

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

Mikko Myllymäki

**NESTEPALOJEN RAKENTEELLISEN TORJUNNAN SUUNNITTELU (PASU-
PROJEKTI)**

Päivitetty 17.10.2017

Tarkastajat Professori Timo Björk

DI Ilkka Pöllänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Mikko Myllymäki

Nestepalojen rakenteellisen torjunnan suunnittelu (PASU-projekti)

Diplomityö

2017

82 sivua, 38 kuvaa, 17 taulukkoa ja 10 liitettä

Tarkastaja: Professori Timo Björk
DI Ilkka Pöllänen

Hakusanat: palonsuoja-kasetti, palavat nesteet, valuma-altaat, palon tukahdutus

Diplomityössä oli tavoitteena suunnitella rakenteellinen ratkaisu nestepalojen sammuttamiseen. Sammutusratkaisu ei perustu kemiallisen lisäaineen tai mekaanisen systeemin toimintaan. Nestepalojen rakenteellinen sammutus perustuu paloreaktion itse luomiin palamiselle epäedullisiin oloihin palonsuojarakenteen alla.

Palonsuojarakenne koostuu palonsuojakasetista, sekä sen päälle tulevasta liukaturvaritilästä. Liukaturvaritilän tarkoitus on toimia nykystandardin mukaisena työskentely-, ja kulkutasona sekä ottaa vastaan palonsuojarakenteeseen kohdistuneet kuormitukset lumikuormaa lukuun ottamatta. Palonsuojakasetin tehtävänä on toimia nesteen ohjurina ja palon tukahduttimena. Palonsuojamoduuli (liukaturvaritilä + palonsuojakasetti) tuetaan teräspalkeista kootun runkorakenteen päälle, jonka tarkoitus on toimia kantavana rakenteena.

Tutkielmassa keskityttiin tutkimaan aluksi palonsuojarakenteen toimivuutta muuntajaöljyllä. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksen, laskennan sekä palotestien avulla. Tutkimuksessa toteutettiin virtaus-, lujuus-, pyro- ja korroosiolaskentaa. Palotesteissä simuloitiin öljysäiliön repeämästä aiheutuvaa öljypaloa kaatamalla palavaa öljyä palonsuojarakenteen päälle.

Diplomityössä esille tullut palonsuojarakenne toimii suunnitellulla tavalla ja sammuttaa öljypalon päältäään 6,5 sekunnissa tai nopeammin. Palonsuojarakenne toimii myös standardin mukaisena työskentely- ja kulkutasona, kestää 5 kN / m² hyötykuormaa, sekä Suomen alueella esiintyviä lumikuormia. Palonsuojarakenne on suojattu korroosiota vastaan ja sen pinoite kestää 20–60 vuotta.

Jotta palonsuojarakenteen toimivuus muille aineille kuin muuntajaöljylle voitaisiin varmistaa, on laskentaa laajennettava sekä toteutettava uusia testejä. Tuotteelle on haettu patenttia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Mikko Myllymäki

Designing structural retardation of fluid fires (PASU-project)

Master's thesis

2017

82 pages, 38 figures, 17 tables and 10 appendices

Examiner: Professor Timo Björk
M.sc Ilkka Pöllänen

Keywords: fire protection disc, flammable fluids, collection pools, fire retardation

The goal of this master's thesis was to design a structural solution to extinguishing liquid fires. The extinguishing structure doesn't rely on any chemical additive or mechanical system. The structural extinguishing of liquid fires is based upon unfavourable conditions for burning reaction under the fire protection disc, created by the fire itself.

The fire extinguishing structure is constructed of a fire protection disk and a non-slip grating that is installed on top of it. The purpose of the non-slip grating is to act as a working platform and a walkway that is compatible with modern standard and to receive all loads subjected to fire protection structure except for snow loads. The purpose of the fire protection disk is to guide the liquids that come to contact with it and to act as a flame retarder. The fire extinguishing structure is built on a load-bearing frame made of steel-girders.

