



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joni Väliäho

JÄYKISTEENÄ TOIMIVAN
KANTAVAN POIMULEVYN RUUVIEN
PALOMITOITUSSIMULAATIO

Tekniikan yksikkö
2015

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joni Väliaho
Opinnäytetyön nimi	Jäykisteenä toimivan kantavan poimulevyn ruuvien palomitoitussimulaatio
Vuosi	2015
Kieli	suomi
Sivumäärä	39+4 liitettä
Ohjaaja	Heikki Paananen

Opinnäytetyössä tutkin kantavan muotolevyn kiinnikkeiden mitoitusta palotilanteelle. Rakenteen on säilytettävä palovaatimusluokan R15 vaatima jäykistävä ominaisuus 15 minuuttia. Ongelmana on palomitoitusstandardien tuoma kimmomoduulin pienennyskerroin, joka kestävyyslaskennoissa johtaa kiinnikkeiden massiiviseen määrään. Tämä ongelma lisää asennusaikaa ja materiaalikustannuksia.

Jotta todellinen kiinnikemäärä voidaan todeta, ongelmaa lähdettiin ratkomaan mallintamalla tilanne Comsol Multiphysics -simulaattorilla. Mallintamalla rakenne palotilanteineen saadaan selville lämmönkehitys rakenteessa ja ruuveissa vaikuttavat todelliset voimat ajan funktiona. Taustamateriaalina käytän Jyri Outisen Aaltoyliopistossa luomaa aikaisempaa tutkimusmateriaalia vastaavalle tilanteelle.

Saaduista tuloksista voidaan päätellä, että liitos todellakin tarvitsee kyseisen määrän kiinnikkeitä, jotta sen ominaisuus jäykistävänä rakenteena säilyy vaaditun ajan. Liitoksessa lämmönkehitystä voidaan hidastaa asentamalla tulipalossa altistuville pinnoille palonsuojamateriaali.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Name of the Degree Programme
Rakennustekniikka

ABSTRACT

Author	Joni Väliäho
Title	Fire Design Simulation for Screws of Load Bearing Sheet-Structure
Year	2011
Language	Finnish
Pages	39+4 Appendices
Name of Supervisor	Heikki Paananen

In this thesis project the fire design method for screws of a load-bearing sheet structure was researched. The structure has to maintain its feature as a bracer for 15 minutes in accordance with the fire class requirement R15. The main problem of this subject is the required reduction factor of the fire designing standards, which leads to a large number of installation screws on the support. This problem will increase the installation time and the cost of material.

In order to discover the real amount of screws on the support, a situation was modelled with the Comsol Multiphysics simulator. By simulating a fire situation in the structure the production of heat and the realistic forces affecting the structure and the screws could be determined in a function of time. As a background material research material by Jyri Outinen was used, made in Aalto-University for a similar situation.

From gathered results it can be concluded that the connection indeed needs that many fasteners so its features as a bracing structure maintain for the required time. Generation of heat in the connection can be delayed with the installation of fire retardant material to the fire exposed surfaces.

Keywords Bracer, load-bearing sheet, fire design, screw

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
2	TAUSTAMATERIAALI	9
	2.1 Teräksinen kylmävalssattu kantava poimulevy	9
	2.1.1 Varastointi ja asennus	10
	2.1.2 Paloluokitus.....	12
	2.2 Teräsrakenteiden palonsuojausmenetelmät	13
	2.2.1 Palonsuojamaali	14
	2.2.2 Palonsuojavilla	14
	2.3 Köysikuormana toimivan rakenteen mitoitus	15
	2.4 Edeltävä tutkimusmateriaali.....	17
	2.5 Comsol Multiphysics	17
	2.6 CSC:n Taito-palvelu	19
3	TYÖN MALLINNUS	20
	3.1 Geometria.....	21
	3.2 Mekaaninen kuormitus.....	23
	3.3 Symmetria	25
	3.4 Palokuormitus	25
	3.5 Laskentaverkko	26
	3.6 Laskennat	28
4	TULOKSET	29
	4.1 Lämpöjännitykset.....	29
	4.2 Siirtymät.....	30
	4.3 Muodonmuutokset	31
	4.4 Kiinnikkeiden määrä.....	32
	4.4.1 Malli 1	32
	4.4.2 Malli 2	34
	4.4.3 Malli 3	35

5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	36
5.1	Tulosten analysointi	36
5.2	Johtopäätökset ja tuotosten luotettavuus.....	37
6	LÄHTEET	39
	LIITTEET	

LIITELUETTELO

LIITE 1: Malli 3 tulokset kuormitus 1,8kN/m², puolikas jänneväli

LIITE 2: Malli 3 tulokset kuormitus 0,1kN/m², puolikas jänneväli

LIITE 3: Malli 3 tulokset kuormitus 1,8kN/m², kokonainen jänneväli

LIITE 4: Malli 3 tulokset kuormitus 0,1kN/m², kokonainen jänneväli

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö alkoi puhelinsoitolla Contria Oy:lle. Lähipiiristäni sain vinkin yrityksestä, joten päätin kokeilla onneani ja kysellä aiheita opinnäytetyölleni. Soitin suoraan yrityksen rakenneteknisen osaston toimialajohtajalle, esittelin itseni ja mainitsin etsiväni aiheita opinnäytetyölleni. Hän ehdotti aiheita teräksestä valmistetun kantavan poimulevyn kiinnikkeiden palomitoituksesta ja mainitsi niiden palomitoituksen tuomista ongelmista.

Toimeksiantajayritykseni Contria Oy on Pohjanmaan alueella toimiva rakentamisen konsultointiyritys, jonka toimistot ovat Seinäjoen ja Vaasan alueella. Yritys tarjoaa palveluja liittyen rakennesuunnitteluun, projektijohtoon sekä kustannussuunnitteluun. Contria Oy:llä on tarjolla myös rakennusfysiikan yksikkö. Yritys on sen asiakkaiden keskuudessa arvostettu sen aikataulujen toimivuudesta sekä lupauksien pitämisestä. Projektikohteita yrityksellä on kotimaassa sekä skandinaavisilla alueilla.

Paremmen taustatiedon saamiseksi päätimme ohjaavan opettajani kanssa järjestää palaveria kerran kuukaudessa, jotta koulun sekä toimeksiantajayrityksen osapuolet voivat kokoontua jakamaan lähtötietoa ja toiveita työn tavoitteille. Palaveriin osallistuivat minä, ohjaava opettajani sekä toimeksiantajayrityksen rakennesuunnitteluosaston toimialajohtaja. Tapaamiseen kutsuttiin vielä ammattikorkeakoulumme teräsrakenteiden pääopettaja konsultoimaan työn etenemisen kannalta huomioitavia tärkeitä asioita. Palaverissa toimeksiantajayrityksen edustaja esitteli aiheen ja sen ongelmat. Työn suorittaminen vaiheittain tapahtui näiden palaverien avulla. Jokaisen palaverin jälkeen oli tullut uusia asioita selvitettäväksi ja tarpeita ottaa kontaktia valmistajiin ja tuotteiden asiantuntijoihin.

Ongelmaa lähdettiin ratkaisemaan mallintamalla muotopellin ruuviliitos Comsol Multiphysics 5.0 -simulaattorilla. Ohjelmaa käytetään tutkimiseen ja simulointiin lukuisilla eri aloilla, joissa vaaditaan fysiikan ja kemian soveltamista. Itselleni ohjelma oli täysin tuntematon käsite. Mallinnusta suunniteltiin myös tehtäväksi Robot

Structural Analysis -analysaattorilla, mutta sen laskennat eivät ota palomitoituksessa huomioon kimmomoduulin muuttumista lämpötilan funktiona. Lisäksi mallintaminen tässä ohjelmistossa on tarkoitettu suurempien rakennekokonaisuuksien voimien tarkasteluun ja opinnäytetyön aihe vaatii pienemmän alueen liitoksen osien palotilannekäyttäytymisen tarkastelua.

Ensimmäiset kaksi viikkoa meni käytännössä ohjelman perusteiden opiskeluun. Opiskeluun käytin Comsolin nettisivuilta löytyviä opetusvideoita ja internet-seminaarien materiaalia. Tämän kautta sain paremman tuntuman ohjelman käytölle. Käyttöaste Comsol Multiphysics -simulaattorissa on aivan erilainen verrattuna koulun opetuksissa käytettyihin CAD-ohjelmistoihin. Aikarajan vuoksi tarvitsin paremman ja sisäistävämmän opin ohjelman käytön ammattilaisilta.

Maaliskuussa 2015 suoritin Rakennusfysikaalinen simulointi -kurssin Comsol:n toimistolla Helsingissä. Kurssi toteutettiin niin, että ohjelman käyttöön ei vaadittu aikaisempaa kokemusta. Kurssin aikana käytiin läpi ohjelman käytön perusteet ja harjoiteltiin ohjelman käyttöä aina mallintamisesta tulosten julkaisemiseen. Kursipäivän jälkeen ohjelman käyttö oli huomattavasti sujuvampaa, mikä oli oletettavissakin.

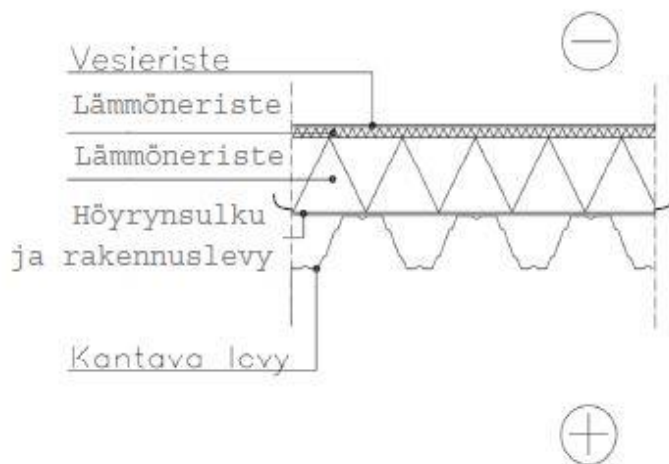
Koska oma kannettava tietokoneeni oli vanha, jouduin kapasiteetin vajauden vuoksi tukeutumaan ulkoiseen laskenta-apuun. Comsol Multiphysics 5.0:lla luodut mallinteet tarkoilla laskenta-arvoilla tarvitsevat suuren määrän laskentatehoa. Koululla ja toimeksiantajilla ei kuitenkaan ollut tarjota uudempaa tietokonetta lainaksi, joten päädyimme opettajieni ja Vaasan ammattikorkeakoulun helpdesk-tukihenkilöiden kanssa siihen, että minun kannattaa käyttää Tieteen tietotekniikan keskus CSC:n Taito-palvelun etäkäyttöä. Kaikki tässä työssä suoritettut Comsol Multiphysics -laskennat ovat suoritettu Taito-palvelujen etäkäytön avulla.

Taustamateriaalina tälle opinnäytetyölle käytän Jyri Outisen luomaa tutkimusmateriaalia, jossa tutkitaan kantavan poimulevyn käyttäytymistä palotilanteessa. Tutkimus on tehty yhteistyössä Aaltoyliopiston ja Ruukki & SSAB: kanssa. Mallintamani geometria ja sen reunaehdot ovat luodut käyttäen Outisen materiaalia ja kuormituksia on vaihdeltu työn toimeksiantajan toiveiden mukaan.

