P., Outinen, J., Numerical Simulation of Catenary Action in Cold-Formed Steel Sheeting in Fire. Proceedings of 5th Conference on Thin-Walled Structures - Recent Innovations and Developments, Gold Coast, Australia, June 18-20, 2008, pp.713-720.
11. Ohutlevyalaatan polttokoe, Tutkimusselostus No 404/2003/312, Tampereen teknillinen yliopisto, 2003. (EI JULKINEN)
12. Paloturvallisuussuunnittelijan oppimisympäristö, VTT 2007.
http://proxnet.vtt.fi/fise/simon/Fise/opetusmateriaali/fise_etusivu.html
Tunnus: fise-reader ; Salasana: June1906
13. SFS-EN 1991-1-7:en Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Osa 1-7: Onnettomuuskuormat. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-7: General actions. Accidental actions. SFS 2007.
14. E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. Ympäristöministeriö. www.ymparisto.fi
15. SFS-EN 1993-1-3 + AC Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt – Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Suomen kansallinen liite. SFS 2009.
16. NA SFS-EN 1990 Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990 Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Ympäristöministeriö 2007.
17. NA SFS-EN 1993-1-3 Kansallinen liite standardiin Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt – Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Ympäristöministeriö 2008.
18. Ylinen, A., Kimmo- ja lujuusoppi. Valtion teknillinen tutkimuslaitos Julkaisu 10 / WSOY Porvoo 1948.
19. ESDEP (European Steel Design Education Programme / Eurooppalainen teräsrakenteiden suunnittelun koulutusohjelma) <http://www.terasinfo.fi/Esdep/index.html>.
20. Kallerová, P., Sokol, Z., Wald, F., Connections of trapezoidal sheets at elevated temperature. Proceedings of International Conference on Applications of Structural Fire Engineering, Czech Technical University in Prague, 19-20 February 2009.
<http://eurofiredesign.fsv.cvut.cz/Proceedings.htm>
21. Lu, W., Mäkeläinen, P., Outinen, J., Behaviour of screwed shear sheeting connection in fire. Proceedings of International Conference on Applications of Structural Fire Engineering, Czech Technical University in Prague, 19-20 February 2009.
<http://eurofiredesign.fsv.cvut.cz/Proceedings.htm>
22. Rautaruukki Oyj:n tuoteselosteet ja detaljikansiot. www.ruukki.com
23. Sedin, G., Thor, J., Tak och väggar av tunnplåt - Detaljutformning med hänsyn till brandsäkerhet, SBI Stålbyggnadsinstitutet Publikation 65, 1979.
24. Gasell takkonstruksjoner med brannmotstand R15 – R60, NBI Teknisk Godkjenning Nr 2316, Norges byggforskningsinstitutt (NBI) 2005. Tuotehyväksyntä vanhentunut 24.11.2008.
25. VTT sertifiikaatti Nro VTT-C-4921-10 Teräsrakenteiden palosuojaus vesisprinklerilaitteistolla. VTT 2011 www.vtt.fi

26. ABAQUS/Standard User's Manual. Version 6.7.2. 2007.
27. SFS-EN 1363-1 Palonkestävyydestit. Osa 1: Yleiset vaatimukset. SFS 2002.
28. FDS Fire Dynamics Simulator. NIST National Institute of Standards and Technology.
<http://fire.nist.gov/fds/>

Liite A Rakennedetaljeja

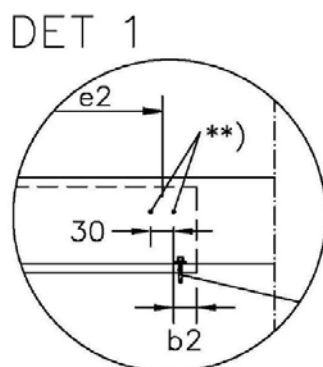
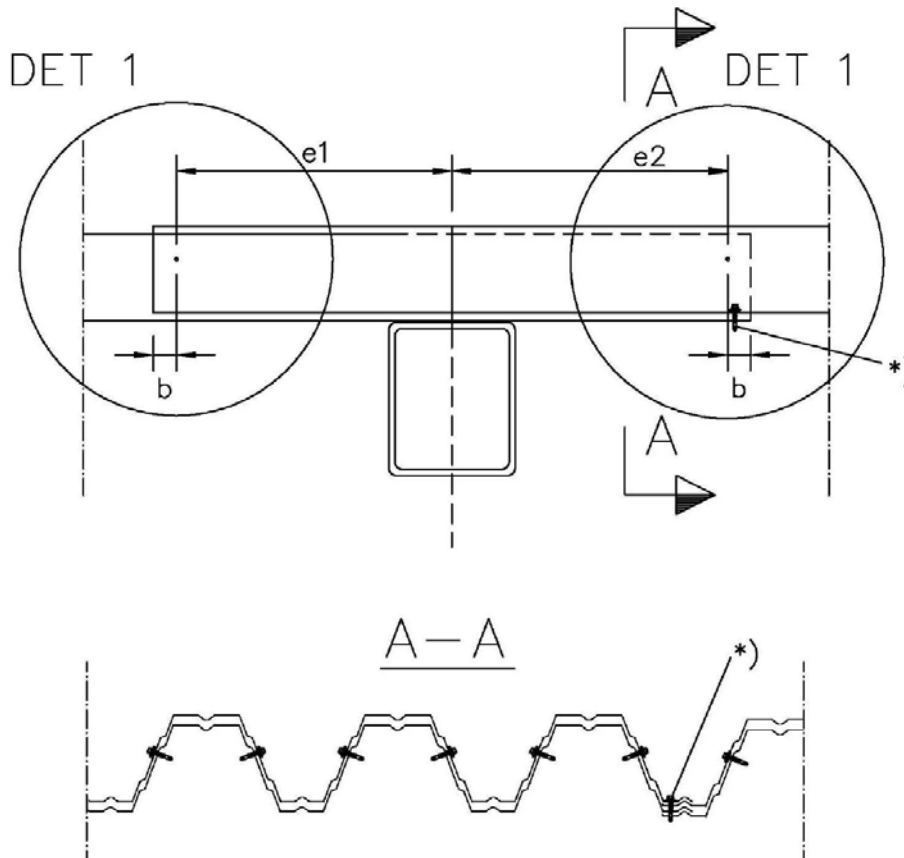
Esimerkki momenttijäykästä levyjatkoksesta, tyyppi 0.0/0.1 [1]

Toispuoleisessa momenttijäykässä päittäisliitoksessa levyt tulevat tuen kohdalla päällekkäin oheisen mukaisesti. Limityspituus e_1 on vähintään 75 mm tuen keskeltä ja e_2 on yleensä $0.1 \times$ levyn jänneväli. Ulokkeellinen levy asennetaan aina alimmaiseksi. Momenttijäykässä jatkoksessa rakenne on mitoitettu jatkuvaksi ja poimulevyt on kiinnitettävä uumistaan toisiinsa. Ruuvit on sijoitettava uumaan noudattaen käytettävän suunnitteluohjeen tai –standardin mukaisia reuna- ja keskiötäisyyksiä. Rakennesuunnittelija määrittää ruuvien määrät ja paikat. Mitta b_1 ja b_2 voi olla minimissään 25 mm.