The effectiveness of the fire extinguishing capabilities of fire extinguishing structure were first studied using transformer oil. The study was conducted via literature check, calculations and testing. The calculations included strength, fire, corrosion and liquid flow calculations. In the tests a rupture of an oil tank was simulated by pouring burning oil upon fire extinguishing structure.

The fire protection structure that emerged in this master's thesis works functions as planned and extinguishes visible flames on top of the structure in 6,5 seconds or less. The fire protection structure also acts as a working platform and a walkway that is compatible with modern standard and is capable to withstand a load of 5 kN / m² and snow loads that occur in Finland. The fire protection structure is protected against corrosion by a zinc coating that withstands corrosion for 20-60 years.

In order to verify the functionality of fire protection structure for other flammable fluids the calculations must be expanded and new tests must be conducted. Patent pending.

ALKUSANAT

Tahdon osoittaa kiitokseni ohjaajalleni Timo Björkille kuten myös Pertti Väisäselle ja koko Fintekra Oy:lle sekä toiselle tarkastajalleni Ilkka Pölläselle että Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle tämän diplomityön mahdollistamisesta. Tahdon myös kiittää Kuopion Pelastusopistoa sekä Espoon VTT:tä ja testeihin osallistunutta henkilökuntaa molemmista instansseista, Fingrid Oy:tä ja sen palveluksessa olevia Mikael Wiréniä, Timo Heiskasta ja Anne Ventolaa suurjännitemuuntajaympäristöön liittyvien asioiden selvittämisessä, Vantaan Energia Sähköverkot Oy:tä sekä Mikko Pirosta. Haluan myös osoittaa suuret kiitokset perheelleni, ystävilleni ja läheisilleni sekä ennen kaikkea rakkaalle vaimolleni Minna Myllymäelle laantumattomasta uskosta ja kannustamisesta.

Mikko Myllymäki

Mikko Myllymäki

Kuopiossa 17.10.2017

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	1
ABSTRACT.....	2
ALKUSANAT.....	3
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLILUETTELO	8
1 JOHDANTO	10
2 TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT METODIT	11
2.1 Kirjallisuuskatsaus	11
2.2 Haastattelut	11
2.3 Laskenta	11
2.4 Kokeet	11
3 SUURJÄNNITEMUUNTAJIEN VALUMA-ALTAIDEN PALONSUOJAUS...	12
3.1 Suurjännitemuuntaja	13
3.2 Suurjännitemuuntajabunkkeri.....	13
3.3 Suurjännitemuuntajan valuma-allas	14
3.4 Valuma-altaan palonsuojaus.....	15
3.5 Palon syttyminen muuntajissa	15
3.6 Nestepalon sammuttaminen	15
4 LIEKKILOUKKU PALONSUOJAKASETTI.....	17
4.1 Vertailu palonsuojainten kesken.....	17
4.1.1 Kiviarinan ominaisuudet.....	17
4.1.2 Ontelolaatta-arinan ominaisuudet	19
4.1.3 LHD-reikälevyn ominaisuudet.....	21
4.1.4 Meiser Stephuit FH	22
4.1.5 Liekkiloukku-palonsuojarakenteen ominaisuudet.....	22
4.1.6 Palonsuojainten vastakkainasettelu	23
4.2 Palonsuojakasetin rakenne	24
4.2.1 Palonsuojakasetti.....	27
4.2.2 Huoltotaso	27
4.2.3 Runko.....	28