2 TAUSTAMATERIAALI

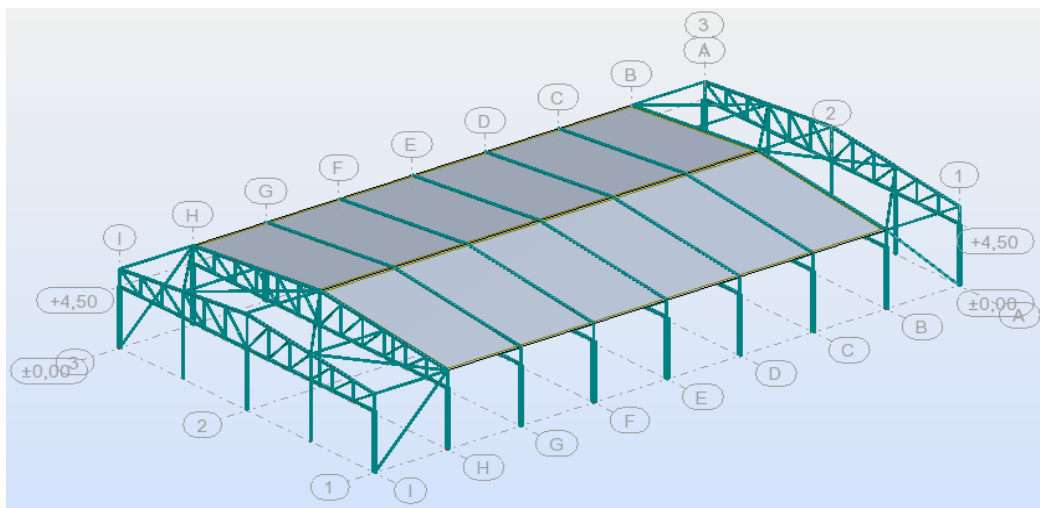
2.1 Teräksinen kylmävalssattu kantava poimulevy

Teräksestä valmistettu kantava poimulevy on paljon käytetty rakenne teollisuus- ja asuinrakentamisessa. Poimulevyä käytetään pääsääntöisesti teollisuusrakennuksissa, halleissa sekä varastorakennuksissa, joissa jännevälit ovat pitkät. Aaltomaisen muotonsa vuoksi katteen nurjahdus on vähäinen ja kate pysyy jäykkänä suurilakin kuormilla. Rakennetta voidaan käyttää pääasiallisena vesikatteena tai kantavana rakenteena ylä-, ala- ja välipohjissa. Kuvassa 1 on esitetty tyypillisin rakenneratkaisu teollisuusrakentamisessa. /6/



Kuva 1. Tyypillinen rakenneratkaisu käytettäessä kantavaa poimulevyä. /2/

Kantavaa poimulevyä käytetään myös kattoristikoiden jäykisteenä ja kantavana rakenteena esimerkiksi teollisuushalleissa, joiden runko on teräksestä valmistettu. Tyypillisimmin hallin molempiin päätyihin tulee vinotuulijäykisteet ja loppuilla niiden välisillä kattoristikoilla poimulevy toimii nurjahdusta estävänä jäykisteenä kuvan 2 mukaisesti. Tässä tilanteessa muotopelti määritellään jäykistäväksi osaksi runkorakennetta ja näin se sijoittuu palovaatimusluokkaan R15.



Kuva 2. Teollisuusrakentamisessa yleisesti käytetty rakennerratkaisu. Päädyissä on tuulikuorman vastaanottavat vinositeet ja kantava poimulevy hoitaa rungon keskiosan teräsristikoiden jäykistykseen.

2.1.1 Varastointi ja asennus

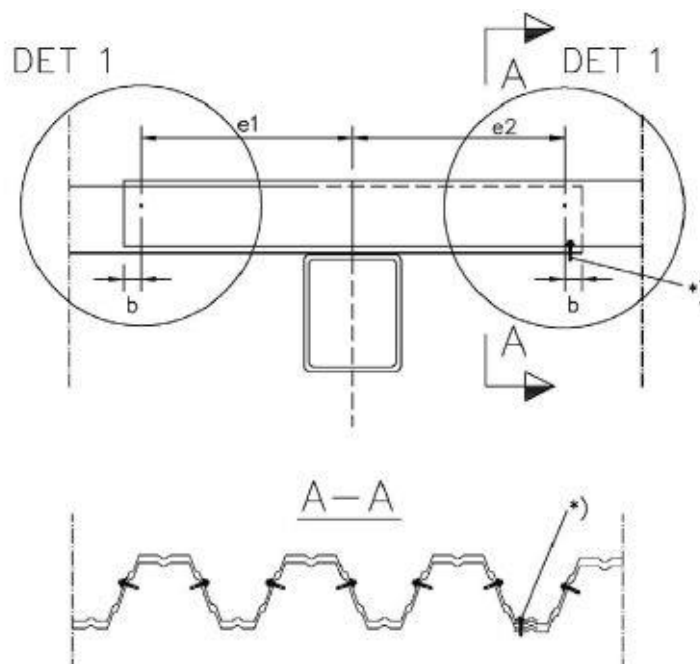
Varastoinnissa materiaali täytyy suojata sateelta ja ylimääräisiltä mekaanisilta rasituksilta. Tämän lisäksi niputetut poimulevypaketit nostetaan 200mm irti maasta metrin välein asennetuilla aluspukeilla. Yli kuukauden varastoinnissa tulee erityisesti ottaa huomioon sadevesien poisto levyelementtien välistä. Tämä toteutuu, kun elementit asennetaan varastointialueelle kaltevasti niin, että vesi saadaan valumaan ja haihtumaan pois levyjen välistä. /6/

Teräksisen poimulevyn asennuksessa tulee ottaa muutamia perusasioita huomioon. Asennuksen etenemisessä täytyy varmistaa alla olevan runkomateriaalin suoruus pitkillä kateväleillä. Rungon suoruus saattaa vaihdella riippuen sen materiaalista ja asennuksesta. Katemateriaalin asennusta voidaan tarkastella asentamalla ohjurina toimiva siima katteen asennusalueen päätyihin. Suuremmissa rakenteissa täytyy varmistaa levyjen jatkopituus, kun joudutaan jatkamaan pituussuunnassa katemateriaalia seuraavalle tuelle.

Ensimmäisen levyn asennus aloitetaan asettamalla urospäät asennussuuntaan päin. Itse poimulevyn asennus on itsessään hyvin yksinkertainen prosessi olettaen, että

asennusalusta ja työmenetelmät ovat oikeat. Seuraava poimulevy asennetaan limitämällä hyötyleveyden tai tarvittaessa 1–3 aaltoa päällekkäin. Tämä riippuu täysin käyttötarkoituksesta ja halutusta jäykkyydestä pitempien saumojen kohdalla.

Poimulevy kiinnitetään paikalleen siihen tarkoitetuilla kiinnikkeillä. Tavanomaisesti käytetään esiporaavaa ruuvia tai ammuttavia nauvoja. Riippuen pellin koosta ja rakenteiden jänneväleistä, tulee ruuveja asentaa vaadittu määrä tuelle. Lisäksi mikäli poimulevyä jatketaan seuraavalle tuelle, täytyy riittävä jatkospituus ja limitys ottaa huomioon. Rakenteen mekaanisen toimivuuden kannalta tulee jatkoksen kohdalla rakenne saada momenttijäykäksi. Tämä saadaan aikaiseksi, kun poimulevyjen päädyt ruuvataan toisiinsa saumakohdissa. Kuvassa 3 on detaljipiirustus momenttijäykästä liitoksesta.



Kuva 3. Detaljipiirustus momenttijäykästä liitoksesta. /2/

Poimulevyn asennuksen jälkeen sen päälle voidaan asentaa eri rakenneratkaisuja. Yleisimmässä rakenneratkaisussa poimulevyn päälle asennetaan rakennuslevy, lämmöneristekerros, ja näiden päälle haluttu säänkestävä katemateriaali. Rakennuslevyn ja kantavan poimulevyn väliin asennetaan höyrynsulkukalvo, jotta lämmin

kostea ilma ei pääse kondensoimaan vettä eristeisiin. Rakenteen kerrokset jäykistään toisiinsa joko kiinnikkeillä tai siihen tarkoitettulla sideaineella. Poimulevy toimii myös itsessään säältä suojaavana katemateriaalina, mikäli lämmöneristystä ei tarvita yläpohjarakenteessa. /3; 6/

2.1.2 Paloluokitus

Rakentamismääräyskokoelman osassa E1 on selvät ohjeet ja määräykset teräksestä valmistetulle runkorakenteelle. Jokaisen teräksestä valmistetun rungon osan tulee säilyttää sen palovaatimusluokituksen mukainen toiminta vaaditun ajan. Alla esitetyssä taulukossa 1 on ote rakentamismääräyskokoelman yläpohjan rakenteiden luokkavaatimustaulukosta. /1/

Tämän opinnäytetyön aiheessa tutkittava rakenne luokitellaan yläpohjan runkoa jäykistäväksi rakenteeksi, joka kuuluu palovaatimusluokkaan R15. Tämä tarkoittaa, että rakenteen tulee säilyttää ominaisuus jäykistävänä rakenteena 15 minuuttia eli laskennoissa 900 sekuntia. Tämän saavuttamiseksi rakenteen liitoksien osilla tulee olla tarpeeksi jännityskestävyyttä palotilanteessa. /1/

Teräksen ominaisuuksiin kuuluu sen jännityskestävyyden aleneminen, kun lämpötila nousee korkeisiin lukemiin. Laskennoissa täytyy ottaa huomioon teräksen kimmomoduulin pienennystekijä, joka on määritelty Eurocode 3:ssa suunniteltaville rakenteille erikseen /5/. Kimmomoduulin pienennystekijä johtaa siihen, että teräksen jännityskestävyys liitoksessa laskee lämpötilan funktiona.


Lämpötilan kohotessa korkeisiin lukemiin, tuen kiinnikkeille syntyy teräksisen poimulevyn lämpölaajenemisen johdosta korkeita jännityksiä /3/. Palomitoituksessa huomioitu kimmomoduulin pienennyskerroin asettaa jännityskestävyyden kiinnikkeille niin pieneksi, että kiinnikeruuvien tai -naulojen määrä poimulevyn kiinnitysalalla kasvaa järkyttävän suureksi. Tämä veisi asentajalta paljon turhaa aikaa ja muutenkin ongelmana on saada ruuvit mahtumaan poimulevyn poimun pohjalle.

Kun teräksen materiaalinlujuuden kriittinen lämpötila saavutetaan, kantava poimulevy muuttuu köysirakenteeksi, koska se alkaa menettämään materiaalinlujuuttaan. Köysirakenne on selvennetty kohdassa 2.3.

Voimien muodostuminen on liitoksen kestävyuden kannalta rajumpaa päätytuella kuin keskituella sen epäsymmetrisen voimajakauman vuoksi. Tarkoituksena on selvittää, tarvitseeko poimulevyn kiinnitykseen todella niin suuria määriä kiinnikkeitä.