Esimerkki momenttijäykästä levyjatkoksesta, tyyppi 0.1/0.1 [1]

Momenttijäykässä päittäisliitoksessa levyt tulevat tuen kohdalla päällekkäin oheisen mukaisesti. Moleminpuolisessa momenttijäykässä liitoksessa limituspituus e_1 ja e_2 on yleensä $0.1 \times$ levyn jänneväli. Momenttijäykässä jatkoksessa rakenne on mitoitettu jatkuvaksi ja profiilit on kiinnitettävä uumistaan toisiinsa. Ruuvit on sijoitettava uumaan noudattaen käytettävän suunnitteluohjeen tai -standardin mukaisia reuna- ja keskiötäisyyksiä. Rakennesuunnittelija määrittää ruuvien määrät ja paikat. Mitta b voi olla minimissään 25 mm.



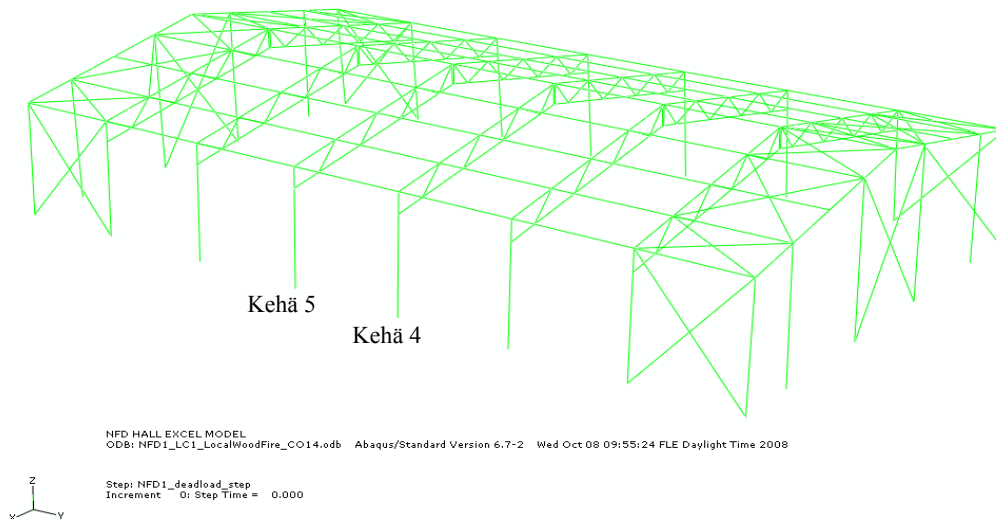
*) Sivulimityksen kohdalla profiilit tulee tarvittaessa kiinnittää liitoksen päässä toisiinsa, jottei alemman profiililevyn pää jää roikkumaan

**) Jos uumaan tulevia kiinnikkeitä on useampia, mitta e_2 on äärimmäisten kiinnikkeiden väliseen etäisyyden keskipisteeseen

Liite B Laskennallisia tarkasteluja: teräsrakenteisen hallirakennuksen yläpohjassa olevien muotolevyrakenteiden toiminta erilaisissa palotapauksissa.

B1 Yleistä

Tarkastellaan tyypillistä kuvan B1 mukaista teräsrakenteista tuotantohallirakennusta erilaisissa tulipalotilanteissa. Ristikoiden väli on 6 metriä ja rakennuksen koko pituus 42 metriä. Rakennuksen leveys on 24 metriä ja harjakorkeus noin 8 metriä. Kaikki teräsrakenteet olivat palosuojaamattomia. Rakennuksen yläpohjassa käytettiin kevyitä orsisauvoja eri kehien ristikoiden väleissä. Näiden orsien toiminta on verrattavissa vastaavan muotolevyn toimintaan. Rakennus mallinnettiin ABAQUS/Standard-ohjelmistolla [26] käyttäen epälineaarisia materiaalimalleja (SFS-EN 1993-1-2 [5]) ja geometrista epälineaarisuutta.



Kuva B1 Tarkasteltava hallirakennus.

Rakennemallin toiminta tarkastettiin ensin normaaliolosuhteissa ja mallin todettiin vastaavan rakenteiden normaalia käyttäytymistä. Palotilanteen tarkasteltavat tapaukset olivat

- standardipalo EN 1363-1 [27] mukaan (sama kuin ISO 834-1 standardipalo)
- suuri, koko lattiapinta-alan kattava luonnollinen palo (globaali palo)
- paikallinen luonnollinen palo.

Kaikissa palotapauksissa rakenteiden kuormituksina oli oman painon lisäksi normaali lumikuorma kertoimella $\psi_1 = 0,4$.

Laskennan tarkoituksena oli tarkastella

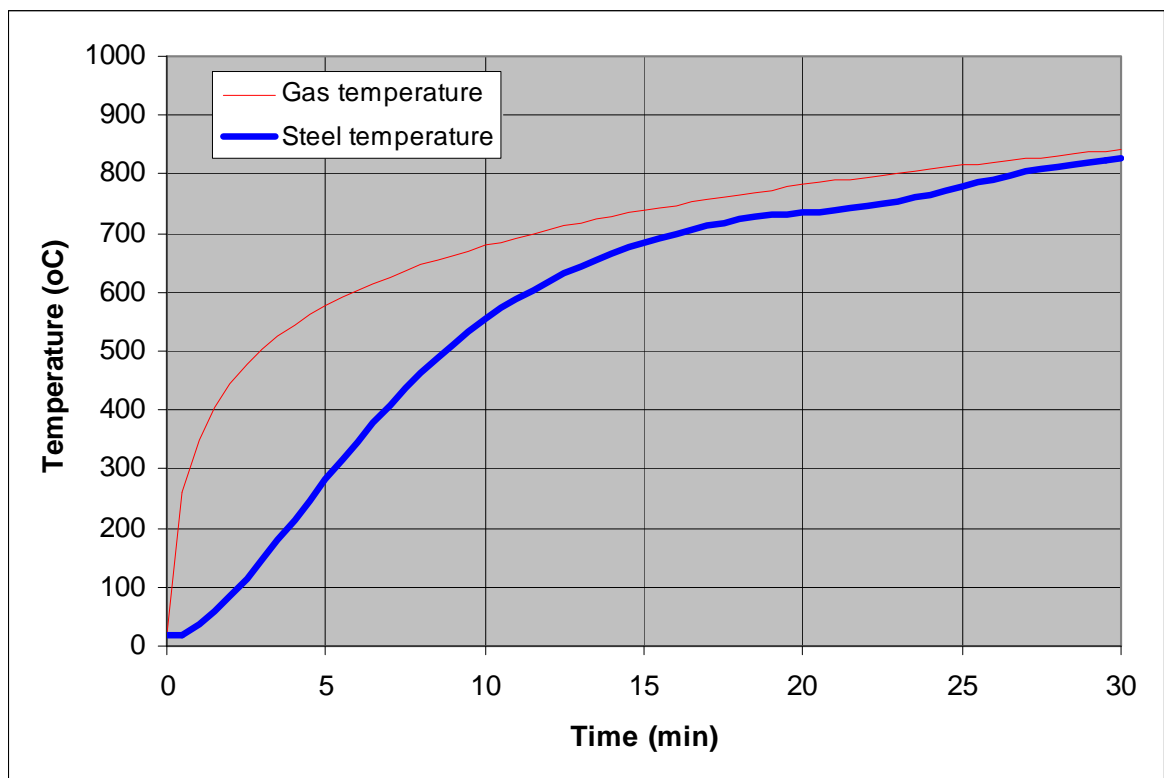
- koko rakenteen jäykistyksen toimivuutta ja kantokykyä erilaisissa palotilanteissa
- kuormitusten uudelleen jakautumista rakenteessa

- orsien ja muotolevyjen toimintaa ristikoiden yläpaarteiden sivuttaistukina ja niiden köysikäyrävaikutusta.

