

Elina Rastas

**RAKENTEIDEN PALOTEKNINEN  
SUUNNITTELU  
TIETOKONEOHJELMISTOLLA**

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Kesäkuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Elina Rastas: Rakenteiden palotekninen suunnittelu tietokoneohjelmistolla  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma  
Kandidaatintyö  
Kesäkuu 2019

---

Talonrakennushankkeiden suunnitteluun sisältyy aina paloturvallisuussuunnittelu, jonka monesti toteuttaa rakennusten paloturvallisuuteen erikoistunut yritys. Tässä työssä kerrotaan paloturvallisuussuunnitteluun soveltuvan SAFIR-palomallinnusohjelmiston toimintaperiaatteesta ja käyttökohteista. Kyseistä ohjelmistoa voidaan käyttää sekä toiminnallisessa paloturvallisuussuunnittelussa että niin kutsutussa taulukkomitoituksessa apuvälineenä. Sitä on käytetty paljon myös tieteellisissä tutkimuksissa. Tarkoituksena on antaa tietoa ohjelmistosta päätöksenteon tueksi eli siihen, olisiko ohjelmiston hankinnalle perusteita yrityksessä, joka työn on tilannut.

Työssä on kolme osaa, joista ensimmäisessä tutustutaan ohjelmiston taustalla olevaan teoriaan sekä selvitetään sen sisältämiä oletuksia ja yksinkertaistuksia. Ensimmäinen osio on toteutettu kirjallisuustutkimuksena tieteellisten artikkelien avulla. Toisessa osassa kerrotaan käytännön esimerkkejä SAFIR-ohjelmiston käyttökohteista sekä ohjelmiston vahvuuksista ja heikkouksista. Tässä osiossa on hyödynnetty tieteellisiä artikkeleita ja lisäksi alan asiantuntijan haastattelua. Viimeisessä osassa tutustutaan ohjelmiston käyttöön tarkemmin. Siinä kerrotaan mallinnuksen kolmivaiheisuudesta sekä esimerkin avulla vaiheittain, miten mallinnus tehdään. Tieteellisten artikkelien lisäksi tässä osiossa on hyödynnetty ohjelmistoon tutustumista malliesimerkin avulla.

Tutkimuksessa selvisi, että kyseinen ohjelmisto on käytettävyydeltään hyvä juuri palotilanteiden mallintamiseen. Rakenteiden tutkimiseen normaalilämpötilassa löytyy enemmän ominaisuuksia muista FEM-ohjelmistoista. Ohjelmiston käyttöliittymä on selkeä, ja yksinkertaisten tilanteiden mallinnuksen oppii nopeasti. Mallinnus SAFIR-ohjelmistolla on suoraviivaisinta poikkileikkausluokan 1 teräsrakenteilla, vaikka ohjelmisto sisältääkin kaikki yleisimmin käytetyt rakennusmateriaalit. Jos käyttäjä haluaa mallintaa tilannetta graafisesti, SAFIR toimii yhdessä kahden muun ohjelmiston kanssa.

Avainsanat: SAFIR-ohjelmisto, FEM-ohjelmisto, rakenteellinen paloturvallisuus, toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu, terminen analyysi, mekaaninen analyysi

# ALKUSANAT

Paloturvallisuus on kiinnostanut minua ensimmäisestä aiheesta koskevasta yliopistokurssista alkaen. Halusin myös tehdä kandidaatintyöni liittyen tähän aiheeseen, ja onnekseni Sweco Rakennetekniikka Oy:n Juha Kukkosella oli tarjota minulle sopiva aihe.

Työn tekeminen alkoi tammikuussa 2019 ja kesti noin puoli vuotta. Tässä ajassa työn tarkka sisältö vaihtui muutamia kertoja. Alusta alkaen sisältöä lähdettiin miettimään niin, että työ pysyisi kandidaatintyön laajuudessa, ja olen lopputulokseen varsin tyytyväinen.

Haluan kiittää Juha Kukosta mielenkiintoisen aiheen antamisesta sekä kirjoitusprosessin tukemisesta. Suuri kiitos myös professori Mikko Malaskalle, joka auttoi ja motivoi neuvoillaan prosessin loppuun asti. Haastattelusta kiitos kuuluu Mikko Salmiselle, jonka asiantuntijuudesta oli suuri hyöty työtä tehdessä. Ei pidä myöskään unohtaa korvaamatonta tukea, jota sain opiskelukavereiltani.

Kandidaatintyön kirjoittaminen oli monella tapaa opettavaista. Siinä huomasi, millaiset työskentelytavat toimivat hyvin juuri minulle ja millaista itsekuria tekstin työstäminen välillä vaatii. Työn tekeminen ei siis ollut vain uuden asian tutkimista ja aiheeseen syventymistä vaan myös omien toimintatapojen tunnistamista ja huonojen sellaisten muuttamista.

Tampereella, 3.6.2019

Elina Rastas

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. RAKENTEEN LÄMPÖTILAN JA TOIMINNAN ANALYYSI PALOTILANTEESSA ..	3
2.1 SAFIR-ohjelmisto .....	3
2.2 Terminen analyysi .....	4
2.3 Mekaaninen analyysi .....	5
2.4 Materiaalimallit .....	6
3. OHJELMISTON KÄYTTÖSOVELLUTUKSET .....	7
3.1 Käyttösovellutuksia .....	7
3.2 SAFIR-mallinnuksen vahvuudet ja heikkoudet .....	10
4. OHJELMISTON TOIMINTA KÄYTÄNNÖSSÄ .....	12
4.1 Analyysin kulku ja toimintaperiaate .....	12
4.2 Esimerkki: HEB200-profiili .....	12
4.2.1 Projektin luominen .....	13
4.2.2 Geometrian luominen xy-tasoon .....	14
4.2.3 Lämpötilakäyrän valinta .....	17
4.2.4 Materiaalin määrittäminen .....	19
4.2.5 Poikkileikkauksen verkotus ja yleiset tiedot .....	21
4.2.6 Laskenta .....	23
5. YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	26

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$q$	lämpövirran tiheys
$\lambda$	aineen lämmönjohtavuus
$\Delta T$	lämpötilagradientti

# 1. JOHDANTO

Rakennusten paloturvallisuutta Suomessa säätelee Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta (848/2017). Asetusta voidaan soveltaa uudisrakennuskohteeseen sekä rakennuksen muutos- ja korjaustyöhön. Kaikkien kohteiden on täytettävä paloturvallisuudelle asetetut olennaiset tekniset vaatimukset rakennuksen käyttökohteen mukaisesti. Olennaiset tekniset vaatimukset täyttyvät, jos rakennus suunnitellaan noudattaen niin sanottua taulukkomitoitusta eli asetuksessa määriteltyjä luokkia ja lukuarvoja. Toinen vaihtoehto on toteuttaa kohteen paloturvallisuussuunnittelu toiminnallisesti eli oletettuun palonkehitykseen perustuen. Tällöin vaatimusten täytyminen on osoitettava tapauskohtaisesti tarkoitukseen sopivilla menetelmillä. (YMa 848/2017, s. 3)

Olennaiset tekniset vaatimukset määrittelevät paloturvallisuussuunnittelun osa-alueet, joita ovat kantavien rakenteiden palomitoitus, palon ja savun kehittymisen sekä leviämisen rajoittaminen rakennuksessa, palon leviämisen estäminen naapurirakennuksiin, poistumisturvallisuus sekä pelastushenkilöstön työturvallisuus palotilanteessa. (YMa 848/2017) Kaikki eri osa-alueet tulee ottaa huomioon sekä taulukkomitoituksessa että toiminnallisessa suunnittelussa.

Toiminnallisessa paloturvallisuussuunnittelussa suunniteltava kohde voidaan mallintaa ja sille voidaan tehdä palosimulointi. Simuloinnin avulla pystytään tarkastelemaan rakennuksen paloturvallisuutta erilaisissa palotilanteissa edellä mainittujen osa-alueiden kannalta. Tässä kandidaatintyössä käsitellään toiminnalliseen paloturvallisuussuunnitteluun soveltuvaa SAFIR-palomallinnusohjelmistoa vain rakenteiden palomitoituksen osalta.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten ohjelmisto toimii ja minkälaisiin paloteknisiin suunnittelutehtäviin se soveltuu. Ohjelmiston toiminta perustuu sen taustalla olevaan teoriaan ja teorian sisältämiin oletuksiin, joita tässä työssä tutkitaan. Tutkimusmenetelminä työssä käytetään kirjallisuusselvitystä, haastattelua sekä käytännön perehtymistä ohjelmiston toimintaan. Lähdeaineistot ovat pääsääntöisesti tieteellisiä artikkeleita.

Työn alussa perehdytään SAFIR-ohjelmiston taustalla olevaan teoriaan siltä osin kuin se on tarpeellista ja selvitetään, miten teoriapohja vaikuttaa ohjelmiston toimintaan. Teoriaosuuden jälkeen kerrotaan esimerkkejä SAFIR-ohjelmiston käyttökohteista.

Lopuksi työssä on tehty esimerkkimallinnus, jossa perehdytään ohjelmiston käyttöliittymään ja yksinkertaisen poikkileikkauksen mallinnukseen.

Tutkimus on rajattu käsittelemään SAFIR-ohjelmiston käyttöä rakenteellisen paloturvallisuuden osa-alueelle ja rakenteiden palomitoituksessa. Muita suunnittelun osa-alueita ei tässä työssä tarkastella. Lisäksi työssä keskitytään vain teräsrakenteiden mallintamiseen. Työssä ei käsitellä ohjelmiston taustalla olevaa teoriaa yksityiskohtaisesti vaan kerrotaan ohjelmiston toimintaa ohjaava teoria pääpiirteiltään.

## 2. RAKENTEEN LÄMPÖTILAN JA TOIMINNAN ANALYYSI PALOTILANTEESSA

### 2.1 SAFIR-ohjelmisto

SAFIR-ohjelmisto on kehitetty sekä tutkijoiden että insinöörien käyttöön rakenteiden käyttäytymisen analysoimiseksi palotilanteessa. Ohjelmiston toiminta perustuu elementtimenetelmään, ja sen käytössä voidaan ottaa huomioon rakenteen lämpölaajeneminen, sen geometrian sekä materiaalin epälineaarisuus ja lujuuden sekä jäykkyyden heikkeneminen korkeassa lämpötilassa. (Franssen & Gernay 2017, s. 300–301)

Rakenteen tutkiminen palotilanteessa vaatii sekä rakenteessa ja sen ympärillä vallitsevien lämpötilojen määrittelyä että rakenteen jännitysten, kuormien ja siirtymien arviointia. Näitä kahta vaihetta nimitetään rakenteen termiseksi ja mekaaniseksi analyysiksi.