Taulukko 1. Ote on rakentamismääräyskokoelman rakenteiden paloluokitusvaatimuksista. Tästä voidaan todeta, että tutkittava rakenne kuuluu paloluokkaan R15 ja vaadittu jäykistävä ominaisuus tulee siis säilyttää 900 sekuntia. /1/

Rakennuksen paloluokka							
P1			P2			P3	
Palokuorma MJ/m ²			Palokuorma MJ/m ²				
yli	600-	alle	yli	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 suojaverhoitus tai EI 60-luokan rakenne ja - P2-luokan rakennuksissa K₂ 30-luokan suojaverhoitus 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 vesikattorakenteet, 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 varistorakennuksessa 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 stabiliteetin 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>						

2.2 Teräsrakenteiden palonsuojausmenetelmät

Teräksessä syntyvää palotilanteen lämmönkehitystä voidaan lieventää rakenteen toimivuuden kannalta kriittisimmissä paikoissa, kuten esimerkiksi liitoksissa. Ympäriille voidaan asentaa palovilla tai liitoksen alueella oleviin pintoihin voidaan levittää palonsuojamaali. /7; 9/

Molempien asennus lisääsi sekä asennusaikaa että materiaalikustannuksia ja tämä ei ollut toimeksiantajan toive. Tärkeintä on saada selville Comsol Multiphysics -simuloinnin kautta lämmönkehitys ja tämän kautta voimien muodostuminen tuella. Alue, johon keskitytään, on päätytuki, koska sen alueella voimien kehitys on epäsymmetrinen ja rakennetta rasittavin. /7; 9/

2.2.1 Palonsuojamaali

Palonsuojamaali levitetään palonsuojattaville teräspinnoille ohueksi kalvoksi. Palonsuojamaalin kalvopaksuuden suunnitteluun voi valmistajilta saada apua. Suunnittelussa tarvitsee tietää rakenteen paloluokka, rakenteen kriittinen lämpötila sekä rakenteen poikkileikkaustekijä. /7/

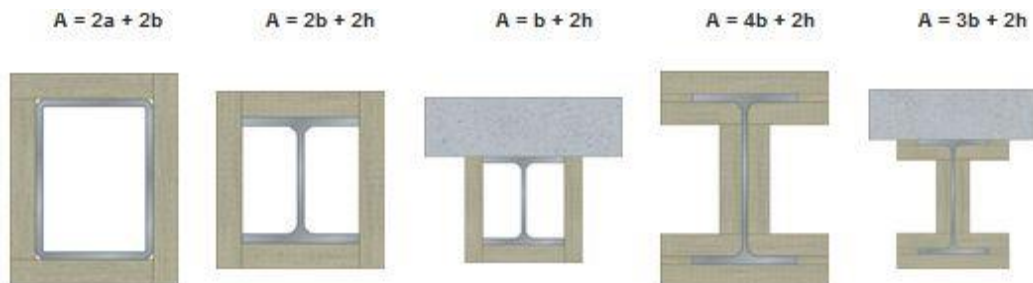
Palonsuojamaalin toiminta perustuu maalin kiehumislämpötilan tuomaan laajenemiseen. Lämpötilan saavuttaessa 200 °C maalin kiehumispiste on saavutettu ja se muuttuu muotoaan vaahtomaiseksi suojaksi. Vaahtomainen massa toimii pintoja palonsuojaavana materiaalina, kunnes lämpötila on ylittänyt aineen palamislämpötilan. Tämän jälkeen vaahtomainen massa palaa pinnoilta pois ja sen toiminta paloeristeenä loppuu. /7/

Vaikka tässä opinnäytetyössä ei keskitytä palonsuojattuun liitokseen, on hyvä tietää, kuinka lieventää runkorakenteiden toimivuuden kannalta kriittisten paikkojen lämmönkehitystä palotilanteessa. Oletetaan että ruuvien mitoitusmäärä laskee kun liitokseen alapinnoille sivellään palonsuojamaali.

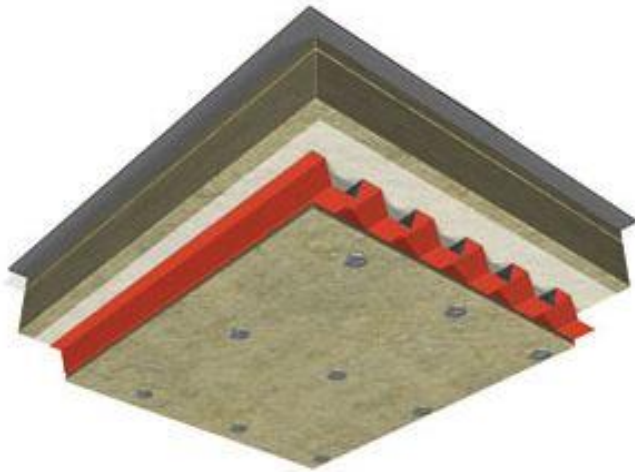
2.2.2 Palonsuojavilla

Palonsuojavilla on rakennusalalla yleisesti käytetty materiaali, kun kyseessä on palonsuojaus. Yleisemmin palonsuojavillaa käytetään tulisijan paloeristämässä muista rakenteista, kun kyseessä on asuinrakennus. Teräsrakenteita suojattaessa kivivillan valmistajat ovat kehittäneet teollisuusrakentamisessa käytettyihin erilaisiin teräsrakenteisiin laadukkaita kiinnitys- ja asennusvaihtoehtoja. Jokaiselle pilari-, palkki- ja levyprofiilille on kehitetty omanlaisensa palonsuojauksen kiinnitysmene-

telmä ja niitä on saatavilla valmistajien sivuilta. Kuvassa 4 on eri profiilien palovillan kotelointiesimerkkejä. Peltiprofiilin palovillan kiinnitys on esitetty kuvassa 5. /9/



Kuva 4. Kuvassa eri teräsprofiileille kehitettyjä palovillan kotelointiratkaisuja. /9/



Kuva 5. Palovillan kiinnitysmenetelmä kantavaan poimulevyyn. /7/

2.3 Köysikuormana toimivan rakenteen mitoitus

Teräksiselle runkorakenteelle on asetettu rakentamismääräyskokoelmassa palotilanteen vaatimukset ja ohjeet, jotka rakenteen kaikkien osien tulee täyttää. Lämpötilan noustessa kriittiseen lämpötilaan, teräs alkaa menettää lujuuttaan kimmomoduulin alenemisen vuoksi. Tämän seurauksena jäykisteenä toimiva poimulevy alkaa riippua tukien varassa ja välittämään tuille tulevia voimia köysikuorman muodossa. Ennen köysikuorman muodostumista rakenteessa olevat jännitykset ovat pääosin koko poimulevyn alueella. Kun poimulevyn materiaalilujuus heikkenee,

sen riippuminen välittää tuella oleville kiinnikkeille tangentinsuuntaisen voiman, jota kutsutaan köysivoimaksi. /2/

Laskentaan käytetään köysikäyrä-yhtälöä, jolla voidaan laskea tuelle vaikuttavat voimavektorit. Tämän kautta päästään itse kiinnikkeiden mitoittamiseen. Voimavektorit on selvennetty kuvassa 5.

Köysikäyrä kuvataan paraabelilla, jonka differentiaaliyhtälö on:

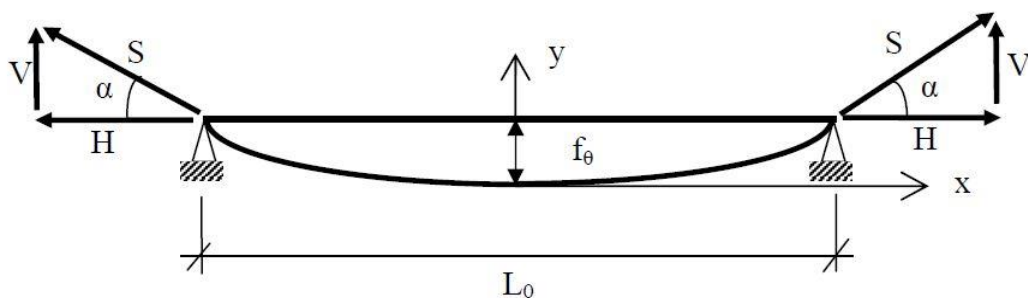
$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{q(x)}{H} \quad (1)$$

jossa

x ja y ovat tarkasteltavan pisteen koordinaatit

$q(x)$ on rakenteeseen vaikuttava tasainen kuorma

H on köysivoiman vaakakomponentti



Kuva 5. Kuvassa on selvennetty köysikäyrää ja siinä esiintyvät muuttujia.

Köysivoima saadaan kaavalla:

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

Kuorman q ollessa vakio $q=q(x)$ saadaan köysikäyrän yhtälöksi:

$$y = \frac{q}{2H} x^2 \quad (3)$$

tai johtamalla rakenteen pituuden L_0 ja riippuman kautta kaavalla:

$$y = \frac{4f_0}{4L_0^2} x^2 \quad (4)$$

Köyden riippuma saadaan kaavalla:

$$f_0 = \sqrt{\frac{3 \cdot \Delta L_0 \cdot L_0}{8}} \quad (5)$$

Momenttiehdolla saadaan vaakakomponentti laskettua kaavalla:

$$M\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{qL^2}{8} = H * f_0 \quad (6)$$

$$\rightarrow H = \frac{q * L^2}{8 * f_0} \quad (7)$$

2.4 Edeltävä tutkimusmateriaali

Teräksestä valmistetun poimulevyn tulipalokäyttäytymistä ovat tutkineet Jyri Outinen ja Wei Lu yhteistyössä Ruukki Oyj:n ja Aaltoyliopiston kanssa. Tämän opinäytetyön materiaalin teoriaosuus ja työn geometria saa perustansa näistä tutkimuksista ja niiden materiaaleista. /3/

Tarkoituksena näissä tutkielmissa on ollut selvittää kantavan poimulevyn toimintaa palotilanteessa ja että tuleeko sen rakenne kestävämmällä suuremmilla palovaatimusluokilla kuten R30 ja R60. Mallinnuksessa on käytetty yksinkertaista mallintamista, jonka reunaehtoihin on lisätty aksiaalisten taipumien estämistä niin, että rakenne käyttäytyy kuin se olisi osa suurempaa kattorakennetta. /3/

Mallissa on mallinnettu yksi aallon matka kantavasta poimulevystä kaksiaukkoisena ja sen pitkillä sivuilla on sivuttaiset taipumat ja nurjahdukset estetty. Työ on mallinnettu ABACUS- simulaattorilla, joka kuuluu samaan kategoriaan kun Comsol Multiphysics. /3/

2.5 Comsol Multiphysics

Comsol Group on Ruotsin Tukholmassa vuonna 1986 perustettu multifysiikan mallinnukseen keskittynyt palvelukeskus. Palvelu on tähän asti laajentanut toimipisteitään 17:n eri maahan ympäri maailmaa. Palvelun asiakkaita ovat yleisesti tutkijat ja tekniikan insinöörit, jotka tarvitsevat mallinnusta monipuolisille fysikaalisille ilmiöille. Yritys tekee kokoajan kasvuaan tekniikan kehittyessä ja tutkimustyön lisääntyessä. /10/

Yrityksen päätuotteena on Comsol Multiphysics 5.0 fysikaalinen simulaattori. Simulaattoria käytetään fysikaalisten ja kemiallisten ilmiöiden sekä ongelmien simuloimisessa. Ohjelmiston käytölle on saatavilla tarvittaessa säännöllisin väliajoin koulutuksia, internetin välityksellä käytäviä webinaareja sekä yrityksen internetsivuilta löytyy laaja valikoima opetusvideoita. /10/

Mallien luomisessa on selvä järjestys. Alkuun tulee tietää fysikaalinen ilmiö tai ilmiöt, joita halutaan tutkia. Alkuun valitaan fysiikan kategoria ja tarvittaessa niiden yhdistely, mikäli tutkimuksissa tarvitaan kahden erilaisen fysiikan yhdistämistä toisiinsa. /10/

Fysiikkaosion jälkeen luodaan tutkittava geometria, jota halutaan simuloida. Geometrian luonnissa tulee käyttää yksinkertaista lähestymistapaa, koska monimutkaiset kuviot voivat hankaloittaa tai pidentää laskentoja. Geometrian luonnin jälkeen geometrian osille määritetään halutut materiaalit sekä niiden materiaaliominaisuudet. Kun tämä vaihe on valmis, mallille syötetään sen reunaehdot, jotta saadaan haluttuja tuloksia. /10/