B2 Palotilanteen laskennalliset tarkastelut

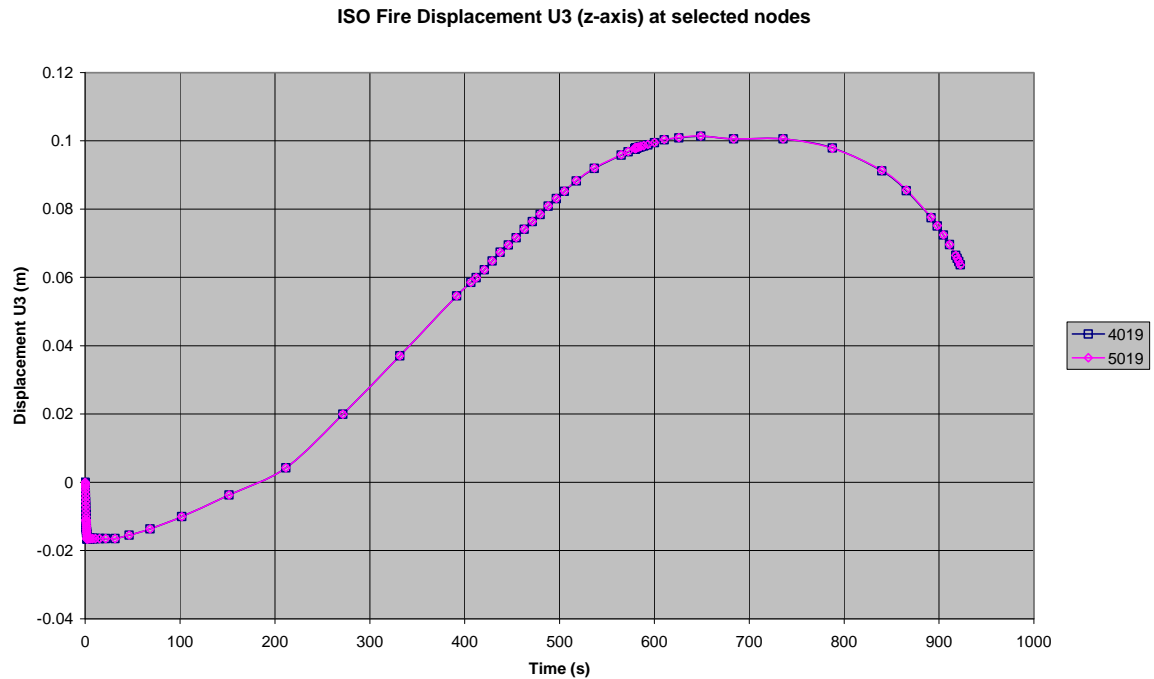
B2.1 Standardipalo

Teräsprofiilien suhteellisen pienistä kokoeroista johtuen kaikkien teräsosien lämpötila määritettiin standardipalossa tyypillisen rakenneosan (RHS 100×100×5) perusteella. Teräksen lämpötila on esitetty kuvassa B2.



Kuva B2 Tarkasteltavan hallin teräsosien lämpötilakehitys standardipalossa.

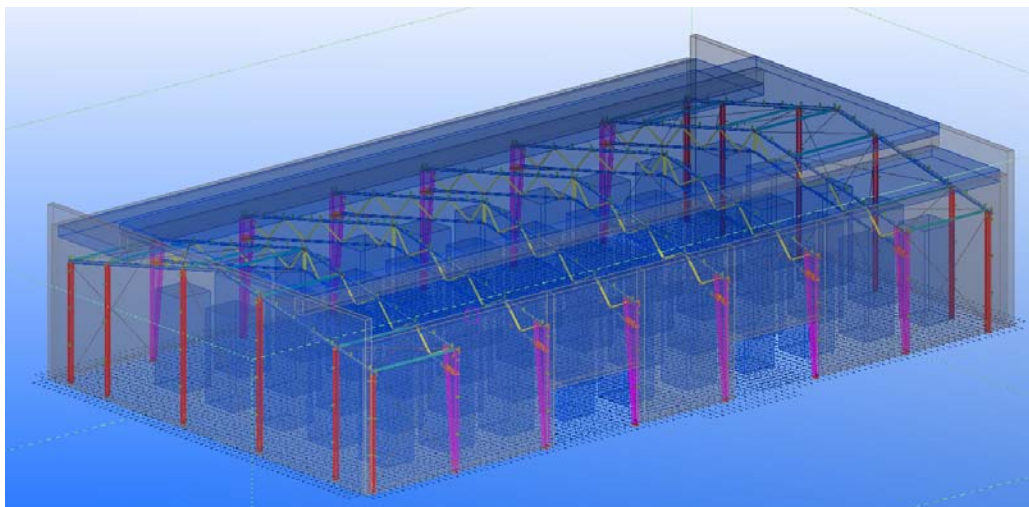
Standardipalon mukainen analyysi keskeytyi ajanhetkellä 920 s (15 min 20 s) konvergointiongelmien vuoksi. Kuvassa B3 esitetään kahden keskellä rakennusta sijaitsevan kehän (kehät 4 ja 5, ks. kuva 1) ylimpien pisteiden pystysuuntainen siirtymä analyysin aikana. Laskennan loppuessa teräksen lämpötila oli noin 700 °C.



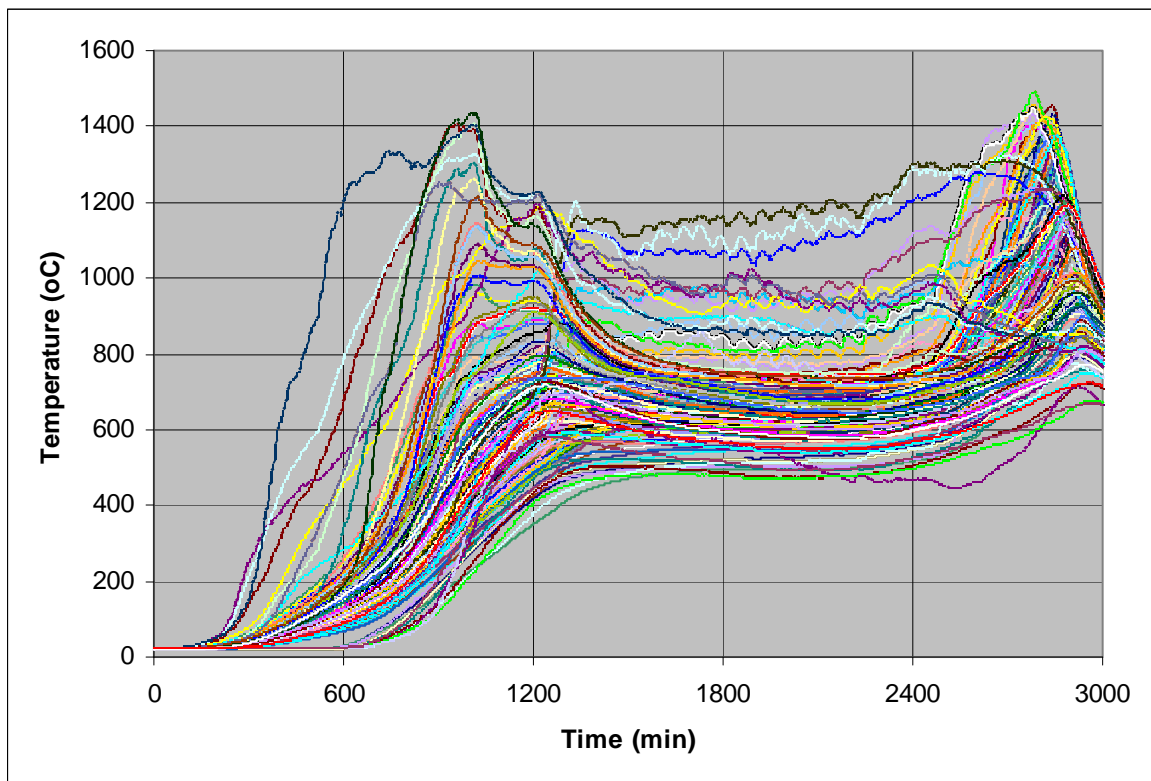
Kuva B3 Kehien 4 ja 5 ylimpien pisteiden pystysuora siirtymä standardipaloanalyysissä.