Terminen analyysi, eli lämpötilojen arviointi rakenteen eri osissa, kestää koko simuloidun palotilanteen ajan. Palotilan lämpötilan määrittämiseksi ohjelmistosta löytyy valmiina tyypillisiä lämpötilan nousua ajan funktiona kuvaavia malleja, joista käyttäjä voi valita suunniteltavaan kohteeseen soveltuvan mallin. Hän voi myös itse määrittellä lähtötiedot lämpötilan kehitykselle.

Rakenteen mekaaninen käyttäytyminen selvitetään vasta termisen analyysin jälkeen. Tämä johtuu siitä, että lämpötila vaikuttaa huomattavasti rakenteen mekaaniseen käyttäytymiseen, mutta mekaanisen analyysin tulokset taas vaikuttavat lämpötilajakaumaan rakenteessa ja sen ympärillä vain harvoissa tapauksissa. (Franssen & Gernay 2017, s. 301–302)

SARIF-ohjelmiston koodissa, eli sen toiminnan taustalla, ei ole määritelty ehtoja simuloinnin loppumiselle. Simulointi siis jatkuu niin kauan, kunnes käyttäjän määrittelemä aika on kulunut, ohjelmisto ei enää pysty saavuttamaan tasapainoa rakenteelle tai se ei pysty käsittelemään rakenteen materiaalia niin kuin sen pitäisi. Näin ollen käyttäjän vastuulla on tulkita, mistä simuloinnin loppuminen on johtunut. Käyttäjä voi kuitenkin määrittellä esimerkiksi palkkia tutkittaessa taipumarajan, jonka avulla pystytään havaitsemaan rakenteen plastinen käyttäytyminen ja jonka ylittyessä simulaatio päättyy. Tyypillinen tilanne, joka johtaa simulaation loppumiseen, voisi olla

palkin siirtyminen vaakasuunnassa niin, että todellisuudessa se menettäisi tuentansa. (Franssen & Gernay 2017, s. 302)

## 2.2 Terminen analyysi

Termisessä analyysissä kappaleessa johtumalla tapahtuvan lämmön siirtymisen oletetaan noudattavan Fourierin lakia:

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (1)$$

jossa lämpövirran tiheys  $q$  on riippuvainen aineen lämmönjohtavuudesta  $\lambda$  ja lämpötilagradientista kappaleessa  $\nabla T$  (RIL 255-2010, Vinha 2010, s. 2 mukaan).

SAFIR-ohjelmisto ratkaisee lämmön siirtymisen elementtimenetelmän keinoin, missä on oletettu materiaalit isotrooppisiksi, liikkumattomiksi ja kokoonpuristumattomiksi. Lisäksi on oletettu, että kappaleiden mekaaninen energia ei muutu lämmöksi ja että vierekkäisten materiaalien rajapinnassa ei ole lämmönvastusta. (Franssen 2005, s. 146; Franssen & Gernay 2017, s. 304)

Analyysissä rakenteen geometriaa mallinnetaan lineaarisilla isoparametrisilla elementeillä, joiden solmujen koordinaatit tiedetään. Lämmön siirtymistä kappaleessa voidaan arvioida näiden solmujen lämpötilojen perusteella. (Franssen 2005, s. 146)

Lämpövirta rakenteessa saadaan laskettua yhdistämällä yksittäisten elementtien vaikutus lämpötilan siirtymiseen. Tämä tapahtuu matriisilaskennalla, jolla saadaan lämpövirran tasapainotila ratkaistua jollakin ajanhetkellä. Laskennassa on tiedettävä materiaalista riippuvat matriisit lämmönjohtavuudelle sekä lämpökapasiteetille, lämpötilavektori elementtien solmujen lämpötiloista ja vektori, joka kuvaa lämpötilavaihteluita rajapinnoilla. (Franssen & Gernay 2017, s. 304) Laskennan suorittaminen vaatii korkeamman tason matematiikkaa, johon ei tässä yhteydessä perehdytä.

Käyttäjän tulee määrittää lähtötietona ohjelmistolle palotilanne, jolle rakenne tulee altistumaan. Jotta voitaisiin tarkastella rakenteen käyttäytymistä palossa, käyttäjän pitää määrittää termiselle analyysille myös jotkin reunaehdot, mikä tarkoittaa lämmönsiirtymisen tai rakenteen lämmönkehityksen määrittelyä. Jos erityisiä reunaehtoja ei määritetä, ohjelmisto olettaa tietyt reunaehdot analyysille. (Franssen & Gernay 2017, s. 306)

Käyttäjällä on neljä eri mahdollisuutta valita analyysin reunaehdot. Ensimmäinen niistä on kuvata lämpötilan kehitystä ajan funktiona elementtien eri solmuissa. Tämä tapa

soveltuu lähinnä osoittamaan, että rakenne käyttäytyy niin kuin sen on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu (Pintea & Franssen 1997, Franssen 2005, s. 147 mukaan). Tällaisia reunaehtoja voidaan käyttää myös, jos analyysissä halutaan painottaa rakenteen mekaanista käyttäytymistä palotilanteessa. Tällöin lämpötilat rakenteen eri osissa on voitu määrittää esimerkiksi polttokokeella. (Franssen & Gernay 2017, s. 306)

Toisena käyttäjä voi kuvata rakennetta ympäröivän kuumen kaasun lämpötilakehitystä aika-lämpötilariippuvuutena. Standardipalokäyrät on määritelty valmiiksi SAFIR:ssa, mutta käyttäjällä on mahdollisuus tehdä myös oma riippuvuuskuvaaja. Lämmön siirtyminen rakenteeseen lasketaan tässä tapauksessa Eurokoodin (SFS-EN 1991-1-2) mukaisesti kaavalla, jossa kuljettumalla ja säteilemällä siirtyvä lämpö lasketaan yhteen. (Franssen & Gernay 2017, s. 307) Lisätietoa laskennasta löytyy kyseisestä Eurokoodista.

Kolmas tapa on kuvata lämmön siirtymistä rajapinnalla ajan funktiona (Franssen & Gernay 2017, s. 307). Erona ensimmäiseen vaihtoehtoon on se, että ensimmäisessä tarkastellaan suoraan elementtien solmujen lämpötiloja, kun taas tässä vaihtoehdossa tarkastellaan lämmön siirtymistä rakenteen rajapinnalla.

Neljäs vaihtoehto on määrittää yhdestä tai useammasta paikallisesta palosta johtuva lämmön siirtyminen rakenteelle. SAFIR:ssa on valmiita malleja paikalliselle palolla ja siitä syntyvälle ja ympäristöön siirtyvälle lämmölle. (Franssen & Gernay 2017, s. 307) Lisätietoa reunaehtoien määrittelystä löytyy ohjelmiston kehittäjien artikkelista ”Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities” (Franssen & Gernay 2017).

## **2.3 Mekaaninen analyysi**

Mekaaninen analyysi pohjautuu virtuaalisen työn periaatteeseen (Franssen 2005, s. 148-149), johon liittyy ohjelmiston kannalta neljä perusyhtälöä tai -teoriaa. Yksi niistä on kvasistaattisten kuormien ratkaisemiseen käytettävä menetelmä eli quasi-static solution. Menetelmässä rakenteen mekaanista käyttäytymistä voidaan tarkastella rakenteen jäykkyysohjelmistoon, lisäsolmuvoimien sekä solmujen siirtymien avulla. Useimmissa tapauksissa rakenteet kuormat pysyvät muuttumattomina koko palotilanteen ajan, mutta SAFIR mahdollistaa myös kuormien muuttumisen ajan suhteen esimerkiksi, kun palokuorma vähenee palon edetessä. (Franssen & Gernay 2017, s. 309–310)

Kvasistaattisessa menetelmässä käytetään aika-integraaleihin perustuvaa laskentaa, jossa tarkastellaan jännityksen aiheuttamaa venymää ajan ja lämpötilan funktiona. Kun rakenne ei ole staattisesti vakaa, täytyy menetelmässä huomioida dynaamiset kuormat

ja niistä aiheutuva kiihtyvyys rakenteessa. Tässä tapauksessa käyttäjän määrittelemä simulaation kesto on tärkeä osa sen onnistumista, kun taas staattisessa tapauksessa vain lämpötilan kasvu on merkityksellistä. (Franssen & Gernay 2017, s. 312)

Mekaanisessa analyysissä käyttäjällä on valittavissa kuusi erilaista elementtityyppiä, joilla kaikilla voidaan mallintaa erilaisia tilanteita ja joista jokainen sopii johonkin tiettyyn tarkoitukseen. Lisätietoa näistä elementtityypeistä ja niiden käyttökohteista löytyy ohjelmiston kehittäjien artikkelista ”Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities” (Franssen & Gernay 2017).

## 2.4 Materiaalimallit

SAFIR sisältää kaikki yleisimmin käytetyt rakennusmateriaalit, kuten betoni, teräs ja puu. Useimpia näistä materiaalimalleista voidaan käyttää sekä termisessä että mekaanisessa analyysissä. (Franssen & Gernay 2017, s. 317) Taulukossa 1 on esitetty materiaalimallien käyttökohteet analyysin ja elementtityypin mukaan.

**Taulukko 1.** SAFIR-ohjelmiston sisältämät materiaalimallit  
(Franssen & Gernay 2017, s. 317)

Analyysi	Terminen	Mekaaninen			
		2D-3D Solid	Spring	Beam/Truss	Shell
Elementtityppi					
Materiaalimalli					
Teräs	X		X	X	X
Betoni	X		X	X	X
Puu	X		X		
Korkealujuusbetoni (HSC)	X		X		
Ruostumaton teräs	X		X		
Alumiini	X		X		
Elastinen			X		
Plastinen		X			
Kipsi	X				
Eristysmateriaali	X				
Käyttäjän määrittelemä	X				

Materiaalien termisistä ja rakenteellisista ominaisuuksista sekä laeista, joita mallit noudattavat, löytyy lisätietoa artikkelista ”Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities” (Franssen & Gernay 2017).