4.3	Palonsuojakasetin toiminta.....	29
4.3.1	Huollettavuus ja kunnan tarkkailu	30
4.4	Turvallisuus	30
4.5	Palonsuojakasetin materiaalivalinta.....	30
4.5.1	Metallien ominaisuudet	31
4.5.2	Korroosionkesto	33
4.6	Lujuuslaskenta.....	36
4.6.1	kuormat	36
4.6.2	Runko.....	37
4.6.3	Palonsuojakasetti.....	44
4.7	Virtauslaskenta	48
4.8	Palolaskenta.....	52
4.8.1	Palonkesto	52
4.8.2	Palavan aineen hapensaanti ja tukahtuminen.....	59
4.9	Jäätyminen.....	65
4.10	Palonsuojarakenteen asennus	65
5	PALOTESTIT	67
5.1	Testilaitteisto	70
5.2	Itsenäiset testit	73
5.3	Testit VTT:llä	73
6	TULOKSET.....	75
6.1	Lujuuslaskenta.....	75
6.2	Tilavuusvirtaus	75
6.3	Korroosionkesto.....	76
6.4	Palolaskenta.....	76
6.5	Palokokeet	77
6.5.1	Itsenäiset palokokeet	77
6.5.2	VTT:lla tehdyt palokokeet.....	78
6.6	Palonsuojarakenteiden vertailu	79
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSET.....	80
	LÄHTEET	83

LIITTEET

LIITE I: Palonsuojakasettien rasitukset yksilöllisesti tuettuna

LIITE II: Palonsuojakasettien tuennat

LIITE III: Vesitestien raportti

LIITE IV: Palokokeiden raportti (Fintekra Oy)

LIITE V: Pelastusopiston testiraportti

LIITE VI: Testausselostus (VTT-S-3916-17)

LIITE VII: Teräsrakenteiden lämpötilan laskuri

LIITE VIII: Koottu Palolasku

LIITE IX: 120-IPE palkin laipan kimmainen sekä plastinen ratkaisu

LIITE X: Hazop-analyysi

SYMBOLILUETTELO

A_o	aukon pinta-ala [m ²]
b_p	laipan leveys [mm]
C	purkauskerroin
c/t	poikkileikkauksen hoikkuusluku
E	kimmokerroin [GPa]
F_d	kuorman mitoitusarvo [N]
F_{eq}	vaikuttava, tasaisesti jakautunut voima [kN/m]
F_k	suurin sallittu kuorma kasetille [kN/m ²]
F_{ko}	kuorman ominaisarvo
F_{rep}	kuorman edustava arvo [N]
f_{yk}	alempi myötöraja [MPa]
ΔH_c	höyryjen alempi palamislämpö [MJ/kg]
h_o	pinnankorkeus aukolta [mm]
h_p	palkin poikkileikkauksen korkeus [mm]
$\Delta H_{R,O_2}$	palon tuottama energia happikiloa kohti [kJ/kg]
I	pintahitautsmomentti [mm ⁴]
$i_{f,z}$	ekvivalentin puristetun laipan jäyhyysäde
k_c	momenttien jakautumisen mukainen korjauskerroin
L	laskennassa käytettävä jänneväli [mm]
L_c	palkin keipahdustukien välimatka [mm]
\dot{m}_b	polttoaineen massavirta paloreaktiossa [kg/m ² s]
$M_{c,Rd}$	taivutuskestävyyden mitoitusarvo [kNm]
$\dot{m}_{g,max}$	maksimaalinen kaasujen massavirta [kg/m ² s]
M_{max}	maksimimomentti [kNm]
$M_{y,ed}$	tukipisteiden välillä esiintyvä suurin momentin mitoitusarvo [kNm]
n	varmuuskerroin
P_k	pistekuorma [N]
q	tilavuusvirta [m ³ /s]
Q	tilavuusvirta [l/min]
r_p	viisteen säde [mm]
S_k	suurin sallittu lumikuorma [kN/m ²]