B2.2 Koko lattiapinta-alan kattava luonnollinen palo (globaali palo)

Jotta saataisiin realistisempi kuva hallirakennuksen toiminnasta todellisessa tulipalossa, mallinnettiin myös luonnollisten palotapausten mukaiset tilanteet. Teräsrakenteiden lämpötilat määritettiin FDS (Fire Dynamics Simulator [28])-analyysien perusteella ja siirrettiin ABAQUS/Standard-analyysiin Excel-makron avulla. Palokuormana oli hallin lattialle asetetut $2 \times 2 \times 5 \text{ m}^3$ -kokoiset puurutilät, joiden k/k-väli oli 2 m (ks. kuva B4). Maksimipaloteho oli n. 200 MW. Palo sytytettiin hallin keskikohdassa kehän 5 alla sijaitsevasta puurutilästä ja sen annettiin FDS-analyysissä kasvaa luonnollista kulkuaan.



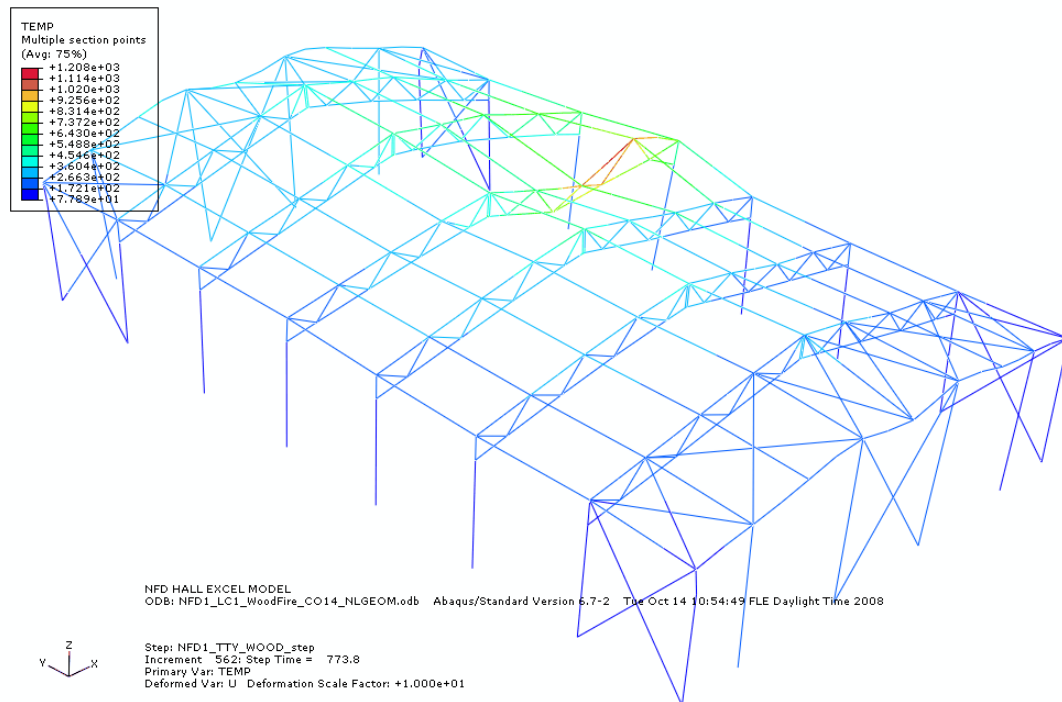
Kuva B4 Palokuorman sijoittelu koko lattiapinta-alan kattavan luonnollisen palon tapauksessa.



Kuva B5 Laskennan lähtötietoina käytetyt teräsrakenteiden lämpötilat globaalien palon tapauksessa.

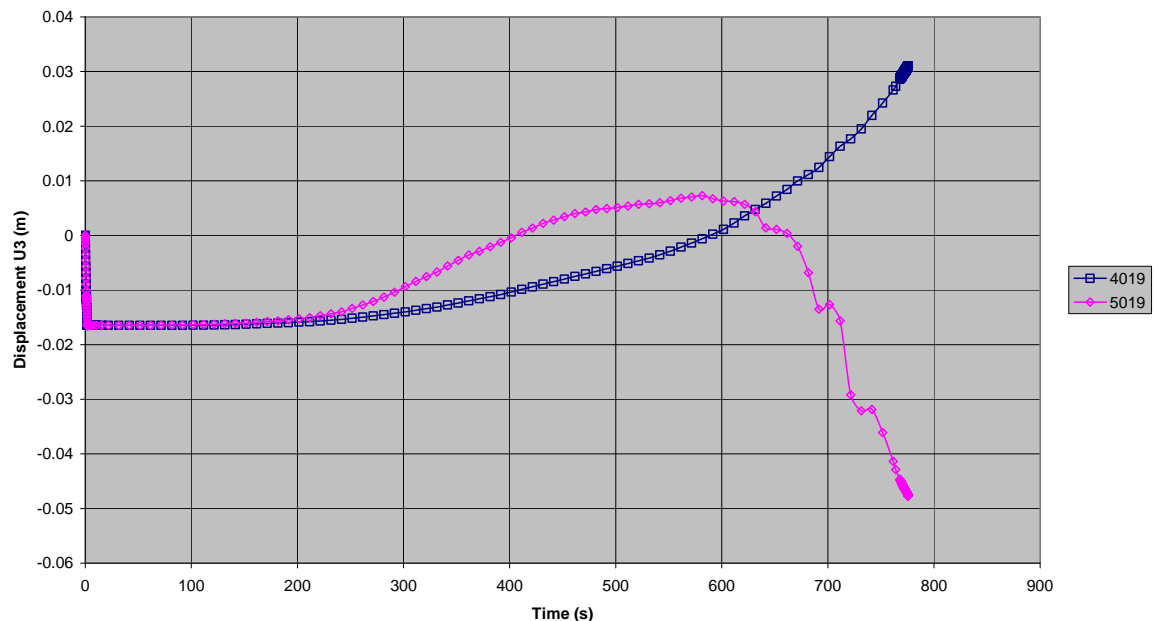
Kuvassa B5 on esitetty FDS- ja lämmönsiirtoanalyysien perusteella määritetyt globaalien palomallin lähtötietoina käytetyt teräsrakenteiden lämpötilat rakennuksen eri kohdissa ajan funktiona. Kuvasta voi nähdä miten palo etenee paikasta toiseen siten, että rankin palovaihe on paikallisesti suhteellisen lyhyt, minkä jälkeen lämpötilat alenevat. Kauimpana palon alkamispaikasta palon rankin vaihe on vasta analyysin lopussa.