## 3. OHJELMISTON KÄYTTÖSOVELLUTUKSET

### 3.1 Käyttösovellutuksia

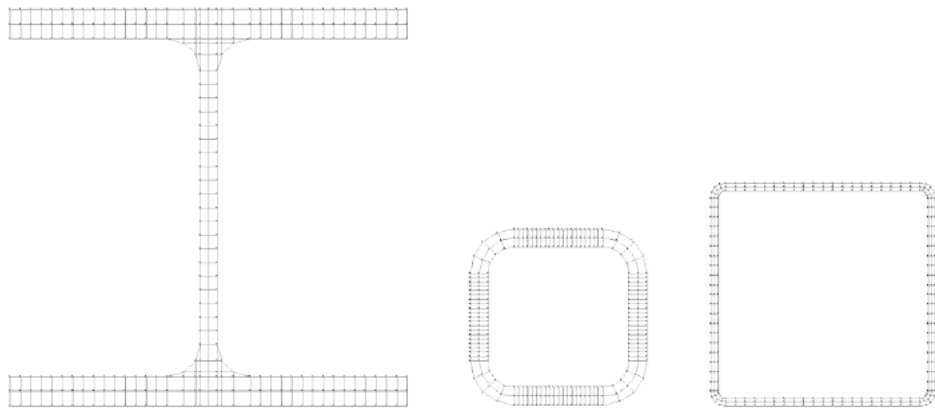
Koska SAFIR:ssa on mahdollista käyttää kaikkia yleisimpiä rakennusmateriaaleja (Franssen & Gernay 2017, s. 317), on ohjelmistoa käytetty monenlaisissa tutkimuksissa hyvin erilaisille rakenteille. Palolle altistuvien rakenteiden tutkimisen lisäksi ohjelmistolla on tehty myös pelkkiä rakenneanalyyssejä. Artikkeleita, joissa SAFIR on mainittu, löytyy muun muassa Structures in Fire (Ali et al. 2018) konferenssijulkaisusta. Seuraavaksi on esitelty kolme esimerkkilannetta, joissa SAFIR:a on käytetty joko osana tutkimusta tai rakennushankkeen suunnittelua.

Ensimmäisenä esimerkkinä on tutkimus, jossa Couto et al. (2013) ovat selvittäneet jäykistettyjen ja jäykistämättömien teräskehien nurjahdusta palotilanteessa. Tutkimus pohjautuu Eurokoodissa (SFS-EN 1993-1-2) esitettyyn jäykistetyissä kehissä olevien pilareiden mitoittamiseen palotilanteessa, ja tutkimuksessa saatuja tuloksia on verrattu Eurokoodin suositusarvoihin. Eurokoodi (SFS-EN 1993-1-2) ei kuitenkaan anna ohjeita jäykistämättömissä kehissä olevien pilareiden nurjahduspituuden määrittämiseen, joten siihen on tutkimuksessa etsitty ratkaisuja. (Couto et al. 2013, s. 541)

Tutkimuksessa SAFIR:lla selvitettiin kehien palonkestoa tietyssä palotilanteessa, toisin sanoen siinä selvitettiin kehien kriittisiä kuormia. Kehien termisessä analyysissä käytettiin ISO 834-palokäyrän mukaista lämpötilankehitystä, ja tämän jälkeen mekaanisessa analyysissä seurattiin rakenteen käyttäytymistä tasapainon menettämiseen asti. Kehää mallinnettiin 2D Beam-elementeillä. Teräsrakenteiden suunnittelussa tärkeä epätarkkuus otettiin huomioon heti rakenteen geometriaa mallinnettaessa sen sijaan, että olisi lisätty pilarien päähän lisävaakavoima. SAFIR:lla saatuja tuloksia verrattiin yksinkertaisemmalla menetelmällä saatuihin tuloksiin: kehän mekaanisen lujuuden määrittäminen palotilanteessa Elefir-En-ohjelmistolla (Vila Real & Franssen 2010) ja Eurokoodin (SFS-EN 1993-1-2) mukainen laskenta. (Couto et al. 2013, s. 551, 556)

Toisen esimerkin tutkimuksessa on esitetty uusi laskentatapa herkästi stabiilisuutensa menettävän teräsrakenteen korkeimmalle lämpötilalle, jonka se kestää vaurioitumatta. Tätä lämpötilaa kutsutaan teräsosan kriittiseksi lämpötilaksi. Uusi laskentatapa perustuu Eurokoodin (SFS-EN 1993-1-2) esittämään menetelmään ja sen pätevyys on todistettu edellä mainitun Eurokoodin (SFS-EN 1993-1-2) laskentatavan sekä SAFIR:lla tehtyjen tarkastelujen avulla. (Baczkiwicz et al. 2018, s. 725)

SAFIR:lla mallinnettu tilanne oli kuormitettu pilari, johon vaikutti tasaisesti jakautunut nouseva lämpötila. Rakenteiden epäkeskisyydet oli huomioitu Eurokoodien esittämällä tavalla (SFS-EN 1993-1-2 & SFS-EN 1993-1-1), ja pilarin mallinnukseen oli käytetty Beam-elementtejä. Lisäksi tutkittiin kolmea mahdollista pilarin profiilia: paksuseinämainen neliöputki-profiili 100x10, ohutseinämäinen neliöputki-profiili 120x4 ja HEB220-profiili. Kaikkien profiilien teräs oli lujuusluokkaa S355. (Baczkiwicz et al. 2018, s. 729–730) Kuvassa 1 on esitetty SAFIR:lla mallinnetut profiilit ja niiden verkotus ohjelmistossa.



**Kuva 1.** Tutkimuksessa käytetyt profiilit: HEB220, SHS100x10 ja SHS120x4 (Baczkiwicz et al. 2018, s. 730)

Kolmannessa esimerkissä tarkastelussa on silta, jolle tehdään harvoin paloturvallisuusanalyseja. Geneveen rakennettu 85 m pitkä silta maantieliikenteelle on arkkitehtuuriltaan poikkeuksellinen, joten esimerkiksi autopalon vaikutus sillan kannella oli oleellista tutkia. Sillan katerakenne on holvimainen ja sen materiaalina on teräs. Sillan kansi on esijännitetty teräs–betoni-liittorakenne. Paloturvallisuusanalyysi oli tärkeää tehdä juurikin sillan tunnelimaisuuden vuoksi. (Desanghere et al. 2012, s. 815) Kuvassa 2 on esitetty silta ja sen rakenne.

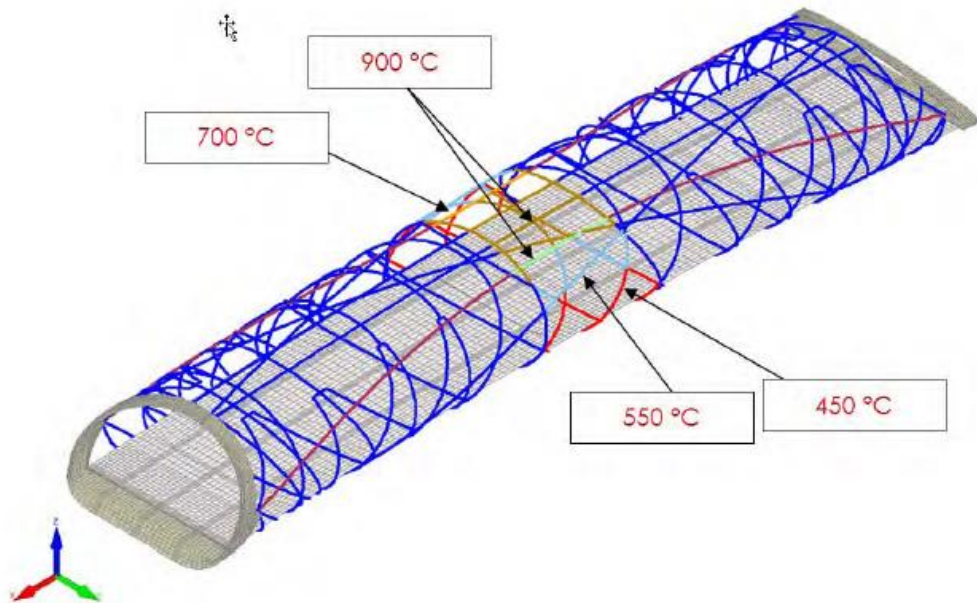


**Kuva 2.** Hans-Wilsdorf-silta Genevessä (GlobalVision Communication 2015)

Tapauksessa tutkittiin rakenteen käyttäytymistä kolmella eri palokäyrällä: ISO-palokäyrä eli standardipalo, hiilivety-palokäyrä eli hiilivety-palo (Tapaninen 2016, s. 14) sekä muokattu ISO-palokäyrä, jossa lämpötila alkaa laskea 30 minuutin palonkeston jälkeen. Näillä palokäyrillä tutkittiin katteen kaaren poikkileikkauksen lämpötilankehitystä. (Desanghere et al. 2012, s. 817)

Jotta koko rakennetta pystyttiin tutkimaan, määritettiin paikallisesta palosta johtuvia lämpötiloja numeerisen virtausdynamiikan avulla (CFD-mallinnus 2019) Fire Dynamic Simulation-ohjelmistolla. Paikallisina paloina tutkimuksessa käytettiin henkilöauton sekä kuorma-auton paloa. FDS-ohjelmistolla saadusta datasta määritettiin kutakin palotilannetta vastaava palokäyrä, joka syötettiin SAFIR-ohjelmistoon lähtötietona. (Desanghere et al. 2012, s. 818–819)

Silta mallinnettiin SAFIR:lla 3D-mallina, jossa käytettiin Beam-elementtejä kaarille ja Shell-elementtejä sillan kannelle. Tutkimuksessa tehtiin ensin 3D-mallin rakenneanalyysi, jotta saatiin varmistettua, että rakenne toimii normaalitilanteessa niin kuin sen pitääkin. Tämän jälkeen voitiin tutkia sillan käyttäytymistä aina sen romahtamiseen asti halutuissa palotilanteissa. (Desanghere et al. 2012, s. 820-821) Kuvassa 3 on esitetty sillasta tehty malli, ohjelmistolla tutkittu alue ja kaarien lämpötiloja.



*Kuva 3. Sillasta tehty malli ja tutkittu alue sillan katerakenteessa (Desanghere et al. 2012, s. 820)*

Tutkimuksessa selvisi, että silta pysyy turvallisena tutkituissa palotilanteissa. (Desanghere et al. 2012, s. 822) Se osoittaa myös, kuinka monimutkaisiakin rakenteita SAFIR-ohjelmistolla voidaan tutkia.