Kun tämä on tehty, luodaan malliin laskentaverkko, joka jakaa geometrian satoihin pieniin elementteihin. Kyseinen verkon luominen perustuu elementtimenetelmän soveltamiseen moninkertaisesti tarkempaan skaalaan. Mitä tiheämpi laskentaverkko on, sitä tarkempia laskentatuloksia voidaan saada. Elementtiverkon tiheys vaikuttaa myös visuaalisesti vastauksien tulkitsemiseen. Esimerkiksi muodonmuutosta simuloidessa tiheämpi verkko tarkastelualueella tuo huomattavasti selkeämpiä vastauksia. /10/

Kun verkon luonti on suoritettu, voidaan mallin laskennat suorittaa. Ohjelma ilmoittaa välittömästi, mikäli se havaitsee jonkin asteisen virheen edeltävissä vaiheissa. Laskentojen jälkeen voidaan tarkastella saatuja tuloksia ja tuoda niitä esiin. Tuloksien havainnollistaminen on tehty hyvin monipuoliseksi Comsol Multiphysics -simulaattorissa. /10/

2.6 CSC:n Taito-palvelu

Taito-palvelu on supertietokone, jota käytetään tarvittaessa suuria laskentatehoja, joita normaalilla kuluttajalla ei ole saatavilla. Palvelun saa käyttöön hakemuksella, jonka löytää CSC Tieteen tietotekniikan keskuksen sivuilta. Hakemuksen jälkeen palveluun saa kirjautumistunnuksen, joilla palvelun käytön voi aloittaa. Palvelun sisäistämiseen apuna voidaan käyttää CSC:n tukihenkilöitä, joilta saadaan myös kirjautumistunnukset. Palvelusta saa nopeasti vastaukset esitettyihin kysymyksiin ja opastukset, mistä haluttua tietoa voidaan itsenäisesti etsiä. Eri palveluille löytyy kattava kirjasto manuaaleja, joista voidaan opiskella halutun palvelun käyttöä. /11/

Kirjautumalla CSC Tieteen tietotekniikan keskuksen tutkijan käyttöliittymään, käyttäjä voi ladata haluttuja tiedostojaan, joihin hän tarvitsee palvelun tarjoamia laskentatehoja. Tiedostojen laskenta tapahtuu palvelussa saatavan kapasiteettivaraamisen kautta, jossa syötetään tarvittavat tiedot. Tärkeimmät asiat, jotka täytyy tietää, ovat laskentaydinten määrä, laskentaan käytetty aika, laskettavan tiedoston nimi, vastaustiedosto, sekä tapahtuman logi-tiedosto. Laskentapalvelun käytön jälkeen päästään tutkimaan saatuja laskentatuloksia ja ladattua omasta kansioista vastaus-tiedosto. /11/

3 TYÖN MALLINNUS

Laskettavia malleja tehtiin yhteensä kuusi erilaista, joiden jokaisen laskennoissa verrattiin kahta eri kuormitusta. Mitoittavan leikkausvoiman jännityksiä lähdettiin ratkaisemaan kolmella eri mallilla, joista molemmista on mallinnettu puolikas jänneväli ja täyden mitan jänneväli. Näin saadaan varmistettua geometrian toimivuus, kun verrataan kokonaan mallinnetun ja puoliksi mallinnetun geometrian välillä saatavia tuloksia.

Ensimmäinen mallinne on luotu niin, että siinä mallinnetaan kaikki liitoksen osat: kantava poimulevy, ruuvi sekä jäykistettävän teräsristikon yläputkea kuvaava seinämä, johon kantava poimulevy kiinnitetään ruuvilla.

Toinen malli sisältää ainoastaan kantavan poimulevyn, joka on jaettu kolmeen osaan teräsristikon putken kohdalla. Putken kohdassa, missä mallissa 1 oli putken seinämä, on nyt asetettu kantavan poimulevyn pohjaan jännityksiä vastustava jousivakio 1000N/m. Tämän mallin tarkoituksena on selvittää syntyvien siirtymien kautta ruuvit mitoittava voima jousivoiman kaavasta:

$$F = -k * x \quad (8)$$

missä

F on jousivoima (N)

k on jousivakio (N/m)

x on siirtymä (m)

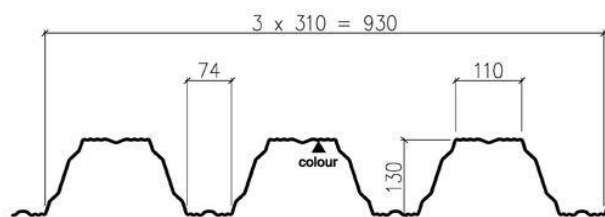
Comsol Multiphysics antaa laskentojen jälkeen tapahtuneet siirtymät ajan funktiona, joiden avulla saadaan laskettua syntynyt voima F, joka on köysikuorman vaakakomponentti H.

Kolmannessa mallissa geometria on sama kuin mallissa 2. Mallin erona on vain se, että jousivakion tilalle on asetettu kantavan poimulevyn pohjaan tuen kohtaan

jäykkä kiinnitys. Tämän mallin tarkoituksena on saada tasaisemmat lämpötilan noususta tuelle syntyvät lämpöjännitykset selville.

3.1 Geometria

Geometria on luotu Jyri Outisen esitysmateriaalin pohjalta /4/. Mallinnuksessa käytetään Ruukki & SSAB:n kantavan poimulevyprofiilin T130-75L-930 mittoja kuvan 6 mukaisesti.



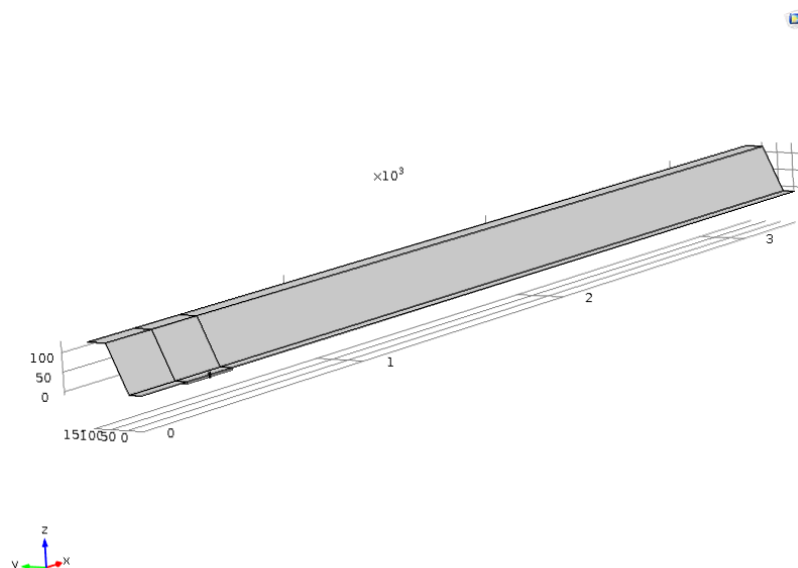
Kuva 6. Mallinnuksessa käytetyn poimulevyn T130-75L-930 mittapiirustus.

Mallinnuksessa on lähdetty liikkeelle mahdollisimman yksinkertaisesta geometrian luonnista. Mitä yksinkertaisempi malli on, sitä vähemmän laskentakapasiteettia tarvitaan ja jatkossa luotavan laskentaverkon laatu on taatumpi. Geometria on luotu niin, että tarkastellaan poimulevyn yhden aallon matkalla tapahtuvia muodonmuutoksia ja lämpökäyttäytymistä. Symmetria-reunaehdon avulla voidaan mallintaa vain $\frac{1}{4}$ aallosta. /4/

Geometriaan on tuotu Ruukki Oy:n kantavan poimulevyn detaljipiirustuksesta yksinkertaistettu profiilin aallon puolikas, jossa ylimääräiset taitokset on suoristettu poimun pohjan ja yläosan välillä. Tarkasteltavan jännevälän pituus on 6 metriä ja tästä mallinnetaan puolet. Poimulevyn jatkopituus on 0,3 metriä, joten sen kokonaispituudeksi tulee 3,3 metriä mallinnuksessa.

Poimulevyn jäykkyyttä parantavat aallon matkalla esiintyvät taitokset on suoristettu, koska ne haittaavat elementtiverkon luontia. Lisäksi työn päätehtävä on selvittää tuelle muodostuvat lämpöjännitykset ja profiilissa olevilla taitoksilla ei ole

suurta merkitystä lämpöjännityksiä tutkittaessa. Suoristettu geometria poimulevyssä auttaa laskentaverkon luonnissa ja sen elementtilaatu tulee olemaan parempi. Kantavan poimulevyn geometria on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Mallin 1 geometrian 3D-piirustus. Kaikissa malleissa geometriassa on mallinnettu poimulevyn yhden aallon puolikas, sekä jänneväli on puolitetty. Profiilin poimun pohjan ja yläosan väliset taitokset on jätetty huomiotta ja suoristettu.

Jäykistettävän ristikon yläputkesta on mallinnettu vain putken yläseinämä, johon teräksinen poimulevy asennetaan kiinnikkeillä. Putken leveydeksi on määriteltä 200 mm ja sen seinämäpaksuus on 5,0 mm. Levyn pohja on asetettu jäykäksi tueksi, jotta jännitykset saadaan kohdistumaan kantavan poimulevyn tuen alueelle. Lisäksi jäykistys putken seinämän pohjapinnassa kuvaa oikealla tavalla jäykistettävää ristikköä. Malleissa 2 ja 3 tämä putken seinämä on jätetty mallintamatta.

Ruuvista on mallinnettu puolet, koska symmetria reunaehto luo peilauksen koko rakenteelle. Ruuvien pituus on 20 mm ja paksuudeksi on määriteltä 5,5 mm. Tämän lisäksi ruuville on mallinnettu kantaa kuvaava toinen sylinteri, joka on yhdistetty ruuvien toiseen sylinteriin. Ruuvien sijainti geometriassa on asetettu jäykistettävän teräsristikön putken seinämän keskelle. Myös ruuvi on jätetty malleissa 2 ja 3 mallintamatta.

3.2 Mekaaninen kuormitus

Jokaiseen malliin on annettu kaksi erilaista mekaanista kuormitusta. Kuormitus on syötetty geometrian yläpintoihin alaspäin suunnattuna. Kuormitukset on annettu opinnäytetyön toimeksiantajan toiveiden mukaan. Lumikuorma määräytyy Vaasan alueen mukaan. /8/

1. Pysyvä kuorma 1 1,0 kN/m²
2. Lumikuorma 1,6 kN/m²

Lisäksi kantavan poimulevyn käyttäytymistä halutaan tarkastella, kun mekaaniset kuormitukset ovat hyvin alhaiset. Näin saadaan selville mekaanisten kuormien osuus köysikuormasta ja mahdollisesti ymmärrystä kantavan poimulevyn käyttäytymiseen sen ollessa ainoa säältä suojaava katemateriaali.