Rakennemallin laskenta kuitenkin päättyi konvergoitongelmien takia ajanhetkellä $t = 774$ s (= 12 min) ja rakenteiden siirtymät analyysin päättyessä on esitetty kuvassa B6. Korkein teräsrakenteen lämpötila oli tällöin noin 1300 °C.



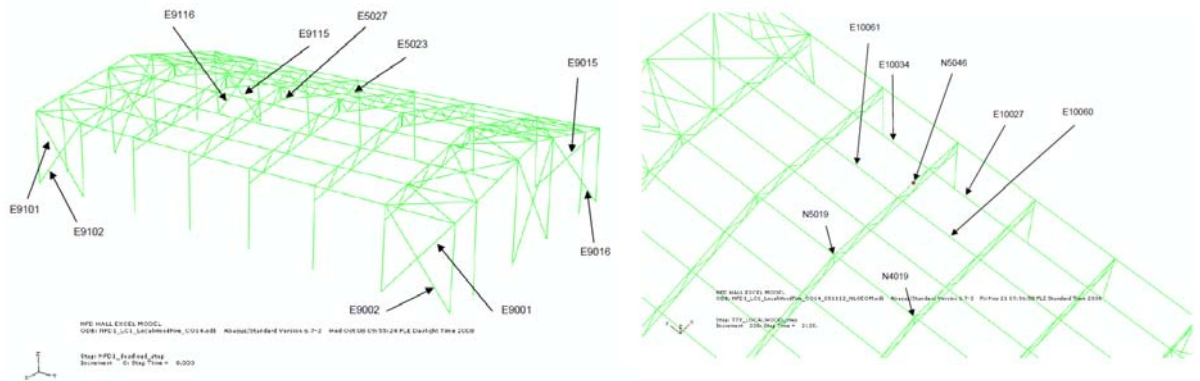
Kuva B6 Rakenteen siirtymät globaalien luonnollisen palon tapauksessa. Muodonmuutokset on esitetty skaalauskerroimella 10.

Global Wood Fire Displacement U3 (z-axis) at selected nodes

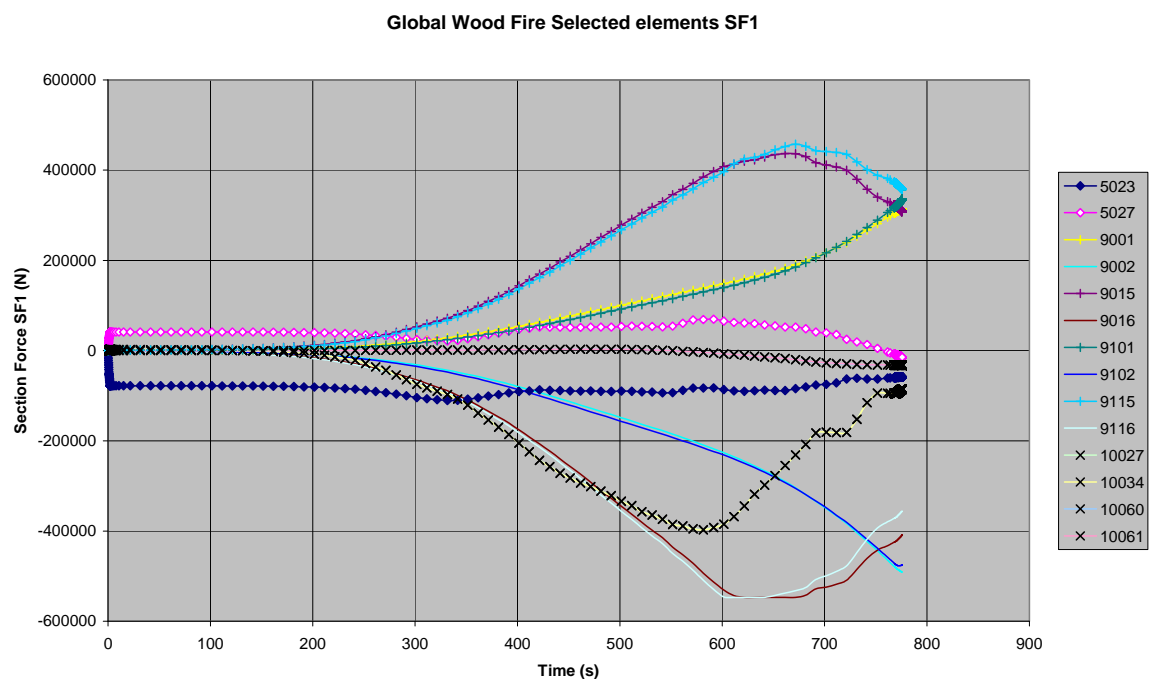


Kuva B7 Kehien 4 ja 5 ylimpien pisteiden siirtymät globaalien luonnollisen palon tapauksessa.

Kuvista B6 ja B7 nähdään, että kehä 5, jonka alla olevasta puurutilästä palo sytytettiin, on menettänyt kantokykynsä, mutta sen viereiset kehät kannattavat sitä orsien välityksellä.



Kuva B8 Tarkasteltavat elementit (E) ja pisteet (N).

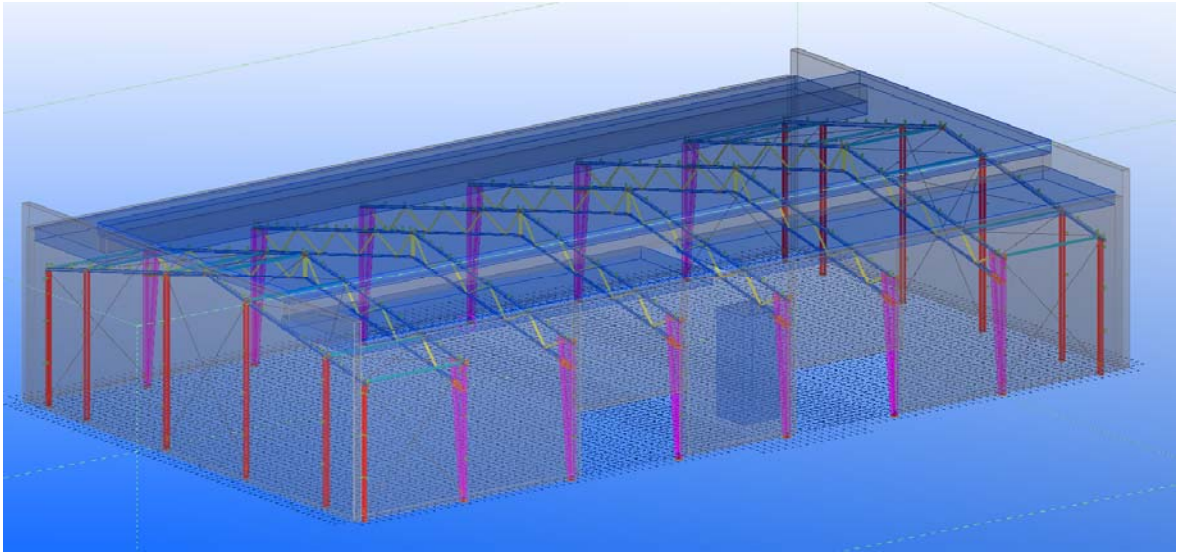


Kuva B9 Sauvavoimat tarkasteltavissa elementeissä globaalin luonnollisen palon tapauksessa.