### 3.2 SAFIR-mallinnuksen vahvuudet ja heikkoudet

SAFIR eroaa muista FEM-ohjelmistoista, kuten ANSYS, muun muassa siten, että se on kehitetty erityisesti palotilanteiden tarkasteluun. Tämän vuoksi rakenteiden tutkiminen palotilanteessa voi olla SAFIR:lla helpompaa ja yksinkertaisempaa kuin muilla ohjelmistoilla. SAFIR on kuitenkin ”kotikutoinen” ohjelmisto, jota ylläpitää vain muutama ihminen. Toisaalta se ei myöskään ole yhtä hintava kuin muut FEM-ohjelmistot. (Salminen, haastattelu 2.4.2019)

Aina ennen palotilanteen tutkimista on suositeltavaa tehdä rakenneanalyysi ja varmistaa, että rakennemalli toimii normaalilämpötilassa. Tämä onnistuu myös SAFIR-ohjelmistolla. Muista FEM-ohjelmistoista voi kuitenkin löytyä enemmän ominaisuuksia rakenteiden ja niiden poikkileikkausten, esimerkiksi rakenteiden välisten kontaktien, tarkasteluun normaalilämpötilassa. Myös rakenteen nurjahdus- ja lommahdusanalyysi on tarvittaessa tehtävä toisella ohjelmistolla. (Salminen, haastattelu 2.4.2019)

Eroavaisuuksia muihin FEM-ohjelmistoihin on myös eri kuormitustilanteiden tarkastelussa. SAFIR-ohjelmistolla voidaan käsitellä yhtä kuormitustilannetta kerrallaan, kun taas jollakin toisella FEM-ohjelmistolla voi kaikki kuormitustilanteet syöttää yhdellä kertaa ohjelmistolle ja vaihdella niiden välillä tarpeen mukaan. Palotilanteiden kannalta

merkittäviä kuormitusyhdistelyjä on useimmiten kaksi tai kolme, ja aina yhdistelmän vaihtuessa mallinnus pitää SAFIR-ohjelmistolla aloittaa alusta. (Salminen, haastattelu 2.4.2019)

SAFIR-ohjelmiston käyttö on tehty helpoksi juurikin palotilanteiden tarkastelussa. Yksinkertaisilla rakenteilla mallinnusprosessi on suoraviivainen ja sen opetteluun ei mene kauaa aikaa. Suoraviivaisuuteen vaikuttaa myös mallinnettavan rakenteen materiaali. Teräsrakenteiden mallinnus on yksinkertaista, kun taas puurakenteiden materiaalimalleissa voi olla mietittävää. Tämä johtuu osittain siitä, että puulle ei löydy mallinnuksen kannalta kaikkea tarpeellista tietoa standardeista. Muita ohjelmistosta riippumattomia ongelmia voi olla esimerkiksi palon sijoittelussa tai ohjelmiston asennuksessa. (Salminen, haastattelu 2.4.2019)

Materiaalimallien lisäksi ongelmia voi tulla esimerkiksi teräskehien profiilien mallintamisessa, sillä ohjelmistossa ei selkeästi näe, miten päin profiili on kehässä. Teräsrakenteita mallinnettaessa on kiinnitettävä huomiota myös rakenteen poikkileikkausluokkaan, sillä ohjelmisto toimii täydellisesti vain poikkileikkausluokan 1 rakenteilla. Tämän vuoksi tulosten kriittinen tarkastelu on tärkeä. Ohjelmisto myös olettaa kaikki liitokset jäykiksi, ja liitostyyppin vaihtaminen nivelelliseksi voi olla työlästä. Liitostyyppin vaihtaminen onnistunee helpommin muokkaamalla tekstitiedostoa GiD-mallin sijaan. Mikäli ohjelmisto havaitsee ongelmia mallissa, virheilmoitus voi olla vaikeaselkoinen, mikä taas vaikeuttaa käyttäjän työtä ongelman korjaamisessa. (Salminen, haastattelu 2.4.2019)

Monien kohteiden suunnittelussa käytetään sekä niin sanottua taulukkomitoitusta että toiminnallista suunnittelua. Vaikka kohde suunniteltaisiin pääosin taulukkomitoituksella, voi olla hyödyllistä laskea esimerkiksi rakenteiden lämpötiloja SAFIR:lla. Esimerkiksi kaikkia laskentakaavoja ei löydy standardista, jolloin SAFIR:lla tehdyillä laskelmilla voidaan täydentää taulukkomitoitusta. (Salminen, haastattelu 2.4.2019)

## 4. OHJELMISTON TOIMINTA KÄYTÄNNÖSSÄ

### 4.1 Analyysin kulku ja toimintaperiaate

Rakenteen käyttäytymisen tarkastelu palotilanteessa SAFIR-ohjelmiston avulla sisältää kolme vaihetta. Ensimmäisenä rakenne täytyy mallintaa GiD-ohjelman avulla. GiD on eräänlainen graafinen esikäsittelyohjelma (Coll et al. 2016, Franssen & Gernay 2017, s. 302 mukaan), jolla tarkasteltavan rakenteen geometria voidaan mallintaa joko 2D- tai 3D-mallina riippuen siitä, mitä käyttäjä haluaa simuloida. Halutessaan käyttäjä voi mallintaa lähtötilanteen myös muokkaamalla ohjelmiston käyttämää tekstitiedostoa graafisen mallin sijaan (Coll et al. 2016, Franssen & Gernay 2017, s. 302 mukaan). Tilanteen mallintamiseen GiD:llä palataan luvussa 4.2.

GiD-mallintamisen jälkeen SAFIR suorittaa rakenteen laskennan. SAFIR:in toiminta ei siis näy käyttäjälle, sillä SAFIR on tietokoneessa olevaa koodia (Franssen & Gernay 2017, s. 302) eikä graafinen käyttöliittymä toisin kuin GiD. Kun käyttäjä haluaa suorittaa laskennan, hän valitsee GiD-ohjelmassa Calculate, minkä jälkeen tietokone osaa itsenäisesti hakea SAFIR-koodin kiintolevyiltä ja suorittaa laskennan.

Laskennan tulokset saadaan kahdessa eri tiedostomuodossa: tekstitiedostona ja XML-tiedostona. XML-tiedosto voidaan avata DIAMOND-jälkikäsittelyohjelmalla, joka esittää laskennan tulokset GiD:ssä tehdyn mallin avulla. (Franssen & Gernay 2017, s. 302) DIAMOND-ohjelmalla pystytään siis graafisesti mallintamaan rakenteen käyttäytyminen palotilanteessa eli esimerkiksi, miten palkki taipuu lämmitessään tai miten sen profiili lämpenee tietyssä palotilanteessa.

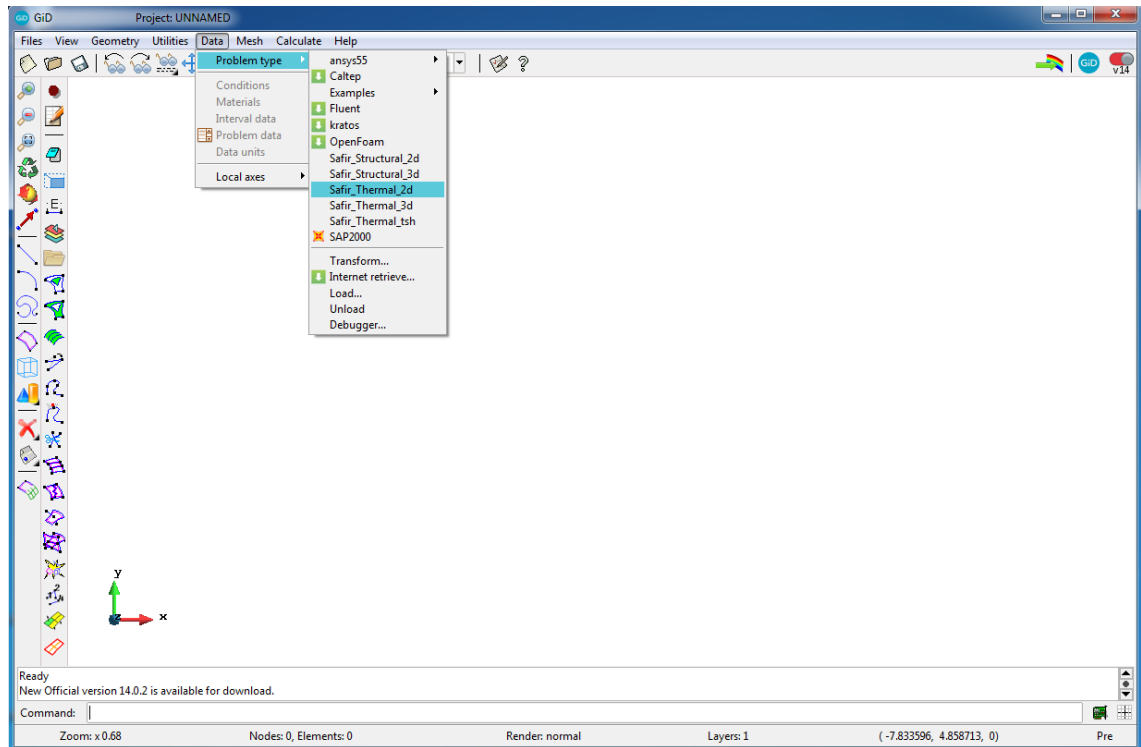
Kolmivaiheisessa mallinnusprosessissa on huomioitavaa, että GiD ja DIAMOND ovat täysin erillään SAFIR:sta kehitettäviä ohjelmistoja. Nämä kaikki on kuitenkin tehty niin, että tällainen mallinnus olisi käyttäjälle mahdollisimman helppoa ja ohjelmistot toimisivat hyvin yhdessä.

### 4.2 Esimerkki: HEB200-profiili

Tässä esimerkissä tarkastellaan standardipalolle altistuvan HEB200-profiilin termistä analyysiä 2D:ssä. Seuraavassa on esitetty kyseisen poikkileikkausprofiilin mallinnus vaiheittain.

## 4.2.1 Projektin luominen

Tilanteen mallinnus aloitetaan GiD-ohjelmalla, ja ensimmäisenä on luotava uusi projekti. GiD:n käyttöliittymässä se onnistuu valitsemalla Data-alasvetovalikosta Problem typeksi tässä tapauksessa Safir\_Thermal\_2d. Kuvassa 4 on esitetty GiD-käyttöliittymä ja projektin luominen. (Gallois 2011, s. 2)