1. Pysyvä kuorma 2 0,1kN/m²
2. Muut kuormat 0,0kN/m²

Koska kyseessä on palotilanne, se on onnettomuuden aiheuttama kuormitus. Onnettomuustilanteen kuormitus määritellään seuraavalla kaavalla, johon yhdistelykertoimet Ψ_0 , Ψ_1 , Ψ_2 saadaan taulukosta 2:

$$F_d = \sum_j \gamma_{GA} * G_{k,j} + A_d + \Psi_{1,1} * Q_{k,1} + \sum_{i>1}^n \Psi_{2,i} * Q_{k,i} \quad (9)$$

missä

$G_{k,j}$ on pysyvien kuormien ominaisarvoja

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

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

A_d on onnettomuuskuorma mitoitusarvo

Ψ_0 , Ψ_1 , Ψ_2 ovat yhdistelykertoimia

Taulukko 2. Onnettomuustilanteen kuormitusten yhdistelykertoimet Ψ_0 , Ψ_1 ja Ψ_2 .
/8/

Kuorma:	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa:			
Luokka A: Asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: Toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: Kokoonmistilat	0,7	0,7	0,6
Luokka D: Myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: Varastotilat	1	0,9	0,8
Luokka F: Liikennöitävät tilat Ajoneuvon paina ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: Liikennöitävät tilat 30 kN < Ajoneuvon paino \leq 160 kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: Vesikatot	0	0	0
Lumikuorma	0,7	0,5	0,2
Tuulikuorma	0,6	0,2	0

Taulukosta saadaan lumikuorman yhdistelykerroin $\Psi_1=0,5$. Pysyville kuormille saadaan mitoittava kuormitus varmuuskertoimella $\gamma_{GA}=1,0$. Näin ollen lopullinen kuormitus lasketaan seuraavasti:

$$F_d=1,0*1,0\text{kN/m}^2+0,5*1,6\text{kN/m}^2$$

$$F_d =1,8\text{kN/m}^2$$

Tämän mekaanisen kuormituksen lisäksi tutkitaan myös kuorman $0,1\text{kN/m}^2$ vaikutusta rakenteen toimintaan. Kaikki mallit lasketaan näillä kahdella kuormitusvaihtoehdolla.

3.3 Symmetria

Opinnäytetyön mallinteissa, jotka ovat mallinnettu puolen jännevälän pituudella, on geometrian kolmelle sivulle asetettu symmetriakomento, jonka avulla laskenta ymmärtää rakenteen ”peilattuna”. Pinnalle asetettuna symmetriakomento estää aksiaalisia voimia vaikuttamasta ei-haluttuun suuntaan. Kun yhdelle sivulle on asetettu symmetria-komento, rakenne käyttäytyy laskennoissa niin kuin sen vieressä olisi samanlainen rakenne eli peilaus. Symmetrian voi asettaa tarvittaessa myös erillisiin rakenteisiin, jos ei haluta koko rakenteen peilautuvan. /3; 11/

Symmetria-reunaehto on asetettu muotopellin molemmille pitkille sivuille, jotta laskenta ymmärtää sivuillaan olevan samanlainen rakenne peilattuna. Tämän johdosta rakenteen muodonmuutos tapahtuu vain y-akselin suhteen ja muut aksiaaliset muutokset ovat estetty. Symmetria on asetettu myös poimulevyn tuen vastaiselle päädylle, jotta laskenta ymmärtää, että toisella puolella geometriaa on samanlainen rakenneratkaisu. Malleissa, jotka mallinnettiin täydellä jännevälillä, on vain pitkille sivuille asetettu symmetrian reunaehto. /10/

3.4 Palokuormitus

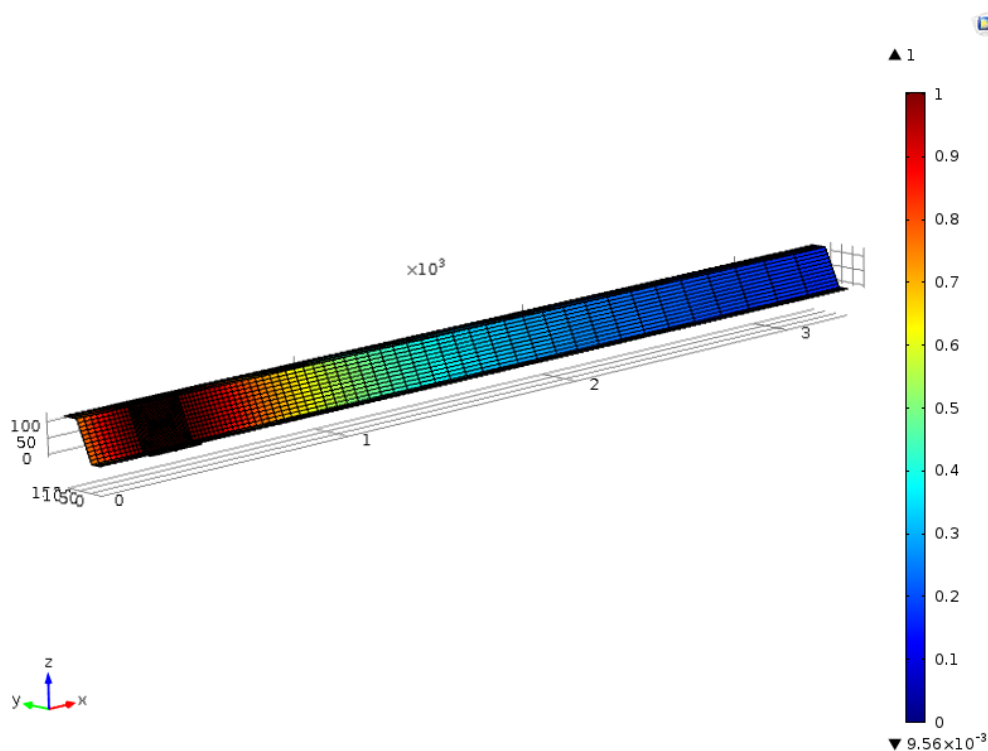
Rakenteen geometrian alapintoihin on asetettu lämpökuormitus konvektion lämpövuolla ja säteilyn lämpövuolla. Kummankin kaavan laskennassa tarvittava lämpötila on ohjelmoitu standardipalokäyrä ISO-834 lämpötilan nousun mukaan. Näin kantavan poimulevyn liitoksessa lämpötila nousee säteilyn ja konvektion avulla simuloiden palotilanteen lämmönkehitystä rakenteiden pinnoilla. /10/

Koska tilannetta halutaan tarkastella 900 sekunnin ajan, lämmönkehitys lasketaan 5 sekunnin välein lisäten aina edeltävän hetken lämpötilaan seuraavan hetken nettolämpövuon aiheuttama lämpötilan nousu. Pintojen alkulämpötila on 20°C , jota lähdetään kohottamaan, kunnes ollaan saavutettu viimeinen ajankohta 875 sekuntia. Tämä reunaehto on kaikissa malleissa asetettu samaksi. /10/

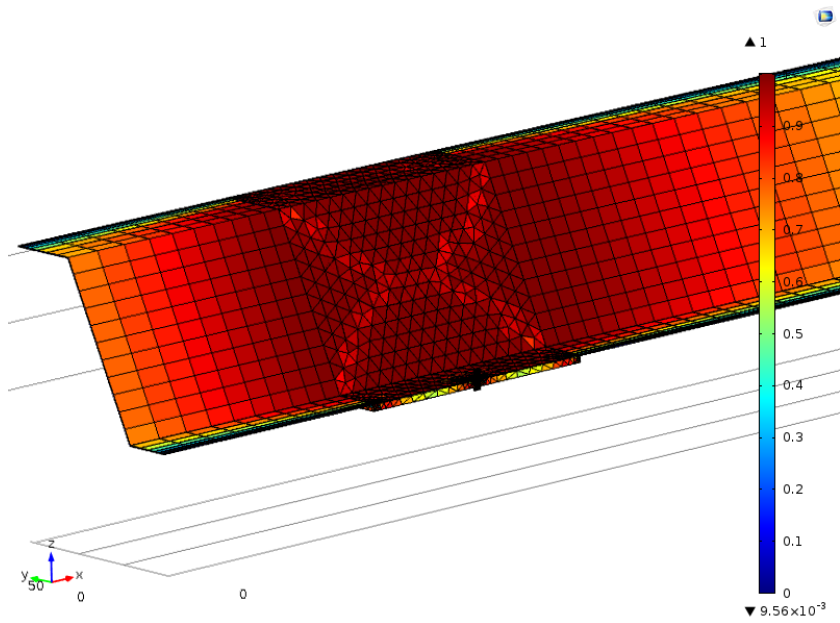
3.5 Laskentaverkko

Laskentaverkko on keskitetty ruuvin ja tuen alueelle. Poimulevy on tuen alueella leikattu verkon muodostamisen vuoksi kolmeen osaan. Laskentaverkko on tuen alueella tiheämpi ja suorittaa täten laskennat tarkemmin. Poimulevyn kaksi muuta osaa on tehty yksinkertaisella elementtiverkolla. Verkko muuttuu tiheämmäksi siirryttäessä lähemmäksi tukea. Kuvassa 8 on esitetty mallin 1 geometrian laskentaverkko. /10/

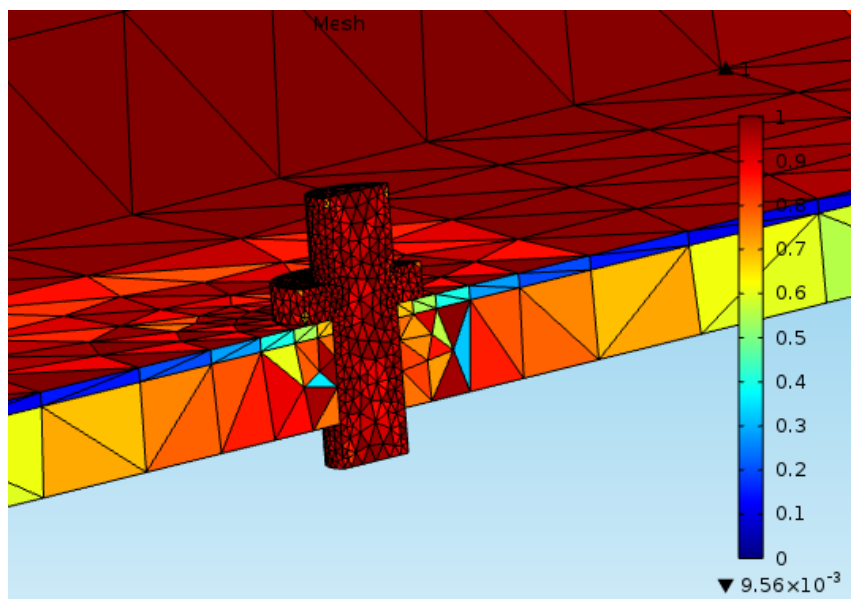
Malleissa joissa mallinnettiin koko jänneväli, laskentaverkko on samalla koolla mallinnettu ja se on symmetrinen. Poimulevy on näissä malleissa jaettu viiteen osaan, joista kaksi ovat tuen kohdalla tiheämmällä verkolla luodut. Kuvista 9 ja 10 nähdään kuinka laskentaverkko tihenee siirryttäessä lähemmäksi tarkkailtavaa aluetta. /10/



Kuva 8. Ensimmäisen mallin geometriaan luotu laskentaverkko ja sen elementtilaatu on luotu tarkemmaksi ja tiheämmäksi tuelle siirtyessä. Malleissa 2 ja 3 kantavan poimulevyn laskentaverkko on samanlainen.



Kuva 9. Väriskaalan perusteella laskentaverkon elementtilaatu on laadukkaampi tuen alueella.



Kuva 10. Ensimmäisen mallin ruuvin laskentaverkko, joka on huomattavasti tiheämmällä elementtijaolla tehty.