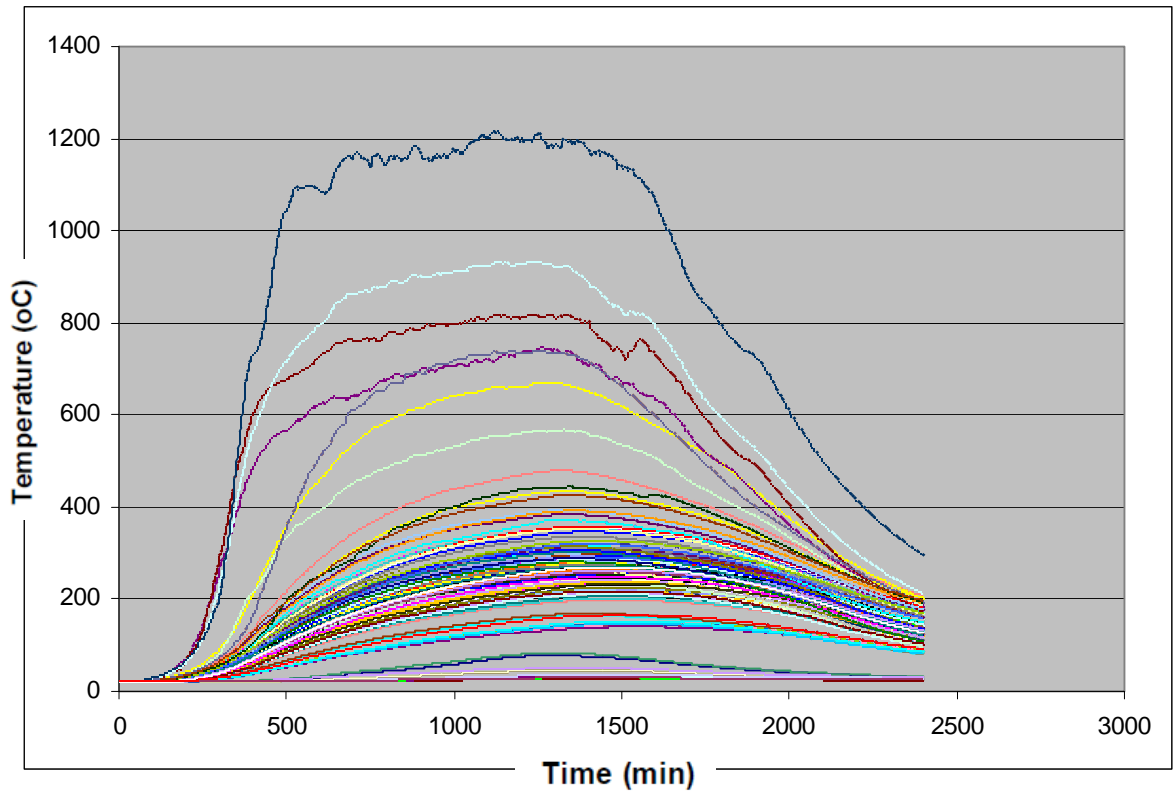
Kuvassa B8 on esitetty tarkempaan tarkasteluun valitut elementit (E) ja solmupisteet (N). Näissä vaikuttavat sauvavoimat on esitetty kuvassa B9, josta nähdään, että esimerkiksi kattoristikko 5:n molemmiin puolin samalla kohtaa olevien orsielementtien 10027 ja 10034 käyrät kulkevat tarkasti toistensa kanssa päällekkäin eli sauvavoima on molemmissa yhtä suuri koko analyysin ajan. Elementeissä vaikuttava puristusvoima kasvaa ajanhetkeen $t = 600$ s asti, mutta alkaa tämän jälkeen pienentyä. Jos analyysi olisi jatkunut pitempään, tämä sauvavoima olisi muuttunut vedoksi ja voitaisiin puhua köysivaikutuksesta. Tässä nähdään selvästi sisäisten voimien uudelleen jakautuminen tilanteessa, jossa yksi rakenneseosa (kehä 5) on menettämässä kantavuutensa. On myös huomattava, että vaikka yksi kehä näyttää menettävän kantavuutensa, sitä sitovat orret (tai muotolevyt) antavat sille tarvittavan sivuttaistuennan, eikä koko rakennuksen sortumisesta ole vielä mitään merkkejä.

B2.3 Paikallinen luonnollinen palo

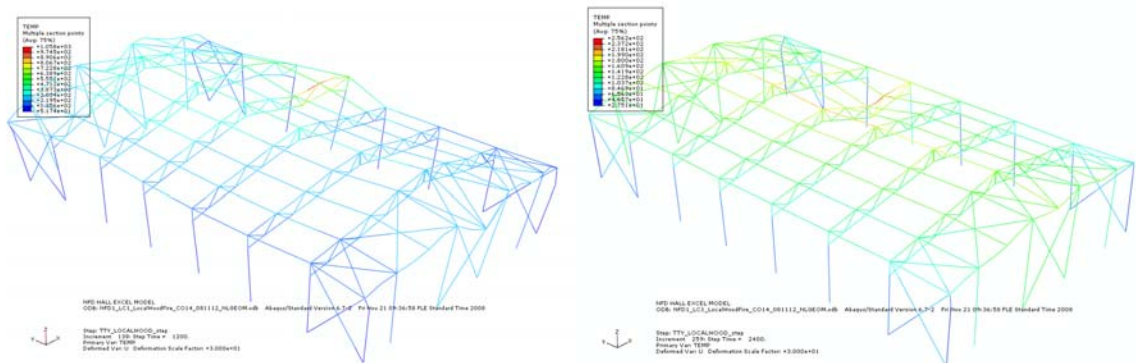
Paikallisessa luonnollisessa palotapauksessa palokuormaksi otettiin yksi $2 \times 2 \times 5 \text{ m}^3$ -kokoinen puuritilä, joka sijoitettiin kehän 5 alle kuvan B10 mukaisesti. Maksimipaloteho oli n. 35 MJ ja palokuorma paloi analyysissa loppuun. Palon kokonaiskesto jäähtymisvaiheineen oli 2400 s eli 40 minuuttia. Kuvassa B11 on esitetty FDS- ja lämmönsiirtoanalyysien perusteella määritetyt paikallisen palomallin lähtötietoina käytetyt teräsrakenteiden lämpötilat rakennuksen eri kohdissa ajan funktiona. Ylimmät käyrät kuvaavat lämpötiloja palolähteen kohdalla ja alemmat käyrät kauempana palolähteestä. Kuvassa B12 esitetään rakennuksen siirtymät ajanhetkillä 1200 s ja 2400 s.