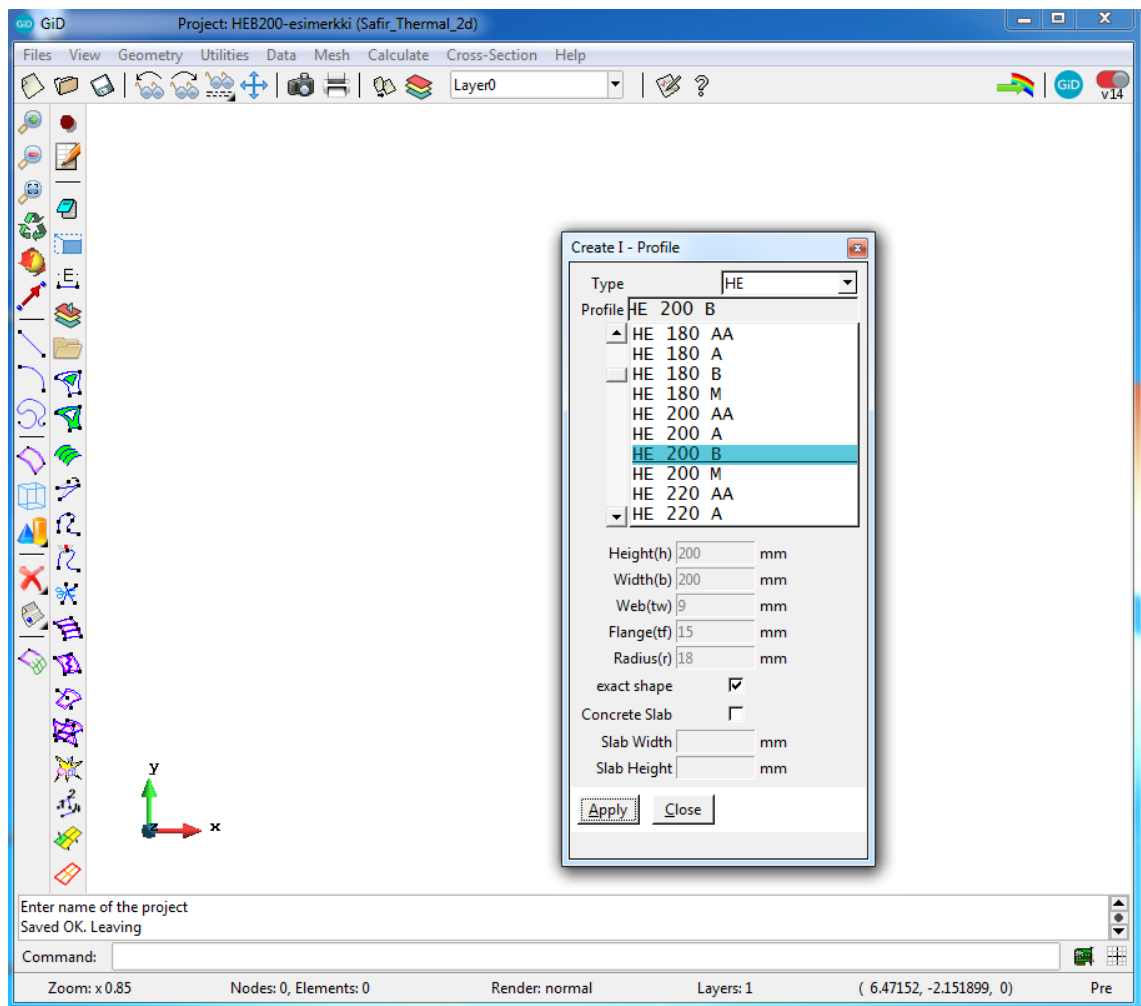


*Kuva 4. Projektin luominen GiD:ssä*

Projektin luomisen jälkeen se on hyvä tallentaa esimerkiksi nimellä "HEB200-esimerkki". Tallennettaessa GiD luo kansion, joka tässä tapauksessa olisi muoto HEB200-esimerkki.gid. Myöhemmin samaan kansioon tallennetaan myös muut SAFIR:n käyttämät tiedostot, jotka ovat muotoa .in, .out ja .tem. (Gallois 2011, s. 2)

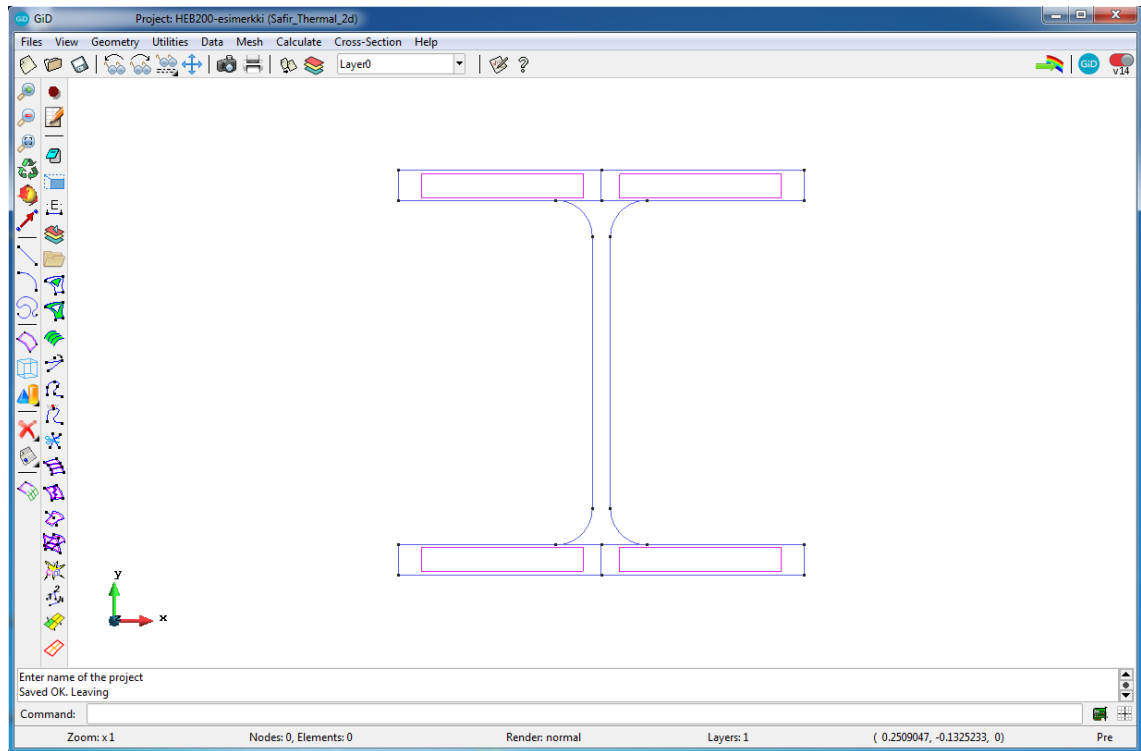
## 4.2.2 Geometrian luominen xy-tasoon

Seuraavaksi luodaan profiilin geometria xy-tasossa. Tämä saadaan tehtyä valitsemalla käyttöliittymän yläosasta Cross-Section ja sieltä edelleen I-Profile. Käyttöliittymässä aukeaa uusi ikkuna, jossa voidaan määrittää tarkemmin profiilin tiedot. Tässä tapauksessa valitaan Type-kohtaan HE, Profile-kohtaan HE 200 B ja exact shape-kohta aktiiviseksi. Kuvassa 5 on esitetty profiilin luominen. (Gallois 2011, s. 3)



**Kuva 5.** Profiilin määrittäminen GiD:ssä

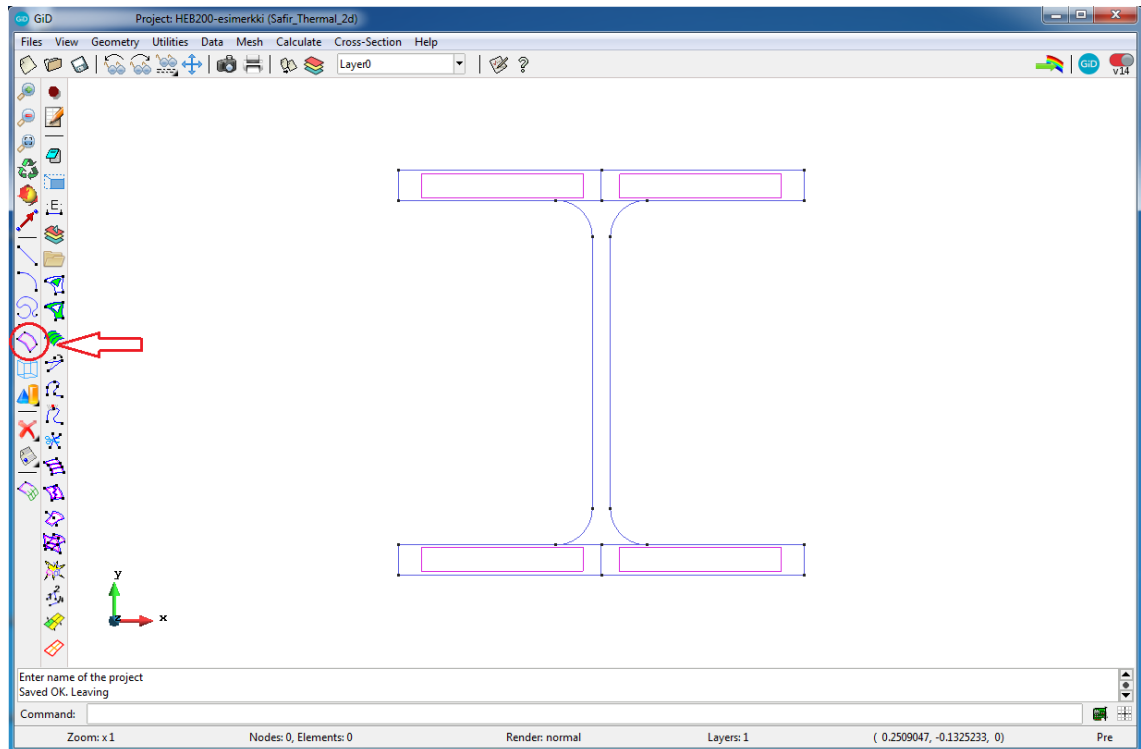
Kun profiili on saatu määritellyksi, painetaan Apply, jolloin GiD luo profiilin ja asemoi sen keskikohdan xy-tason origoon kuvan 6 mukaisesti. (Gallois 2011, s. 3)



**Kuva 6.** Näkymä profiilin luomisen jälkeen

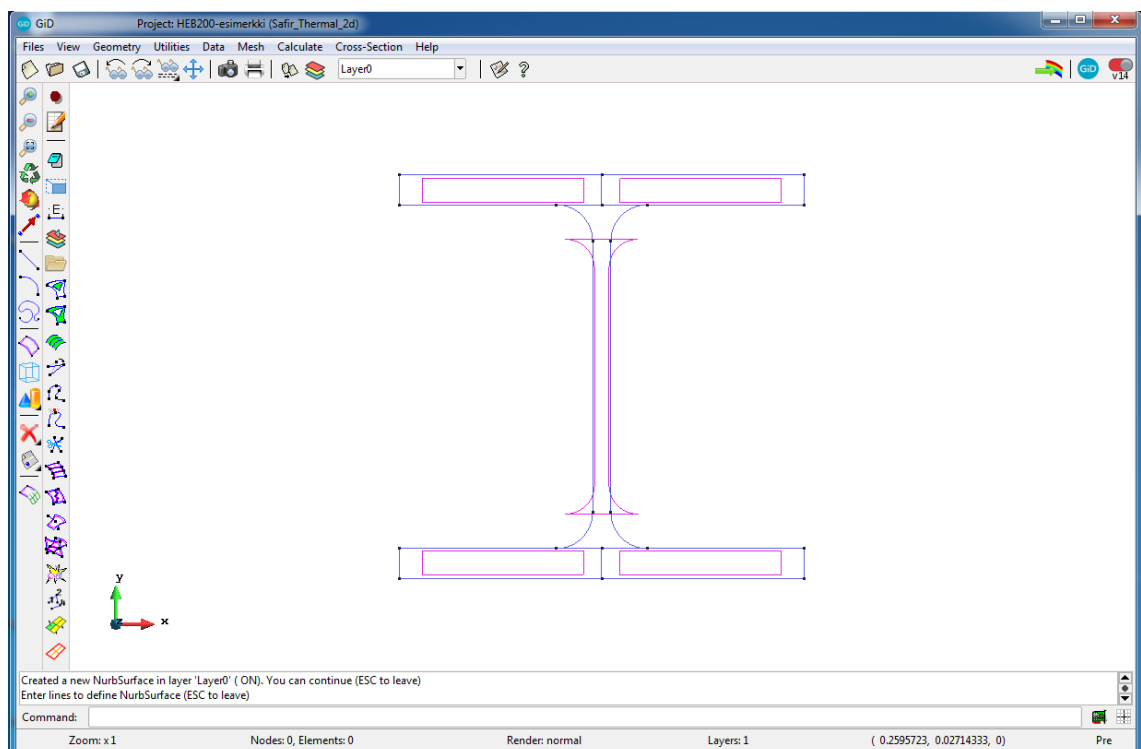
Kuvassa 6 näkyy laippojen reunojen sisällä suorakulmiot, mikä tarkoittaa, että ohjelmisto mallintaa laipat automaattisesti pintoina. Uumalle sen sijaan on oletuksena määritetty vain reunaviivat, joten se pitää muuttaa pinnaksi materiaalin määrittystä varten. Materiaalin määrittäykseen palataan kohdassa 4.2.4.