3.6 Laskennat

Laskennat ovat suoritettu kahdessa erivaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa Comsol Multiphysics laskee lämpöanalyysin ajan funktiona, kun rakenteen pohjapintoihin syötetään lämpökuorma säteilyn ja johtumisen toimesta. Opinnäytetyön toimeksiantajan toiveena oli, että tilannetta mitoitetaan 900s asti ja 5 sekunnin välein. Ensimmäinen vaihe on tehty näillä ehdoilla. /10/

Toisessa vaiheessa lisätään ensimmäisen vaiheen lämmönanalyysin laskentoihin stationäärinen mekaniikkatehtävä käyttäen hyväksi ensimmäisessä vaiheessa laskettua lämpötilajakaumaa. Tämän kautta saadaan selville lämpötilan noususta johtuvat lämpöjännitykset ja mallissa tapahtuvat muodonmuutokset. Tässä vaiheessa laskennat jaetaan 25 eri ajankohtaan apumuuttujan $\text{para}=5\text{s}$ avulla. Tuloksista saadaan selville 30 sekunnin välein lämmönkehitys sekä lämpöjännitykset rakenteessa. /10/

4 TULOKSET

4.1 Lämpöjännitykset

Jäykissä malleissa 1 ja 3 tuen kohdassa on estetty kantavan poimulevyn lämpölaajeneminen. Tämän johdosta syntyy tuelle suuria lämpöjännityksiä lämpötilan kohoamisen takia. Lämpötilan noususta johtuvat lämpöjännitykset alkavat muodostua jo varhaisessa vaiheessa tulipalon alusta. Kantavan poimulevyn lämpöjännitykset ovat suurimmillaan juuri ennen kriittisen lämpötilan saavuttamista.

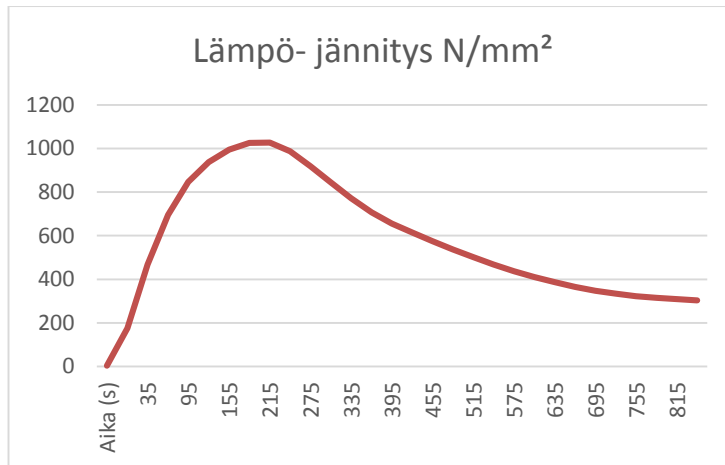
Kriittisen lämpötilan ylittyessä kantavan poimulevyn lämpöjännitykset ovat saavuttaneet huippunsa ja materiaalilujuuden heikkenemisen myötä lämpöjännitykset alkavat laskea. Vaikka kantavan poimulevyn jännitykset alenevatkin, sen muodonmuutos köysirakenteena alkaa suuntaamaan jäljellä olevia lämpöjännityksiä tuelle keskittäen. Suurin huippu tuen lämpöjännityksissä tapahtuu, kun kantavan poimulevyn köysikuormitus alkaa ajankohtana 215s ja lämpöjännitysten huipun arvoksi tulee 1030N/mm²

Mallissa 1, jossa on mallinnettu ruuvi ja teräsristikon yläputken seinämä, jännitysjakauma oli hieman epätasainen verrattaessa mallin 3 tasaiseen jäykkään kiinnityseen.

Kun kantavan poimulevyn tuen alueelta poimittiin lämpöjännitysten keskiarvot, ne olivat mallissa 1 huomattavasti alhaisemmat kuin mallin 3 lämpöjännitykset. Kuitenkin kun mallissa 1 poimittiin satunnaisia tuloksia ruuvien läheisyydestä noin 3–5 cm etäisyydeltä, tulokset olivat samaa kokoluokkaa kuin mallissa 3. Oletetaan, että malli 3 antaa tähän asti parhaimmat tulokset, kun poimitaan tuen lämpöjännityksiä keskiarvolla. Lämpöjännityksien muodostuminen on taulukossa 3.

Kaikissa jäykän tuen malleissa lämpöjännitysten suuruus ei vaihtele mekaanisen kuormituksen 1 ja 2 välillä. Lämpöjännitykset vaihtelevat suuremman ja pienemmän mekaanisen kuormituksen välillä keskimäärin 0,2N/mm².

Taulukko 3. Mallin 3 lämpöjännityksien muodostuminen tuen alueella ajan funktiona.

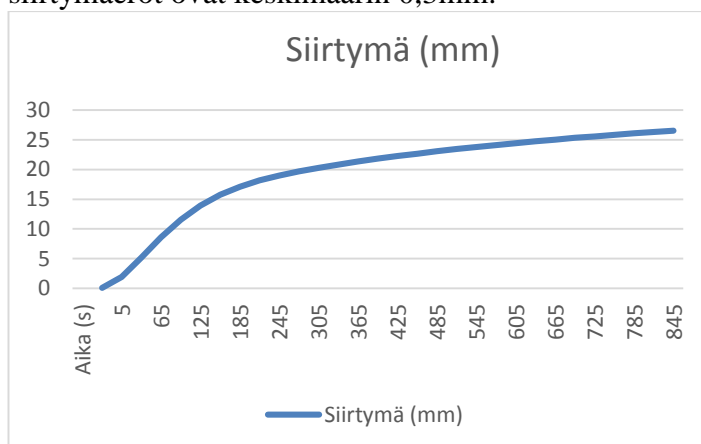


4.2 Siirtymät

Mallissa 2 siirtymät alkavat muodostua tasaisella nousulla, kunnes siirtymien kasvu alkaa hidastua ajankohdan 215s jälkeen. Tämä on sama ajankohta, jolloin malleissa 1 ja 3 kriittinen lämpötila ja maksimijännitykset tuen alueilla on saavutettu.

Mekaanisten kuormitusten 1 ja 2 vertailussa huomataan, että siirtymien arvot vaihtelevat hyvin vähän. Suurempi kuormitus aiheuttaa keskimäärin 0,3mm suuremmat siirtymät kuin pienempi kuormitus. Taulukossa 4 on esitetty tuen siirtymien muodostuminen ajan funktiona.

Taulukko 4. Mallissa 2 tapahtuvat siirtymät ajan funktiona. Kuormitusten väliset siirtymäerot ovat keskimäärin 0,3mm.

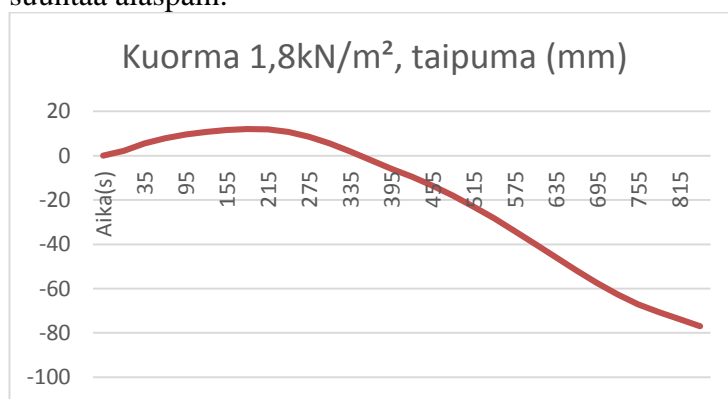


4.3 Muodonmuutokset

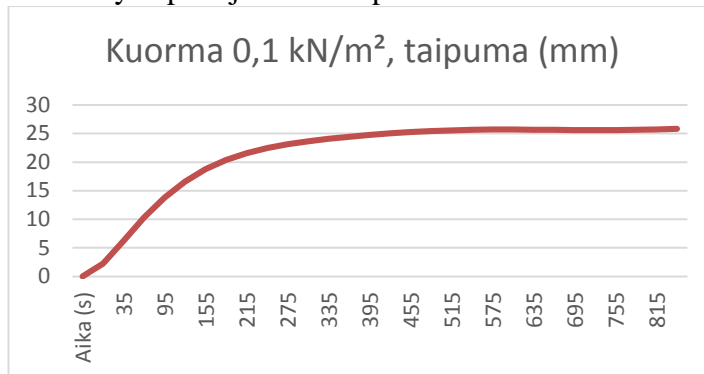
Cosol Multiphysics -simulaattorilla pystyy tulostamaan rakenteen muodonmuutoksia ajan funktiona. Tarkasteltaessa jäykän tuen malleja huomataan, että normaalilla kuormituksella kantava poimulevy käyttäytyy juuri niin kuin sen kuuluukin palotilanteessa käyttäytyä.. Siirtymiä tarkastellessa poimulevyn taipuma suuntautuu alkuperäisestä asennosta aluksi suunnaten ylös. Tätä tapahtuu 215 sekuntiin asti, kunnes taipuman muutos suuntaa takaisin alaspäin. Normaalilla kuormituksella 1 kantava poimulevy alkaa viimein riippua, niin kuin se olisi köysirakenne. Luettaessa Jyri Outisen tutkimusraporttia, kantavan poimulevyn muodonmuutos palotilanteessa oli samanlainen.

Kun kuormitus 1 vaihdetaan kevyempään kuormitukseen 2, Cosol Multiphysics -muodonmuutoksien tarkastelu osoittaa, että kantavan poimulevyn muodonmuutokset tapahtuvat päinvastaiseen suuntaan. Lämpötilan kohotessa kantavan poimulevyn jännevälin keskellä tapahtuva taipuma suuntautuu ylöspäin. Kuitenkin jännitykset ovat samaa kokoluokkaa tuen alueella kuin suuremman kuormituksen laskennassa. Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty mallin 3 taipumaviivan käyttäytyminen jännevälin puolessa välissä.

Taulukko 5. Mallissa 3 normaalilla kuormituksella taipumaviiva jännevälin puolessa välissä nousee 215 sekuntiin asti alkuperäisestä asemastaan ja tämän jälkeen suuntaa alaspäin.



Taulukko 6. Mallin 3 pienellä kuormituksella kantavan poimulevyn taipumaviiva suuntaa ylöspäin jännevälän puolella välissä.



4.4 Kiinnikkeiden määrä

4.4.1 Malli 1

Ruuvien kanssa mallinnettu tuki antaa epätasaisen lämpöjännitysjakautuman, kun poimitaan lämpöjännityksen suuruuksia ruuvien eri etäisyyksiltä. Lisäksi tuen keskiarvolla poimitut tulokset ajan funktiona ovat huomattavasti alhaisempia, kuin mallissa 3, niin päädytään etsimään suurin vaikuttava lämpöjännitys tuella.