T_a	vallitseva ilmanlämpötila [C]
t_f	laipan paksuus [mm]
T_g	palokaasun lämpötila [C]
t_h	aika tunneissa [h]
t_l	laipan paksuus [mm]
T_p	tulipalon lämpötila [C]
ΔT_t	teräksen lämpötilanmuutos [C]
T_t	teräksen lämpötila [C]
t_w	uuman paksuus [mm]
v	nesteen virtausnopeus [m/s]
V	valuma-altaan tilavuus [m ³]
V_t	teräsrakenteen tilavuus neliometrillä [m ³]
W_{pl}	plastinen taivutusvastus [mm ³]
y	etäisyys palkin keskelle reunalta [mm]
$Y_{O_2,\infty}$	vallitseva ilman happipitoisuus [%]
$Y_{O_2,LOI}$	paloa rajoittava hapen osuus [%]
α	lämmönsiirtymisluku [W/m ² °C]
γ_f	kuorman osavarmuusluku
γ_{MO}	laipan pistekuormituksen kestoa laskettaessa käytetty varmuuskerroin
δ_{max}	maksimitaipuma [mm]
ε	atwoodin numero
ε_m	emissioluku
λ_l	materiaalin mekaanisten arvojen mukainen hoikkuus
ρ_a	ilman tiheys [kg/m ³]
ρ_g	palokaasun tiheys [kg/m ³]
ρ_t	teräksen tiheys [kg/m ³]
σ_{max}	maksimijännitys [MPa]
χ	palamisen tehokkuuskerroin
Ψ	kuorman pienennyskerroin

1 JOHDANTO

Palavien nesteiden valuma-altaiden palonsuojauksessa tarkoitus on kerätä itse palava aine turvaan säiliöön ja sitten tukahduttaa se turvallisesti ja hallitusti. Pääasiallinen vastuu palon tukahduttamisesta on valuma-altaan kannella, jonka tulee olla niin läpäisevä, jotta palava neste valuu altaaseen tarpeeksi nopeasti aiheuttamatta pinnalla liikaa vahinkoa, sekä sen verran tiivis, jotta altaassa palava neste ei saa tarpeeksi happea palon ylläpitämiseen kannen läpi vaan tukahduttaa itsensä käytettyään loppuun kaiken säiliössä olevan hapen. Lisähaasteen valuma-altaan kannen suunnitteluun tuo mahdollisimman suuren nestevirran sekä niin nopean palontukahdutuksen mahdollistava rakenne, jotta suojattava kohde tai suojaava järjestelmä eivät ehdi palossa lämmitessään vahingoittua. Tässä työssä käytetään esimerkkitapauksena suurjännitemuuntajien valuma-altaita, mutta nämä laskut ja palonsuojaustavat ovat sovellettavissa myös muiden palavien nesteiden valuma-altaiden palonsuojauksessa.

Suurjännitemuuntajien ja muiden palavia nesteitä sisältävien rakenteiden vuodosta johtuvien palojen ehkäisy on nykyään suurimmaksi osaksi toteutettu kömpelöillä, vaarallisilla sekä hankalasti huollettavilla ratkaisuilla. Perinteistä rauditusverkon päälle rakennettua kiviariaa on yritetty parantaa toteuttamalla öljysäiliön kansi ontelolaatoista tai reikälevystä. Näissä kaikissa on useita epäkohtia liittyen turvallisuuteen, huoltoon, toimivuuteen sekä itse rakenteeseen.

Työn tarkoituksena on tuoda esiin huoltotaso, joka on rakenteeltaan kevyt sekä vahva, helppo huoltaa ja asentaa sekä käsittää hyvän läpäisy- ja tukahdutuskyvyn. Työ tulee keskittymään palavien nesteiden valuma altaiden palonsuojakasetin kehitykseen käsittäen suunnitelmat kasetin rakenteesta ja toimintaperiaatteesta, lujuus-, palo- ja virtauslaskelmat, mitoituksen sekä materiaalivalinnat ja niihin vaikuttavat tekijät, sekä pelastusopistolla että VTT:llä tehtävät palotestit. Pääpaino työssä on idean jalostaminen valmistusvalmiiksi, testatuksi, toimivaksi ja turvalliseksi tuotteeksi.

2 TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT METODIT

Tutkimuksen taustalla oli jo valmis idea kehiteltävästä tuotteesta. Tuotteen kehittämisen ja testaamisen tukena käytettiin kirjallisuuskatsausta, haastatteluita, laskentaa sekä kenttäkokeita.