Uuma voidaan muuttaa pinnaksi painamalla kuvassa 7 merkittyä painiketta. Tämän jälkeen valitaan uuman kaikki reunaviivat ja vahvistetaan valinta Esc-näppäimellä.



**Kuva 7.** Uuman muuttaminen pinnaksi

Nyt myös uuma on mallinnettu pintana, ja profiili on ohjelmistossa kuvan 8 mukainen.

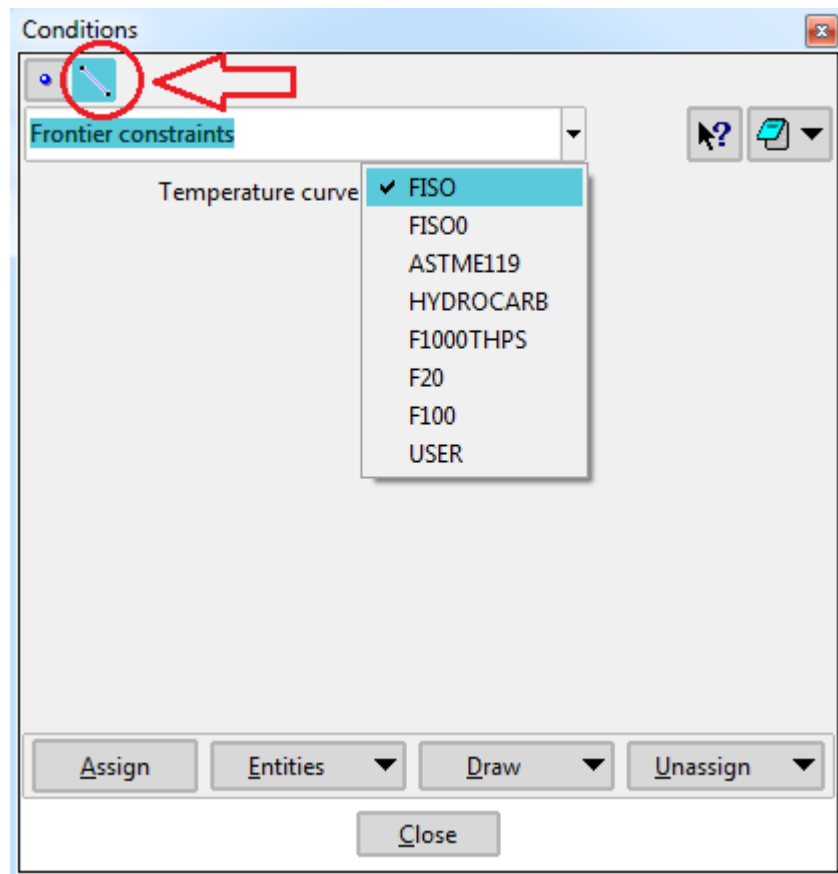


**Kuva 8.** Kaikki profiilin osat mallinnettu pintoina

Kuten kuvassa 8 nähdään, nyt myös uuman kohdalle on ilmestynyt toiset reunaviivat, jotka indikoivat pintaa.

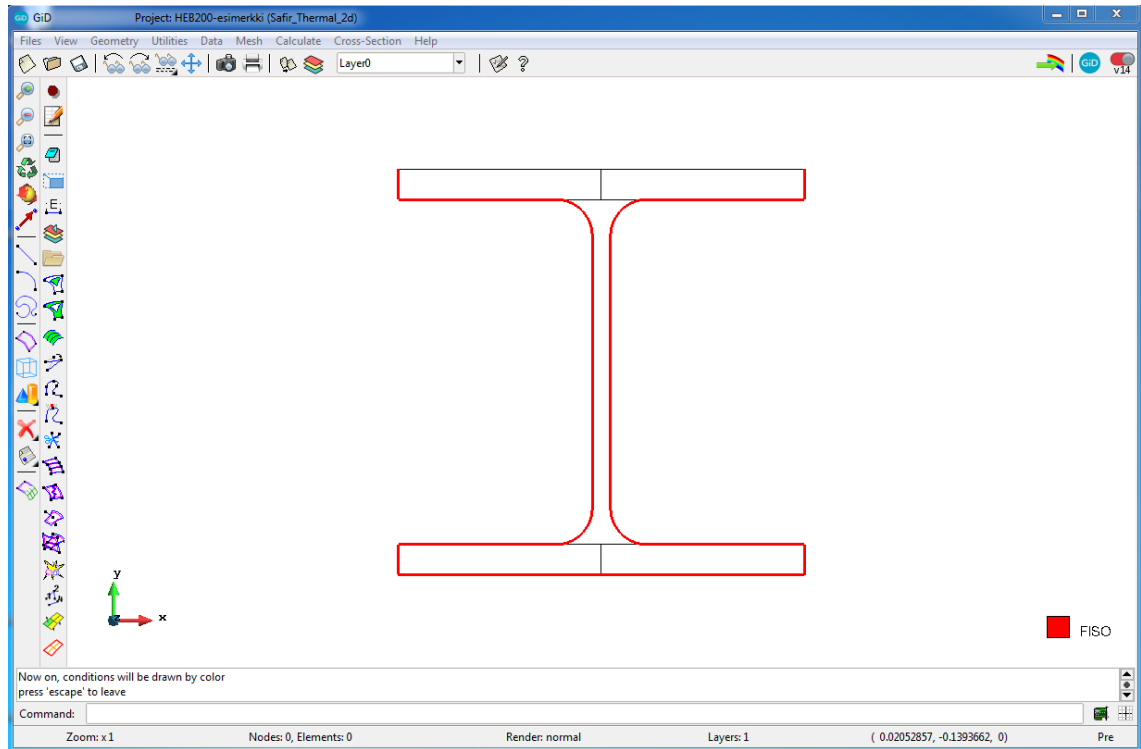
### 4.2.3 Lämpötilakäyrän valinta

Profiilin määrittämisen jälkeen valitaan lämpötilakäyrä, jonka mukaista lämpötilakehitystä palotilanteen halutaan noudattavan. GiD:ssä tämä saadaan tehtyä valitsemalla Data-alasvetovalikosta Conditions, jolloin samanniminen ikkuna aukeaa käyttöliittymään. Conditions-ikkunassa valitaan ensin vasemmasta yläkulmasta viivapainike pisteen sijaan kuvan 9 mukaisesti. Ensimmäisestä alasvetovalikosta valitaan Frontier constraints ja Temperature curve-alasvetovalikosta FISO. (Gallois 2011, s. 4) Kuvassa 9 on esitetty Conditions-ikkuna ja siinä tehtävät valinnat.



Kuva 9. Lämpötilakäyrän valinta

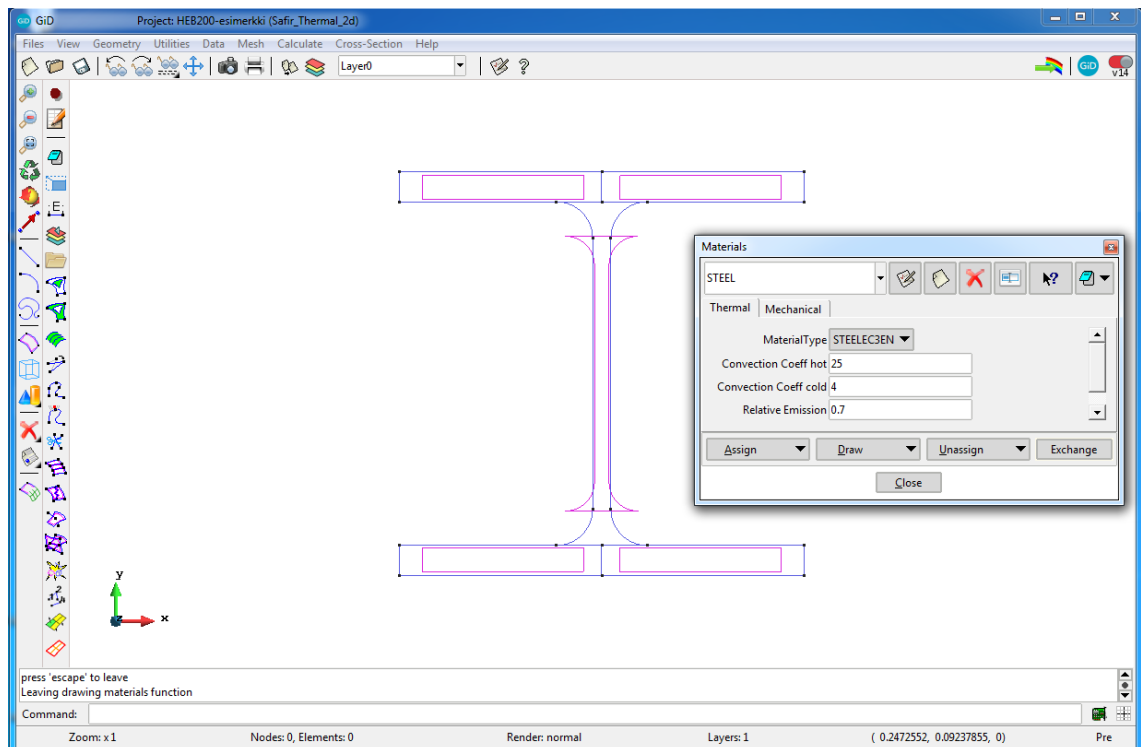
Tämän jälkeen painetaan Assign, jolloin voidaan määrittää ISO-käyrän mukaiset olosuhteet kaikille muille profiilin reunaviivoille paitsi yläreunalle. Valinnan voi vahvistaa Conditions-ikkunan Finish-painikkeella tai Esc-näppäimellä. Conditions-ikkunassa voidaan valita Draw ja siitä edelleen Colors, jotta edelliset määrytykset saadaan näkyviin käyttöliittymässä kuvan 10 mukaisesti. Painamalla Esc-näppäintä tai Finish-painiketta Conditions-ikkunassa päästään pois kyseisestä näkymästä. (Gallois 2011, s. 4–5)