Ensimmäisen mallin antamien tuloksien perusteella 1030N/mm² on suurin lämpöjännityksen arvo tuella ajanhetkellä 215 s, kun tulokset poimitaan satunnaisesti ruuvien läheisyydestä. Tässä mallissa ruuvien mitoittava voima saadaan laskettua suurimman lämpöjännityksen aikana seuraavasti: /12/

$$F = \sigma * A \quad (10)$$

$$F = 1030 \frac{N}{mm^2} * 0,8mm * 74mm = 60,8kN$$

missä

F on mitoittava leikkausvoima

σ on tuella vaikuttava lämpöjännitys

A= poimulevyn ala jolla lämpöjännitys vaikuttaa

Ruuvien normaalitilanteen reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$ tulee kaavasta: /13/

$$F_{b,Rd} = k_1 * \alpha_b * f_u * d * t / \gamma_{M2} \quad (13)$$

missä

k_1 ja α_b ovat voiman suunnasta riippuvat tekijät

f_u on materiaalin murtolujuus

d on ruuvien halkaisija

t on tarkasteltavan osan paksuus

γ_{M2} on kestävyysosavarmuusluku normaalitilanteessa

Ruuvien palotilanteen reunapuristuskestävyys $F_{b,t,Rd}$ saadaan kaavasta: /13/

$$F_{b,t,Rd} = k_{b,\theta} * F_{b,Rd} * \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (14)$$

missä

$k_{b,\theta}$ on kimmomoduulin pienennystekijä lämpötilan funktiona

$F_{b,Rd}$ ruuvien reunapuristuskestävyys normaalitilanteessa

γ_{M2} on kestävyysosavarmuusluku normaalitilanteessa

$\gamma_{M,fi}$ on kestävyysosavarmuusluku palotilanteessa

Yhden ruuvien normaalitilanteen reunapuristuskestävyys on siis:

$$F_{b,Rd} = 2,5 * 1,0 * 600 \frac{N}{mm^2} * 5,5mm * \frac{0,8}{1,25} = 5,3kN$$

Koska kimmomoduulin muuttuminen on ajan funktiona interpoloitu Comsol Multiphysics simulaattorissa, saadaan sen arvoksi $1,33 * 10^{10}$ Pascalia 215 sekunnin kohdalla. Näin ollen alkuperäisestä kimmomoduulin arvosta $21 * 10^{11}$ (Pa) on jäljellä

63%. Ruuvien palotilanteen reunapuristuskestävyyden kaavassa kimmomoduulin pienennystekijäksi saadaan $k_{b,\theta}=0,63$

Lasketaan ruuvien reunapuristuskestävyys:

$$F_{b,t,Rd} = 0,63 * 5,3kN * \frac{1,25}{1,0} = 4,2kN$$

Kun leikkausvoima jaetaan ruuvien palotilanteen reunapuristuskestävyydellä, saadaan tarvittava ruuvimäärä kyseiselle ajankohdalle.

$$\frac{60,8kN}{4,2kN} = 14,5 \approx 15kpl$$

4.4.2 Malli 2

Siirtymien muodostuminen mallissa tapahtuu alkuun tasaiseen tahtiin, kunnes on saavutettu ajankohta 215s. Tämän jälkeen siirtymien kasvun nopeus hidastuu, mutta kasvu on edelleen tasaista. Mallin 2 tulokset eivät olleet luotettavia, joten ruuvien määrän laskenta on jätetty tekemättä tässä mallissa.

Mallissa 2 haetaan syntyvät voimat jousivoiman kaavan kautta:

$$F = -k * x$$

missä

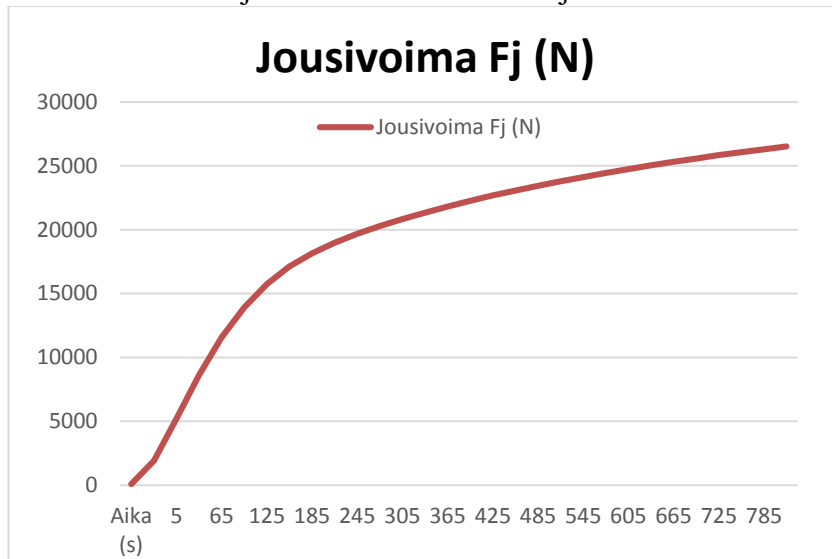
F on jousivoima

k on jousivakio (1000N/m)

x on siirtymät

Taulukossa 7 on esitetty jousivoiman kehittyminen ajan funktiona. Mallin 2 jousivakioksi on asetettu 1000N/m ja tämä kerrotaan siirtymien arvoilla muuttaen siirtymät perusyksiköihin. Tästä saadaan ruuveja rasittava vaakasuuntainen voima F_j .

Taulukko 7. Jousivoiman F_j suuruus ajan funktiona. Voima kasvaa nopeammin 215 sekuntiin asti ja nousu hidastuu tämän jälkeen.



4.4.3 Malli 3

Tämän mallin tuen jännitys jakauman tulokset olivat tasaisemmat ja niiden arvojen keskiarvot tuella saatiin tulostettua. Laskennoissa selvitetään mitoittava leikkausvoima ajan funktiona saaduista lämpöjännityksistä ja vertaamalla samanaikaisesti ruuvien palotilanteen reunapuristuskestävyyttä samalla ajankohdalla. Näin saadaan selville ruuville rasittavin hetki sekä tarvittava ruuvien määrä tuella.

Liitteessä 1 ovat laskennat, joissa lasketaan leikkausvoima ja ruuvien reunapuristuskestävyydet jokaisena ajankohtana jokaiselle eri mallille. Verraten mallin 1 laskentaan, jossa ruuvimääräksi saatiin 15 kpl, osoittautui, että 875 sekunnin aikana mallissa 3 kiinnikkeitä tarvitaan 23kpl.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

5.1 Tulosten analysointi

Kriittinen lämpötila toimii suurena tekijänä tämän opinnäytetyön tuloksissa. Kaikissa malleissa tuloksissa havaittiin muutos heti 215s jälkeen, jolloin on saavutettu kriittinen lämpötila.

Mallissa 1 ei saatu tulostettua kunnollisia tuloksia, koska jännitysjakautuma oli epätasainen tuen alueella. Mallilla kuitenkin pystyy tutkimaan kantavan poimulevyn käyttäytymistä ja jännitysten muodostumista ajan funktiona. Comsol Multiphysics pystyy tulostamaan videon, jossa on asetettu lämpöjännitykset tarkasteltavaksi. Videosta pystyy selvästi näkemään, että kantavan poimulevyn jännitykset ovat suurimmillaan ennen kriittistä lämpötilaa. Tämän jälkeen jännitykset vapautuvat ja kohdistuvat tuelle.

Jousikuormitetussa mallissa 2 voimien käyttäytyminen on hyvin erilaista verraten muihin malleihin 1 ja 3. Verraten muihin malleihin mitoittava voima kasvaa jatkuvasti ja menettää kriittisen lämpötilan kohdalla kasvunopeuttaan. Toisissa malleissa sentään lämpöjännitykset ja niistä lasketut mitoittavat leikkausvoimat kasvavat huippuunsa kriittisen lämpötilan kohdalla. Tämän jälkeen lämpöjännitykset alkavat pienentyä materiaalilujuuden alenemisen johdosta.

Jousivoiman kaavalla saadut tulokset ovat hyvin erilaiset verrattuna mallin 3 laskentoihin. Oletetaankin, että mallin 2 laskennoissa on kenties jäänyt huomioimatta jokin kriittiseen lämpötilaan ja teräksen plastisoitumiseen liittyvä tekijä. Tämä mallin ruuvien mitoitus jätettiin tekemättä, koska sen mitoittavan voiman tulokset ja laskennat ovat keskeneräiset ja epäluotettavat.

Mallissa 3 on asetettu jäykkä tuki kantavan poimulevyn pohjaan tuen kohdalla. Koska jännitykset ovat paremmin saatu tulostettua ja ruuvimäärät laskettua, se on tämän työn todellisuutta lähimpänä oleva malli tuloksiensa perusteella. Tuloksien perusteella pystyttiin laskemaan ruuvien määrä reunapuristuskestävyyden avulla.

Kuormituksen suuruuden vaikutus lopputuloksiin on lähes olematon. Kuitenkin malleissa 1 ja 3 kuormitus määrää taipuman suunnan. Kun kuormitus on suurempi, kantavan poimulevyn taipuma palotilanteessa tapahtuu alaspäin. Tarkastellessa taipuman käyttäytymistä ilmeni, että se nousi ylös ennen kriittisen lämpötilan saavuttamista. Kun kriittinen lämpötila on ylitetty, kantava poimulevy menettää kantokykynsä ja taipuma suuntaa alaspäin.

Kun tarkastellaan kevyttä kuormitusta kantavan poimulevyn päällä, huomataan, että kantavan poimulevyn taipumaviiva suuntaa koko tarkasteluajanjaksolla ylöspäin. Taipuma on nopeampaa ennen kriittistä lämpötilaa, jonka jälkeen sen kasvu hidastuu. Voidaan todeta, että kantava poimulevy pyrkii nousemaan lämpöjännitysten tai puristuksen aikana. Tähän syynä on kantavan poimulevyn profiilimitassa verrattu ylä- ja alapoimun leveys. Koska alapoimun pohja on kapeampi, se on nurjahdukselle heikompi puoli.

5.2 Johtopäätökset ja tuotosten luotettavuus

Rakenteessa tapahtuu 215 sekunnin jälkeen materiaalilujuuden heikkeneminen eli plastisoituminen. Tämä on ajankohta, kun kriittinen lämpötila on saavutettu. Mekaanisen kuormituksen osuus jännityksiin on hyvin vähäinen. Lämpöjännitys on suurin kuormituksen aiheuttaja tuella.

Taipuman suunta kantavassa poimulevyssä tapahtuu isommalla kuormituksilla alussa ylöspäin lähtöasemasta. Pienemmällä kuormalla taipuma on yläsuuntainen, josta voidaan päätellä, että kantavan poimulevyn alapinta on nurjahduserkempi kuin yläpinta. Lämpöjännitysten tai vaakasuuntaisten puristusten sattuesssa kantava poimulevy pyrkii nurjahtamaan ylös, joka tarkoittaa, että se ”vastustaa” sen yläpuolella olevaa mekaanista kuormitusta.

Kantavan poimulevyn lämpöjännitykset ovat suurimmillaan ennen kriittisen lämpötilan saavuttamista. Tämän jälkeen kantava poimulevy muodostaa suurimman kuormituksen tuella suuntaamalla kuormitukset tangentin suuntaisena köysikuormana.

Liitoksen kotelointi palovillalla tai palosuojamaalin sively paloalttiille pinnalle auttaisi lieventämään lämpötilankehitystä liitoksessa. Jatkotutkimuksissa olisi syytä tutkia liitosta palosuojauksen kanssa.

Tämän opinnäytetyön mallin tuotoksia ei saa käyttää varsinaiseen mitoittamiseen. Opinnäytetyön aikaraja tuli vastaan ja laskentoihin ei voida varmuudella luottaa. Luotettaviin laskentoihin vaaditaan kehittyneempi malli testattuna erilaisilla poimulevyprofiileilla sekä alalla kauemmin työskennelleet ammattilaiset, jotka voivat varmistaa laskentojen pitävyyden. Jotta saadaan luotettavaa materiaalia, täytyy aiheutta tutkia pitkään ja hartaudella.