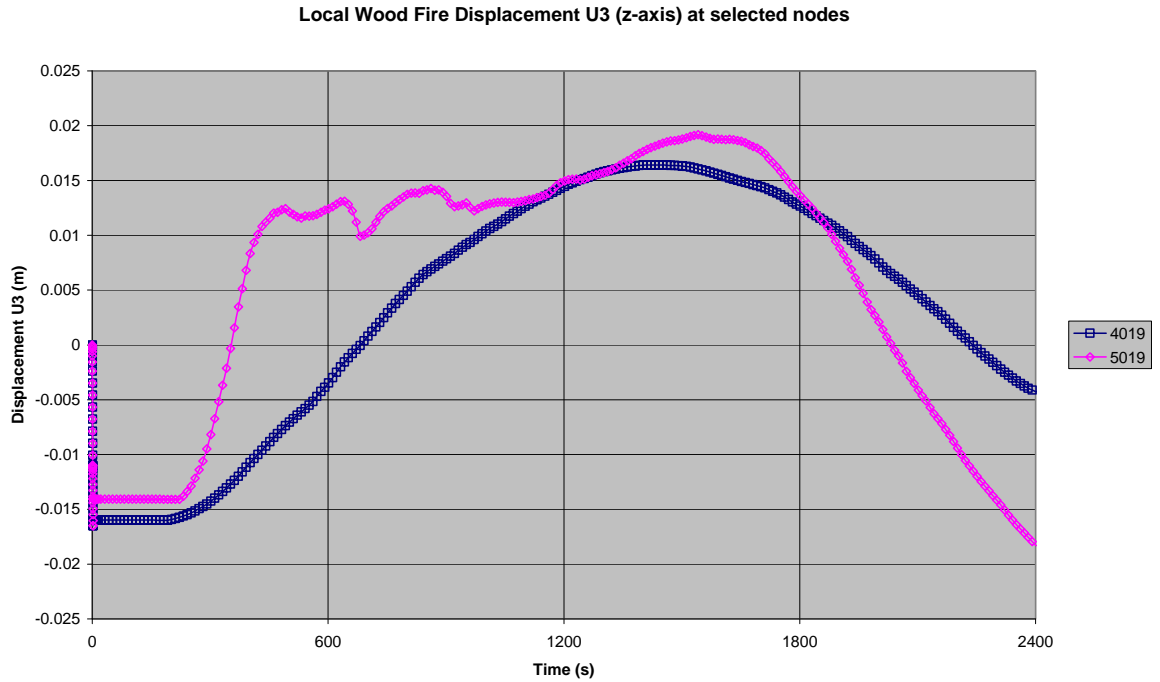
Kuva B10 Palokuorman sijoittelu paikallisen luonnollisen palon tapauksessa.



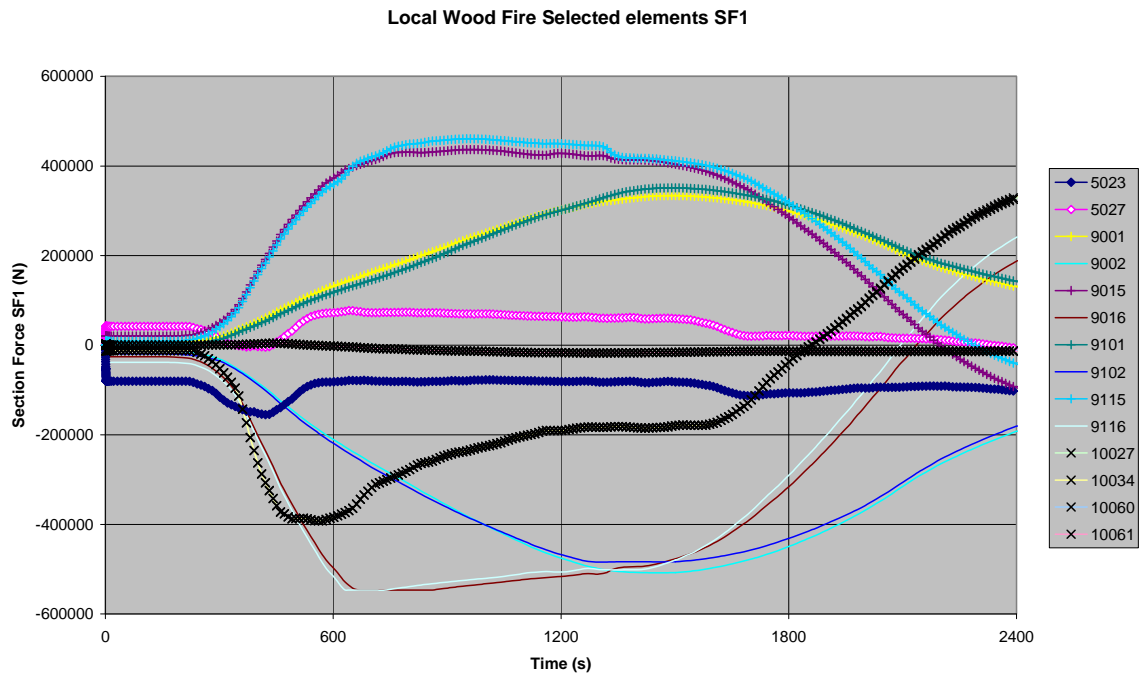
Kuva B11 Laskennan lähtötietoina käytetyt teräsrakenteiden lämpötilat paikallisen palon tapauksessa.



Kuva B12 Hallin rakenteiden siirtymät paikallisen palon tapauksessa ajanhetkillä $t = 1200$ s ja $t = 2400$ s. Muodonmuutokset on esitetty skaalauskerroimella 30.



Kuva B13 Kehien 4 ja 5 ylimpien pisteiden pystysuorat siirtymät paikallisen luonnollisen palon tapauksessa.



Kuva B14 Sauvavoimat tarkasteltavissa elementeissä paikallisen luonnollisen palon tapauksessa.

Kuvasta B13 nähdään kehien 4 ja 5 ylimpien pisteiden pystysuorat siirtymät paikallisen luonnollisen palon tapauksessa. Kuvassa B14 vuorostaan esitetään kuvan B6 mukaisten elementtien sauvavoimat. Kuvasta nähdään, että muodonmuutoksia rakenteisiin syntyy erityisesti teräksen lämpölaajenemisen johdosta, mutta siirtymät myös palautuvat palon

jäähtymisvaiheessa. Jälleen elementti 10027 ja 10034 käyrät kulkevat päällekkäin. Niiden perusteella nähdään, miten sauvavoima on aluksi negatiivinen (puristusta) mutta muuttuu positiiviseksi (vetoa) palon edistyessä. Kyseessä on puhdas köysivaikutus. Vertailun vuoksi voi katsoa kahden muun (10060 ja 10061) lähes koko ajan nollassa olevan orsielementin sauvavoiman merkitystä. Nämä sauvavoimat ovat orsissa, joita koko hallin vinositein toteutettu jäykistysjärjestelmä ei sido hallin pituussuunnassa. Näin ollen niihin ei voi syntyä myöskään köysivaikutusta.

B3 Yhteenveto analyyseistä

Teräsrakenteiselle hallirakennukselle suoritettujen palotilanteen analyyseiden perusteella voidaan todeta, että kattokannattimien sivuttaistukina toimivat orret tai muotolevyt toimivat tehokkaasti köysivaikutuksensa ansiosta myös tapauksessa, jossa yksi kattoristikko muuten menettäisi kantokykynsä. Orsien ansiosta kriittisinkään kattoristikko ei sorru, vaan kuormitukset jakautuvat uudelleen vierekkäisille rakennusosille. Paikallisen palon tapauksessa (ml. jäähtymisvaihe) ei tapahtunut rakenteiden sortumista eikä kantokyvyn menetyksiä. Globaalin luonnollisen palon tapauksessa ja standardipalon mukaisessa tapauksessa analyytit keskeytyivät numeerisista konvergointiongelmista johtuen 12,8 – 15 minuutin sisällä palon alkamisesta. Vaikka globaalissa luonnollisessa palossa oli nähtävissä pahiten tulen vaikutuksille altistuneen kehän 5 kantokyvyn menetys, ei jatkuvasta sortumasta ollut merkkejä, vaan kehän 5 kantamat kuormitukset jakaantuivat uudelleen viereisille rakenteille.

Liite C Esimerkki muotolevyn laskennasta köysirakenteena

Lasketaan muotolevyn kestävyys R15 palotilanteessa. Tehdään varmallalla puolella oleva otaksuma, että ohut muotolevy ja kaasu ovat samassa lämpötilassa.