**Kuva 10.** Lämpötilaolosuhteiden määrittäminen profiilille

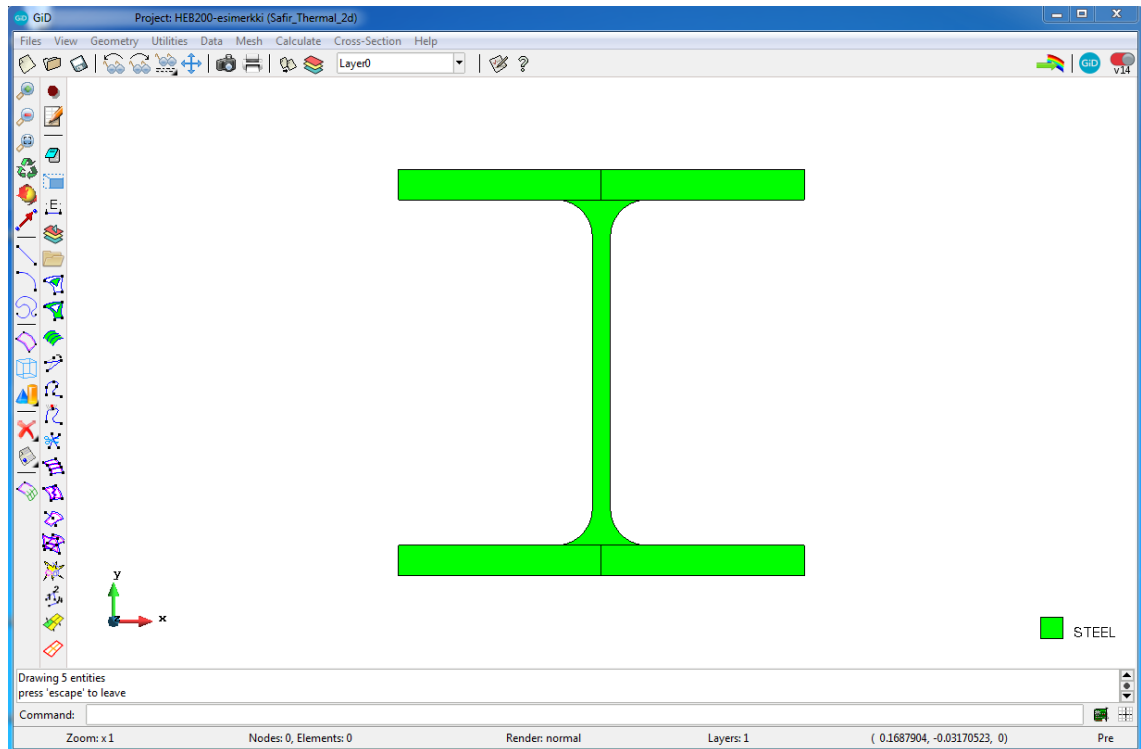
#### 4.2.4 Materiaalin määrittäminen

Lämpötilakäyrän määrittämisen jälkeen valitaan poikkileikkaukselle materiaalimalli Data-  
 alavetovalikon Materials-kohdasta. Käyttöliittymään aukeaa Materials-ikkuna, jossa  
 ylimmästä alavetovalikosta valitaan STEEL. Lisäksi Thermal-välilehdellä Material  
 Typeksi valitaan STEELEC3, Convection Coeff hot-kohtaan kirjoitetaan arvo 25,  
 Convection Coeff cold-kohtaan arvo 4 ja Relative Emission-kohtaan arvo 0.7, kuten  
 kuvassa 11 nähdään. Tässä esimerkissä Mechanical-välilehdelle ei tarvitse tehdä  
 muutoksia. (Gallois 2011, s. 6)



Kuva 11. Materiaalimallin määrittäminen

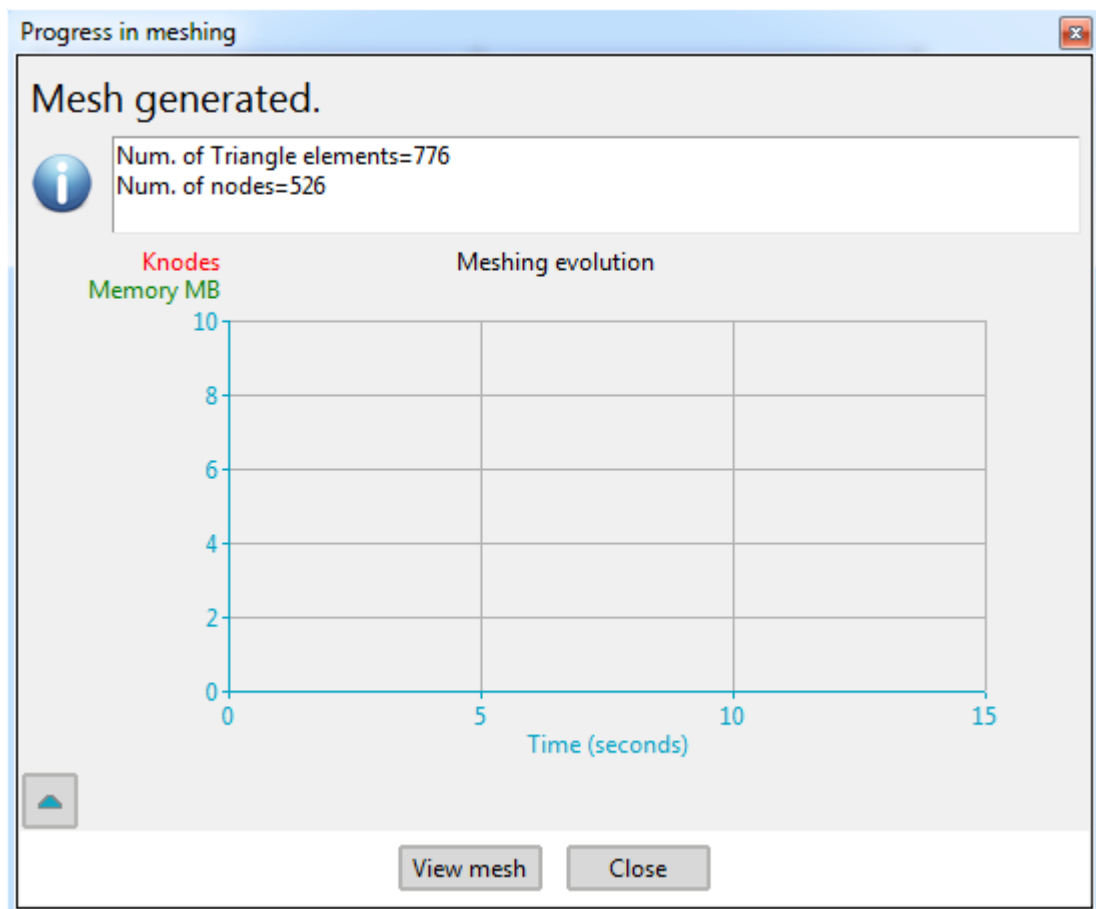
Painamalla Assign ja edelleen Surface pääsee määrittelemään kyseisen materiaalin poikkileikkaukselle. Valinnan saa vahvistettua painamalla Esc-näppäintä tai Materials-ikkunan Finish-painiketta. Materiaalin saa näkyviin yhtenäisellä värillä kuvan 12 mukaisesti, kun valitsee Materials-ikkunassa Draw ja edelleen all materials. (Gallois 2011, s. 6) Tällä tavoin voi myös varmistaa, että koko poikkileikkaus on määritetty halutulla materiaalilla. Näkymästä pääsee pois vastaavalla tavalla kuin kohdassa 4.2.3.



**Kuva 12.** Koko poikkileikkaukselle määritetty sama materiaali

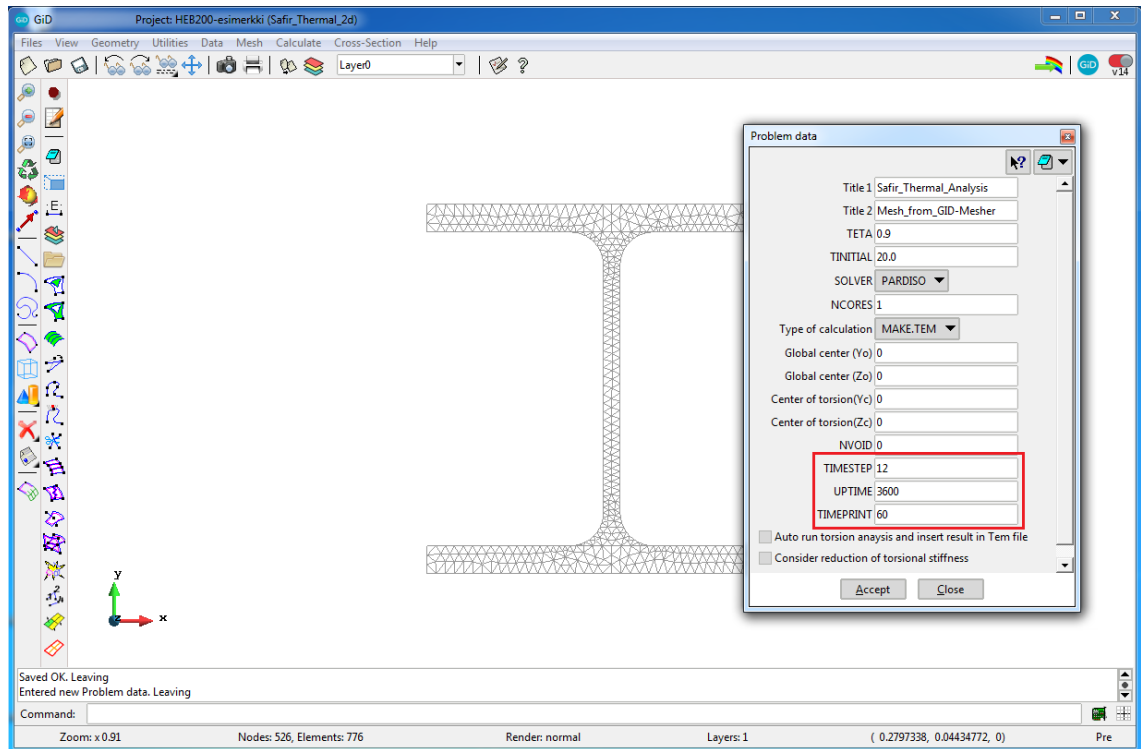
#### 4.2.5 Poikkileikkauksen verkotus ja yleiset tiedot

Poikkileikkauksen verkotus tarkoittaa sen jakamista pienempiin elementteihin. Tämän saa tehtyä Data-alasvetovalikon vierestä valitsemalla Mesh ja edelleen Generate mesh, jolloin ohjelmisto valitsee oletusarvoisesti elementtityypiksi kolmion (Gallois 2011, s. 7). Elementtien koon voi määrittellä käyttöliittymään aukeavassa Mesh generation-ikkunassa. Painamalla Ok ohjelmisto ilmoittaa solmujen ja elementtien määrän kuvan 13 mukaisessa Progress in meshing-ikkunassa. Elementtiverkon saa näkyviin painamalla samaisesta ikkunasta View mesh.