6 LÄHTEET

- /1/ E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011. <http://www.ymparisto.fi>
- /2/ Teräsnormikortti N:o 19/3011:Teräksestä valmistetun kantavan muotolevyn kestävyys tulipalossa. <http://www.terasrakenneyhdistys.fi>
- /3/ Outinen, J., Lu, W. & Mäkeläinen, M. 2007. Numerical Simulation of Catenary Action in Cold- Formed Steel Sheeting in Fire. Rakenteiden Mekaniikka. Vol.40, No 3,. 28-37
- /4/ Outinen, J., Lu, W. & Puttonen, J. 2013. Fire Designing Method For Cold-Formed Steel Sheeting System. Aalto-yliopisto
- /5/ Eurokoodi 3: SFS-EN 1993-1-2: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2:Rakenteiden palomitoitus
- /6/ Ruukki & SSAB: Kantavat poimulevyt asennusohje. <http://www.ruukki.fi/Referenssit/Julkkiset-rakennukset>
- /7/ Tikkurila Oy. Palonsuojamaalaus. [http://www.tikkurila.fi/teollinen_maa-
laus/metalliteollisuus/terasrakenteiden_palosuojaus/palosuojamaalaus](http://www.tikkurila.fi/teollinen_maa-
laus/metalliteollisuus/terasrakenteiden_palosuojaus/palosuojamaalaus)
- /8/ Eurokoodi 1: SFS-EN 1990: Rakenteiden suunnittelun perusteet
- /9/ Paroc Oy. Rakenteiden palonsuojaus. <http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/ratkaisut/palo/terasrakenteiden-palosuojaus>
- /10/ The Comsol Group: www.comsol.com
- /11/ CSC-tietotekniikan keskus: www.csc.fi
- /12/ Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö J. 2010. Tekniikan kaavasto. 9. painos. Tampere. Tammertekniikka
- /13/ Ongelin, P. & Valkonen, I. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja. http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf

LIIKTEET

LIITE 1: Malli 3 tulokset kuormitus 1,8kN/m², puolikas jänneväli

Malli 3

Kuormitus 1,8 kN/m²
Mallinnettu puolikas jänneväli

<u>Aika</u> <u>(s)</u>	<u>Lämpö- jännitys</u> <u>N/mm²</u>	<u>Kimmo- moduuli</u> <u>(Pa)</u>	<u>Kimmoduulin pienennystekijä</u> <u>kbθ</u>	<u>Leikkaus- voima N</u>	<u>Reunapuristus- kestävyys N</u>	<u>Ruuvit</u>
5	3	2,E+11	1,00	173	6600	0,0
35	175	2,E+11	1,00	10366	6600	1,6
65	467	2,E+11	0,95	27665	6291	4,4
95	695	2,E+11	0,85	41155	5619	7,3
125	847	2,E+11	0,77	50134	5105	9,8
155	937	1,E+11	0,71	55484	4691	11,8
185	995	1,E+11	0,67	58877	4399	13,4
215	1026	1,E+11	0,63	60758	4177	14,5
245	1028	1,E+11	0,60	60851	3946	15,4
275	987	1,E+11	0,55	58446	3626	16,1
305	919	1,E+11	0,49	54422	3260	16,7
335	845	9,E+10	0,44	50014	2909	17,2
365	772	8,E+10	0,39	45728	2591	17,6
395	708	7,E+10	0,35	41901	2319	18,1
425	655	7,E+10	0,32	38804	2102	18,5
455	615	6,E+10	0,29	36385	1933	18,8
485	575	6,E+10	0,27	34058	1778	19,2
515	537	5,E+10	0,25	31784	1632	19,5
545	501	5,E+10	0,23	29661	1501	19,8
575	468	4,E+10	0,21	27706	1383	20,0
605	437	4,E+10	0,19	25893	1275	20,3
635	410	4,E+10	0,18	24279	1181	20,6
665	386	3,E+10	0,17	22863	1100	20,8
695	365	3,E+10	0,16	21625	1029	21,0
725	348	3,E+10	0,15	20592	970	21,2
755	334	3,E+10	0,14	19756	922	21,4
785	323	3,E+10	0,13	19106	883	21,6
815	315	3,E+10	0,13	18649	855	21,8
845	309	3,E+10	0,13	18274	831	22,0
875	303	3,E+10	0,12	17916	808	22,2
Ruuvimäärä				22,2	23	kpl

LIITE 2: Malli 3 tulokset kuormitus 0,1kN/m², puolikas jänneväli

Malli 3

Kuormitus 0,1 kN/m²
Mallinnettu puolikas jänneväli

<u>Aika</u> <u>(s)</u>	<u>Lämpö- jännitys</u> <u>N/mm²</u>	<u>Kimmo- moduuli</u> <u>(Pa)</u>	<u>Kimmoduulin pienennystekijä</u> <u>kbθ</u>	<u>Leikkaus- voima N</u>	<u>Reunapuristus- kestävyys N</u>	<u>Ruuvit</u>
5	0,16	2,E+11	1,00	10	6600	0,0
35	174,82	2,E+11	1,00	10349	6600	1,6
65	467,19	2,E+11	0,95	27657	6291	4,4
95	695,08	2,E+11	0,85	41149	5619	7,3
125	846,77	2,E+11	0,77	50129	5105	9,8
155	937,15	1,E+11	0,71	55479	4691	11,8
185	994,47	1,E+11	0,67	58873	4399	13,4
215	1026,24	1,E+11	0,63	60754	4177	14,5
245	1027,82	1,E+11	0,60	60847	3946	15,4
275	987,20	1,E+11	0,55	58442	3626	16,1
305	919,21	1,E+11	0,49	54417	3260	16,7
335	844,75	9,E+10	0,44	50009	2909	17,2
365	772,34	8,E+10	0,39	45723	2591	17,6
395	707,70	7,E+10	0,35	41896	2319	18,1
425	655,38	7,E+10	0,32	38798	2102	18,5
455	614,50	6,E+10	0,29	36379	1933	18,8
485	575,19	6,E+10	0,27	34051	1778	19,2
515	536,78	5,E+10	0,25	31778	1632	19,5
545	500,91	5,E+10	0,23	29654	1501	19,8
575	467,88	4,E+10	0,21	27698	1383	20,0
605	437,24	4,E+10	0,19	25885	1275	20,3
635	409,98	4,E+10	0,18	24271	1181	20,5
665	386,05	3,E+10	0,17	22854	1100	20,8
695	365,14	3,E+10	0,16	21616	1029	21,0
725	347,67	3,E+10	0,15	20582	970	21,2
755	333,55	3,E+10	0,14	19746	922	21,4
785	322,57	3,E+10	0,13	19096	883	21,6
815	314,84	3,E+10	0,13	18638	855	21,8
845	308,50	3,E+10	0,13	18263	831	22,0
875	302,46	3,E+10	0,12	17906	808	22,2

Ruuvimäärä	22,2	23 kpl
------------	------	--------

LIITE 3: Malli 3 tulokset kuormitus 1,8kN/m², kokonainen jänneväli

Malli 3

Kuormitus 1,8 kN/m²
Mallinnettu Koko jänneväli

<u>Aika</u> <u>[s]</u>	<u>Lämpö- jännitys</u> <u>N/mm²</u>	<u>Kimmo- moduuli</u> <u>[Pa]</u>	<u>Kimmoduulin pienennystekijä</u> <u>kbθ</u>	<u>Leikkaus- voima N</u>	<u>Reunapurist- us-kestävyys</u> <u>N</u>	<u>Ruuvit</u>
	KA					
5	3	2,E+11	1,00	176	6600	0,0
35	175	2,E+11	1,00	10381	6600	1,6
65	468	2,E+11	0,95	27717	6291	4,4
95	697	2,E+11	0,85	41234	5619	7,3
125	849	2,E+11	0,77	50232	5105	9,8
155	939	1,E+11	0,71	55593	4691	11,8
185	997	1,E+11	0,67	58993	4399	13,4
215	1028	1,E+11	0,63	60878	4177	14,6
245	1030	1,E+11	0,60	60971	3946	15,5
275	989	1,E+11	0,55	58561	3626	16,1
305	921	1,E+11	0,49	54528	3260	16,7
335	846	9,E+10	0,44	50111	2909	17,2
365	774	8,E+10	0,39	45816	2591	17,7
395	709	7,E+10	0,35	41981	2319	18,1
425	657	7,E+10	0,32	38878	2102	18,5
455	616	6,E+10	0,29	36453	1933	18,9
485	576	6,E+10	0,27	34121	1778	19,2
515	538	5,E+10	0,25	31843	1632	19,5
545	502	5,E+10	0,23	29716	1501	19,8
575	469	4,E+10	0,21	27756	1383	20,1
605	438	4,E+10	0,19	25939	1275	20,3
635	411	4,E+10	0,18	24323	1181	20,6
665	387	3,E+10	0,17	22904	1100	20,8
695	366	3,E+10	0,16	21663	1029	21,0
725	348	3,E+10	0,15	20628	970	21,3
755	334	3,E+10	0,14	19790	922	21,5
785	323	3,E+10	0,13	19139	883	21,7
815	316	3,E+10	0,13	18680	855	21,9
845	309	3,E+10	0,13	18305	831	22,0
875	303	3,E+10	0,12	17946	808	22,2

Ruuvimäärä	22,2	23	kpl
------------	------	----	-----

LIITE 4: Malli 3 tulokset kuormitus 0,1 kN/m², kokonainen jänneväli

Malli 3

Kuormitus 0,1 kN/m²
Mallinnettu Koko jänneväli

<u>Aika</u> <u>(s)</u>	<u>Lämpö-</u> <u>jännitys</u> <u>N/mm²</u>	<u>Kimmo-</u> <u>moduuli</u> <u>(Pa)</u>	<u>Kimmo-</u> <u>duulin</u>		<u>Leikkaus-</u> <u>voima N</u>	<u>Reunapuristus-</u> <u>kestävyys N</u>	<u>Ruuvit</u>
			<u>pienennyst</u> <u>ekijä kbθ</u>				
5	0	2,E+11	1,00	10	6600	6600	0,0
35	175	2,E+11	1,00	10371	6600	6600	1,6
65	468	2,E+11	0,95	27715	6291	6291	4,4
95	697	2,E+11	0,85	41235	5619	5619	7,3
125	849	2,E+11	0,77	50233	5105	5105	9,8
155	939	1,E+11	0,71	55595	4691	4691	11,9
185	997	1,E+11	0,67	58995	4399	4399	13,4
215	1028	1,E+11	0,63	60880	4177	4177	14,6
245	1030	1,E+11	0,60	60973	3946	3946	15,5
275	989	1,E+11	0,55	58563	3626	3626	16,1
305	921	1,E+11	0,49	54530	3260	3260	16,7
335	846	9,E+10	0,44	50113	2909	2909	17,2
365	774	8,E+10	0,39	45817	2591	2591	17,7
395	709	7,E+10	0,35	41982	2319	2319	18,1
425	657	7,E+10	0,32	38878	2102	2102	18,5
455	616	6,E+10	0,29	36454	1933	1933	18,9
485	576	6,E+10	0,27	34122	1778	1778	19,2
515	538	5,E+10	0,25	31843	1632	1632	19,5
545	502	5,E+10	0,23	29715	1501	1501	19,8
575	469	4,E+10	0,21	27755	1383	1383	20,1
605	438	4,E+10	0,19	25938	1275	1275	20,3
635	411	4,E+10	0,18	24321	1181	1181	20,6
665	387	3,E+10	0,17	22901	1100	1100	20,8
695	366	3,E+10	0,16	21661	1029	1029	21,0
725	348	3,E+10	0,15	20625	970	970	21,3
755	334	3,E+10	0,14	19787	922	922	21,5
785	323	3,E+10	0,13	19136	883	883	21,7
815	315	3,E+10	0,13	18677	855	855	21,9
845	309	3,E+10	0,13	18301	831	831	22,0
875	303	3,E+10	0,12	17942	808	808	22,2
Ruuvimäärä					22,2	23	kpl