2.1 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa keskityttiin hakemaan taustatietoja, joiden perusteella voitiin tuotteesta kehittää mahdollisimman tarkoituksenmukainen sekä käyttäjäystävällinen. Kirjallisuuskatsauksen kautta saatiin tietoja edeltävistä palonsuojaratkaisuksista ja voitiin niitä objektiivisesti tarkastelemalla selvittää palonsuojakasetille toivottavia ominaisuuksia sekä sen vaatimuksia. Lähdekirjallisuudesta saatiin myös teoreettista pohjaa suoritettaville laskuille sekä toiminnan varmistaville kokeille. Lähteiden haussa käytettiin pääasiassa internetin ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston tietokantoja sekä fyysisiä kirjastoja ympäri suomen.

2.2 Haastattelut

Kirjoittamaton, kokemukseen perustuvaa tietoa saatiin haastattelemalla eri toimihenkilöitä. Haastattelut olivat pääasiassa palavereissa ja tapaamisissa tapahtuvaa tietojenvaihtoa ja niitä toteutettiin koko projektin ajan.

2.3 Laskenta

Laskennassa keskityttiin tuotteen toimivuuden varmistamiseen sekä rakenteen kestävyys- ja mitoitus- ja mitoitukseen. Laskenta koostui pääasiassa virtaus-, lujuus-, voima- ja pyrolaskuista. Näillä keinoin saatiin tietoon tarvittavat mitoitusperusteet sekä voitiin varmistaa materiaali- ja valmistusmenetelmäperusteita. Laskennallista osuutta hyväksikäyttäen voitiin myös määrittää tarvittavat kokeet tuotteen toiminnan varmistamiseksi.

2.4 Kokeet

Tutkimuksessa käytetty viimeinen tiedonhankintametsodi oli kenttäkokeiden suorittaminen sekä itsenäisesti, että VTT:n kanssa. Kokeilla varmistettiin laskennallisen teorian paikkansapitävyys ja että palonsuojarakenne tulisi toimimaan suuremmillakin pinta-aloilla.

3 SUURJÄNNITEMUUNTAJIEN VALUMA-ALTAIDEN PALONSUOJAUS

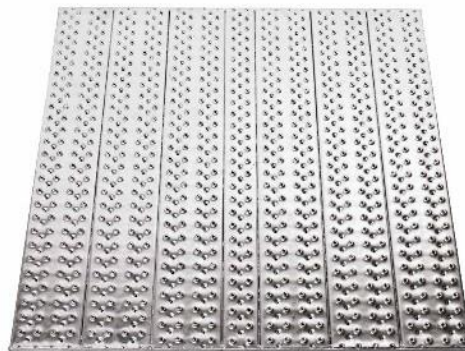
Palonsuojakasetin kehitysprojekti alkoi puhtaasti tarpeesta uudistaa ja parantaa jo olemassa olevia palavien aineiden valuma-altaiden palonsuojausta. Edelliset käytännöt eivät lähemmin tarkasteltuna ole kovin käytännöllisiä taikka turvallisia ja oletettavasti niiden suunnitteluun ei ole paneuduttu niin hyvin kuin aiheen vakavuus vaatisi. Pienemmissä valuma-altaissa ei palonsuojausta edes välttämättä löydy. Rakenteen muotoja ja materiaalia alettiin pohtia aivan uudesta näkökulmasta niin muodon kuin materiaalinkin kulmasta pääfunktion säilyessä entisenä. Tässä tutkimuksessa käytetään useasti esimerkkinä öljyjäähdytteisiä suurjännitemuuntajia, joiden valuma-altaiden palonsuojauksessa on käytetty yleisesti kiviarinaa, ontelolaatta-arinaa sekä uutuuutena LHD- ja Stephuit FH-reikäpeltiä, jotka on esitetty kuvissa 1-3.