*Kuva 13. Elementtien ja solmujen lukumäärä elementtiverkossa*

Projektia koskevat yleiset tiedot saa määriteltyä valitsemalla Data-alasvetovalikosta Problem Data. Käyttöliittymään aukeaa samanniminen ikkuna, jossa määritellään TIMESTEP, UPTIME ja TIMEPRINT sellaisiksi kuin käyttäjä haluaa. (Gallois 2011, s. 8) Kuvassa 14 on esitetty laskentaa koskevien tietojen määrittäminen.



**Kuva 14.** Laskentaan vaikuttavien parametrien määrittäminen

Painamalla Accept määritellyt tiedot tallentuvat projektille. (Gallois 2011, s. 8)

#### 4.2.6 Laskenta

Tässä vaiheessa kaikki tarvittavat tiedot on määritelty ja profiilille voidaan suorittaa laskenta. Valitaan käyttöliittymän yläosasta Calculate ja edelleen Calculate window, jolloin käyttöliittymään aukeaa uusi Process window-ikkuna. Painamalla Start kyseisessä ikkunassa GiD-ohjelmisto luo in-muotoisen tiedoston ja aloittaa laskennan. Output view-painikkeella saa näkyviin laskentaprosessin etenemisen erilliseen ikkunaan aikaisemmin määritellyn TIMESTEP:in mukaisilla ajanhetkillä. (Gallois 2011, s. 9) Laskennan jälkeen tuloksia voidaan tarkastella DIAMOND-nimisessä graafisessa jälkikäsitteilyohjelmassa.

Jos laskentaa ei jostakin syystä voida suorittaa loppuun, GiD ilmoittaa siitä erillisellä Process errors-ikkunalla. Kyseisessä ikkunassa on View errors-painike, josta pääsee tarkastelemaan laskennan ongelmia tarkemmin.

## 5. YHTEENVETO

SAFIR-palomallinnusohjelmisto on ollut pääsääntöisesti tutkijoiden käytössä, minkä huomaa esimerkiksi konferenssijulkaisuja selatessa. Tutkimuksia, joissa SAFIR:a oli käytetty, löytyi huomattavasti enemmän kuin artikkeleita, joissa sitä oli hyödynnetty todellisen rakennushankkeen suunnittelussa. Ainutlaatuinen silta-kohde osoitti, että ohjelmistolla onnistuu monimutkaistenkin rakenteiden mallinnus ja analysointi. Toisaalta monimutkaisten rakenteiden tutkiminen vaatii käyttäjältä enemmän perehtymistä, tehtiin sitä millä ohjelmistolla tahansa.

SAFIR-ohjelmisto on kehitetty erityisesti palotilanteiden tutkimiseen, mikä on sekä sen vahvuus että heikkous. Siinä on huomioitu rakenteellisen paloturvallisuuden erityispiirteet, ja tilanteiden mallinnuksesta on pyritty tekemään käyttäjäystävällistä ja helppoa. Sitä se onkin, kun kyseessä on esimerkiksi I-profiilin lämpenemisen tutkiminen standardipalossa. Erilaiset materiaali- ja rakennemallit voivat kuitenkin tuoda haasteita mallinnukseen.

Muilla FEM-ohjelmistoilla rakenteiden paloturvallisuuteen liittyvien ominaisuuksien tutkiminen voi olla monimutkaisempaa, koska niitä ei ole kehitetty ainoastaan sitä varten. Toisaalta näillä ohjelmistoilla rakenteita pystytään tarkastelemaan normaalilämpötilassa monipuolisemmin. SAFIR:ssa ei ole normaalilämpötilan analyysiin yhtä paljon työkaluja, mutta se on myös huomattavasti edullisempi ohjelmisto muihin FEM-ohjelmistoihin verrattuna.

SAFIR-ohjelmiston toiminnan taustalla oleva teoria voi jäädä peruskäyttäjälle tuntemattomaksi ja sen ymmärtäminen kokonaisuudessaan vaatii syvällisempää matematiikan ja fysiikan osaamista. Sekä termisen että mekaanisen analyysin periaate on kuitenkin hyvä tuntea. Tässä työssä pyrittiin selvittämään teoriaa peruskäyttäjän näkökulmasta, jolloin ohjelmiston taustalla olevien suurimpien oletusten ja yksinkertaistusten tiedostaminen riittää.

Vaikka ohjelmisto soveltuu kaikkien yleisimpien rakennusmateriaalien tutkimiseen, tässä työssä tarkasteltiin esimerkkien kautta ainoastaan terästä. Teräsrakenteilla ohjelmiston käyttö on kaikista suoraviivaisinta, mutta siinäkin tapauksessa ohjelmisto toimii täydellisesti vain poikkileikkausluokan 1 rakenteilla. Monimutkaisempia tilanteita mallinnettaessa, käyttäjän tulee olla erityisen tarkka tekemissään valinnoissa ja saamiensa tulosten kriittisessä tarkastelussa.

Mikäli työn tilaajalla on aikomuksena lisätä toiminnallista paloturvallisuussuunnittelua yrityksen sisällä, ohjelmiston hankinnalle on hyvät perusteet. Sen opetteluun ei mene paljoa aikaa, varsinkaan, jos käyttäjällä on kokemusta muista FEM-ohjelmistoista. Ohjelmiston avulla voidaan saada muun suunnittelun tueksi hyödyllistä tietoa rakenteiden lämpötiloista tai käyttäytymisestä palotilanteessa, vaikka palomitoitus itsessään tehtäisiinkin taulukkomitoituksena. Yrityksen näkökulmasta ohjelmiston hinta on oleellinen tieto, mikä tässä tapauksessa on alhaisempi kuin monen muun ohjelmiston.

Ohjelmistoa olisi voinut tukia syvällisemminkin kuin mitä tässä työssä on tehty, mutta tällöin työn laajuus olisi ylittänyt kandidaatintyön laajuuden. Aiheesta voisi tutkia lisää esimerkiksi sitä, miten yksinkertaistukset ja oletukset todellisuudessa vaikuttavat tilanteiden mallinnukseen ja saataviin tuloksiin. Diplomityönä aiheeseen liittyen voisi olla esimerkiksi tutkimus, jossa jollekin tietylle rakenteelle tehtäisiin polttokokeita ja jonka tuloksia verrattaisiin SAFIR-mallinnuksella samalle rakenteelle saatuihin tuloksiin.

# LÄHTEET

Ali, F., Franssen, J-M., Nadjai, A. & Vassart, O. (ed.) (2018). Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Structures in Fire. Ulster University, Belfast, United Kingdom, June 6-8, 2018.

Baczkiwicz, J., Jokinen, T., Salminen, M. & Tiainen, T. (2018). Direct Method for Critical Temperature of a Steel Member Susceptible to Stability Loss. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Structures in Fire. Ulster University, Belfast, United Kingdom, June 6-8, 2018.

Couto, C., Lopes, J., Rodrigues, J.P. & Vila Real, P. (2013). Buckling analysis of braced and unbraced steel frames exposed to fire. *Engineering Structures*. Vol 49, pp. 541–559. Saatavissa (viitattu 13.5.2019): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014102961200586X>

CFD-mallinnus (2019). VTT. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.4.2019): <https://www.vtt.fi/palvelut/biotalous/nestemaiset-biopolttoaineet1/cfd-mallinnus>

Desanghere, S., Franssen, J-M., Tonicello, E. & Vassart, O. (2012). Fire Analysis of a New Steel Bridge. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Structures in Fire. Zurich, Switzerland, June 6-8, 2012. Saatavissa (viitattu 29.4.2019): <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/153216>

Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden kuormat = Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions. Actions on structures exposed to fire (2002). Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 1991-1-2+AC. Helsinki.

Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt = Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (2005). Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 1993-1-1. Helsinki.

Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus = Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: Structural fire design (2005). Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 1993-1-2. Helsinki.

Franssen, J-M. (2005). SAFIR: A Thermal/Structural program for Modelin Structures Under Fire. *Engineering Journal*. Vol.42(3), pp. 143–158. Saatavissa (viitattu 8.3.2019): [https://www.researchgate.net/publication/292660602\\_SAFIR\\_A\\_thermalstructural\\_program\\_for\\_modeling\\_structures\\_under\\_fire](https://www.researchgate.net/publication/292660602_SAFIR_A_thermalstructural_program_for_modeling_structures_under_fire)

Franssen, J-M. & Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*. Vol.8(3), pp.300–323. Saatavissa (viitattu 6.3.2019): <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>

Franssen, J-M. & Vila Real, P. (2010) Elefir-EN Fire design of steel structural members according the Eurocode 3. Saatavissa: (viitattu 13.5.2019): <http://elefiren.web.ua.pt>

Gallois, L. (2011). Example for GID-SAFIR 2D and 3D Thermal Analysis, Exercise n°2 – HEB200. Tutorial.

The Flooding of the Arve River in Geneva, Switzerland (2015). GlobalVision Communication. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.4.2019): <https://globalvision.ch/en/news/flooding-arve-river-geneva-switzerland/>

Salminen, M., tekninen erityisasiantuntija, Teräsrakenneyhdistys, Helsinki. Haastattelu 2.4.2019.

Tapaninen, A. (2016). Teräsrakenteen lämpötilan kehitys standardi- ja hiilivetypalotilanteessa. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Helsinki. Saatavissa (viitattu 26.4.2019): [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/115059/Tapaninen\\_Aleksi.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/115059/Tapaninen_Aleksi.pdf?sequence=1)

Vinha, J. (2010). 4. Lämpö ja lämmönsiirtyminen. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

YMa 848/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Saatavissa (viitattu 8.2.2019): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170848>