Muotolevyn jänneväli	$L_0 := 6000$	mm
Tarkastellaan metrin levyistä kaistaa	$b := 1000$	mm
Muotolevyn poikkipinta-ala:	$A := 1200$	mm ² / m
Myötölujuus normaalilämpötilassa:	$f_y := 350$	N / mm ²
Kimmokerroin normaalilämpötilassa:	$E := 210000$	N / mm ²
Omapaino:	$g := 0.6 \cdot 10^{-3}$	N / mm ²
Lumikuorma:	$q_\theta := 1.0 \cdot 10^{-3}$	N / mm ²
Tarkasteltava ajanjakso standardipalossa:	$t := 15$	min

Lämpötila tarkasteltavana ajankohtana:

$$\theta_a := 20 + 345 \log(8 \cdot t + 1) \quad \theta_a = 738.561 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Myötölujuus tarkasteltavana ajankohtana:

$$f_{y\theta_a} := f_y \cdot \left[0.13 - (0.13 - 0.07) \cdot \frac{\theta_a - 700}{800 - 700} \right]$$

SFS-EN 1993-1-2 [5]

$$f_{y\theta_a} := 38.15 \text{ N / mm}^2$$

Kimmokerroin tarkasteltavana ajankohtana:

$$E_{\theta_a} := E \cdot \left[0.13 - (0.13 - 0.09) \cdot \frac{\theta_a - 700}{800 - 700} \right]$$

SFS-EN 1993-1-2 [5]

$$E_{\theta_a} := 24360 \text{ N / mm}^2$$

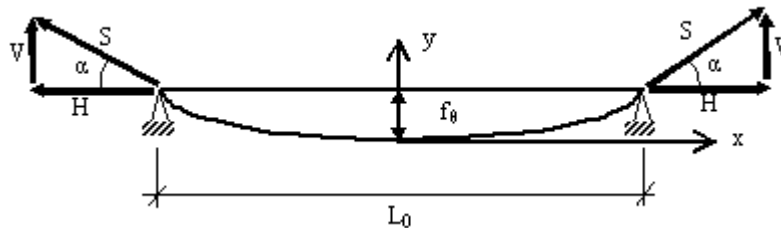
Lämpötilan noususta aiheutuva lämpöpitenemä muotolevyssä:

$$\Delta L_\theta := \left(1.2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_a + 0.4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_a^2 - 2.416 \cdot 10^{-4} \right) \cdot L_0$$

$$\Delta L_\theta = 64.818 \text{ mm}$$

Kun taipuma on pieni suhteessa muotolevyn jänneväliin, voidaan köysikäyrän yhtälö esittää likimääräistyksenä paraabelin muodossa. Kun origo asetetaan keskelle taipuneen muodon jännettä ja merkitään taipumaa f_θ :lla, saadaan paraabelin yhtälöksi:

$$y(x) := \frac{4 \cdot f_\theta}{L_0^2} \cdot x^2$$



Köysikäyrän laskennassa tulipalotilanteessa tulee ottaa huomioon sekä lämpölaajenemisesta että köydessä vaikuttavasta vetovoimasta aiheutuva venymä. Käsinsalkennassa tämä johtaa iteratiiviseen laskentaan.

1. kierros

$$f_{\theta} := \sqrt{\frac{3 \cdot \Delta L_{\theta} \cdot L_0}{8}} \quad f_{\theta} = 381.891 \quad \text{mm}$$

$$H_1 := \frac{(g + q_{\theta})b \cdot L_0^2}{8 \cdot f_{\theta}} \quad H_1 = 18853.54 \quad \text{N}$$

$$\Delta L_{H,1} := \frac{H_1}{E_{\theta a} \cdot A} \cdot (L_0 + \Delta L_{\theta}) \quad \Delta L_{H,1} = 3.912 \quad \text{mm}$$

$$\Delta L_1 := \Delta L_{\theta} + \Delta L_{H,1} \quad \Delta L_1 = 68.73 \quad \text{mm}$$

$$L_1 := L_0 + \Delta L_1 \quad L_1 = 6068.73 \quad \text{mm}$$

2. kierros

$$f_{\theta} := \sqrt{\frac{3 \cdot \Delta L_1 \cdot L_0}{8}} \quad f_{\theta} = 393.245 \quad \text{mm}$$

$$H_2 := \frac{(g + q_{\theta})b \cdot L_1^2}{8 \cdot f_{\theta}} \quad H_2 = 18731.05 \quad \text{N}$$

$$\Delta L_{H,2} := \frac{H_2}{E_{\theta a} \cdot A} \cdot (L_1) \quad \Delta L_{H,2} = 3.889 \quad \text{mm}$$

$$\Delta L_2 := \Delta L_{\theta} + \Delta L_{H,2} \quad \Delta L_2 = 68.707 \quad \text{mm}$$

$$L_2 := L_0 + \Delta L_2 \quad L_2 = 6068.71 \quad \text{mm}$$

3. kierros

$$f_{\theta} := \sqrt{\frac{3 \cdot \Delta L_2 \cdot L_1}{8}} \quad f_{\theta} = 395.425 \quad \text{mm}$$

$$H_3 := \frac{(g + q_{\theta})b \cdot L_2^2}{8 \cdot f_{\theta}} \quad H_3 = 18627.64 \quad \text{N}$$

$$\Delta L_{H,3} := \frac{H_3}{E_{\theta a} \cdot A} \cdot (L_2) \quad \Delta L_{H,3} = 3.867 \quad \text{mm}$$

$$\Delta L_3 := \Delta L_{\theta} + \Delta L_{H,3} \quad \Delta L_3 = 68.685 \quad \text{mm}$$

$$L_3 := L_0 + \Delta L_3 \quad L_3 = 6068.69 \quad \text{mm}$$

4. kierros

$$f_{\theta} := \sqrt{\frac{3 \cdot \Delta L_3 \cdot L_1}{8}} \quad f_{\theta} = 395.363 \quad \text{mm}$$

$$H_4 := \frac{(g + q_{\theta})b \cdot L_3^2}{8 \cdot f_{\theta}} \quad H_4 = 18630.42 \quad \text{N}$$

$$\Delta L_{H,4} := \frac{H_4}{E_{\theta a} \cdot A} \cdot (L_3) \quad \Delta L_{H,4} = 3.868 \quad \text{mm}$$

$$\Delta L_4 := \Delta L_{\theta} + \Delta L_{H,4} \quad \Delta L_4 = 68.686 \quad \text{mm}$$

$$L_4 := L_0 + \Delta L_4 \quad L_4 = 6068.69 \quad \text{mm}$$

Iteraation tuloksena saadaan siis arvot:

$$H_{\theta a} := H_4 \quad H_{\theta a} = 18630 \quad \text{N}$$

$$\Delta L_{\theta a} := \Delta L_4 \quad \Delta L_{\theta a} = 68.69 \quad \text{mm}$$

$$f_{\theta a} := f_{\theta} \quad f_{\theta a} = 395.36 \quad \text{mm}$$

Tuella vaikuttava köysivoima saadaan vaakavoiman H perusteella:

$$\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{8 \cdot f_{\theta a} \cdot L_0}{2 \cdot L_0^2}\right)$$

$$\alpha = 0.258$$

$$S_{\theta a} := \frac{H_{\theta a}}{\cos(\alpha)}$$

$$S_{\theta a} = 19267 \quad \text{N}$$

$$\frac{S_{\theta a}}{A} = 16.056 \quad \text{N/mm}^2 < f_{y\theta a} = 38.15 \quad \text{N/mm}^2 \quad \text{OK!}$$