Kuva 1. Tyypillinen kiviarina



Kuva 2. Tyypillinen ontelolaatta-arina



Kuva 3. LHD-reikäpelti. (PcP 2013c)

3.1 Suurjännitemuuntaja

Sähköenergian siirrossa on edullista käyttää mahdollisimman pientä virtaa ja suurta jännitettä, varsinkin siirrettäessä energiaa pitkiä matkoja. Siksi energialaitoksissa tuotettava sähköenergia muunnetaan generaattorin muodostamasta muutamasta kilovoltista ylöspäin jopa useaan sataan kilovolttiin. (Teollisuuden Voima Oyj 2013, s. 34) Tällainen suurjännite voidaan voimalinjoja pitkin siirtää pitkiä matkoja vähähäviöisesti. Sähkön jakeluverkon voimalinjoissa on suurjännitemuuntoasemia, joissa suurjännite muunnetaan pienemmäksi, kotitalouksien käyttöön sopivaksi verkkojännitteeksi. Muuntajissa käämit ja rautasydämet on upotettu säiliöön, joka on täytetty muuntajaöljyllä. (Trafcomic 2017) Suurjännitemuuntajien säiliöiden alapuolella on huoltotasot, joita käytetään muuntajien huoltoon. Huoltotason alapuolella on allas, säiliö tai vastaava, jonka tehtävänä on estää säiliöistä valuvan öljyn pääseminen ympäristöön. Näin ollen huoltotasolla on voitava liikkua ja sen tulee olla sellainen, että öljy pääsee tehokkaasti valumaan sen läpi. Lisäksi huoltotason tulee tukahduttaa mahdollinen öljypalo, jos palavaa öljyä vuotaa yläpuolella olevasta säiliöstä. (Väisänen 2017) (Wirén 2017a)

3.2 Suurjännitemuuntajabunkkeri

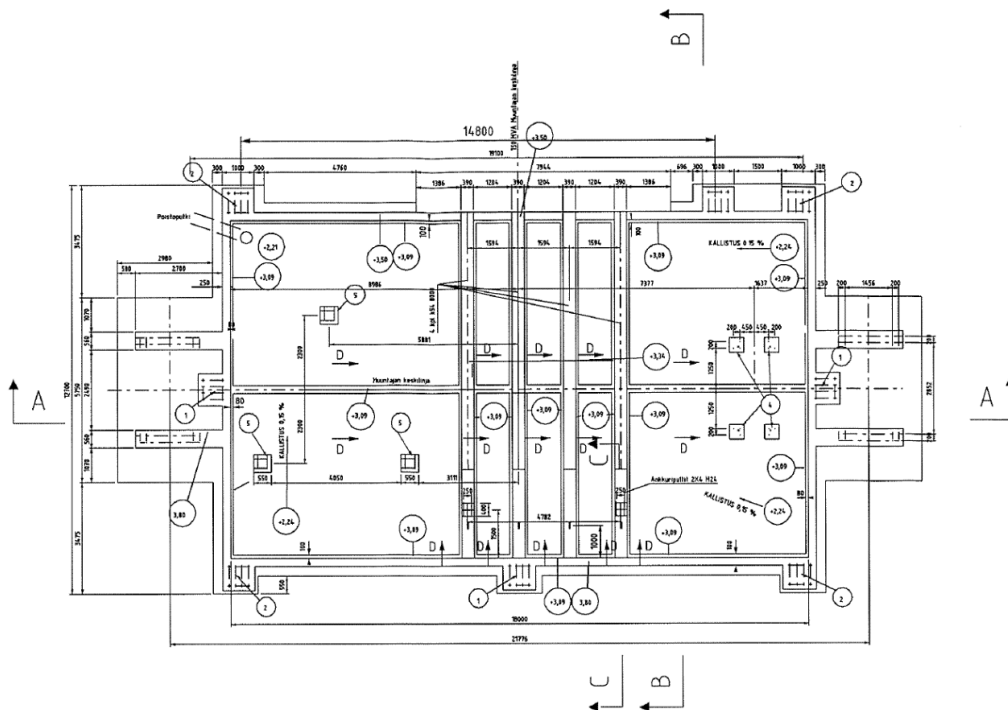
Suurjännitemuuntajien ympärille on yleensä rakennettu betoninen bunkkeri, jonka yksi seinä koostuu irrotettavista settipalkeista muuntajan ulosottoa varten, kuten kuvasta 4 voidaan havaita (Väisänen 2017) (Wirén 2017b).



Kuva 4. Suurjännitemuuntajan bunkkeri.

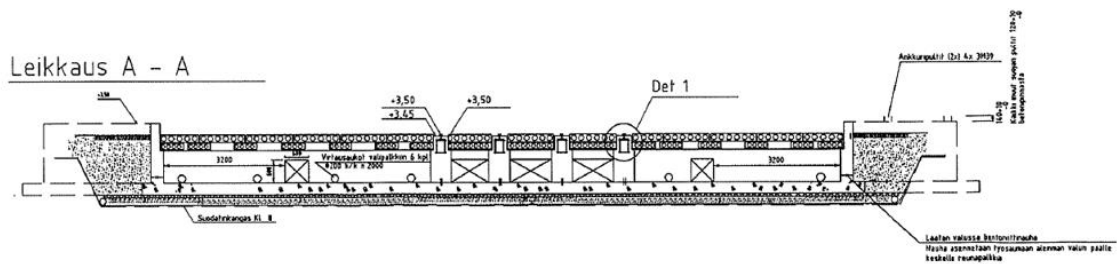
3.3 Suurjännitemuuntajan valuma-allas

Suurjännitemuuntajien valuma-altaat ovat yleisesti betonista valettuja tyhjennyskanavat omaavia altaita. Muuntajien siirtoa ja huoltoa varten on altaissa keskivaiheilla korokkeet, joita pitkin kulkevia kiskoja muuntajaa voidaan siirtää suojabunkkerista ulos ja sisään. Näiden kyseisten bunkkereiden keskivaiheilla yleensä kulkee myös jakoseinä poikkisuuntaan muuntajan kuljetuskiskoihin nähden. Nämä seinämät sekä valuma altaan tyypillinen rakenne on esitetty kuvassa 5. (Väisänen 2017) (Wirén 2017b)



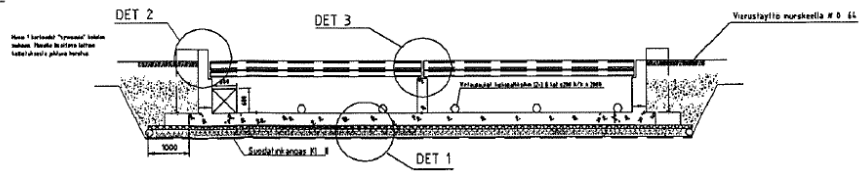
Kuva 5. Valuma-allas ylhäältä kuvattuna. (Wirén 2017b)

Nämä seinämät eivät kuitenkaan ole umpinaisia, vaan niiden alaosassa on kuvissa 6 ja 7 esitettyjen leikkausten mukaisia aukkoja. Nämä aukot mahdollistavat nestepinnan tasaisuuden koko altaan alalla, jolloin yksi sektio ei pääse tulvimaan. (Väisänen 2017) (Wirén 2017)



Kuva 6. Valuma altaan A-A – linjan poikkileikkaus (Wirén 2017b)

Leikkaus B – B

**Kuva 7.** Valuma-altaan B-B – linjan poikkileikkaus (Wirén 2017b)

3.4 Valuma-altaan palonsuojaus.

Yleisesti valuma-aldaiden palonsuojaus on toteutettu puoliläpäisevällä rakenteella, josta neste pääsee läpi suojattuun säiliöön mutta joka rajoittaa mahdollisen palon hapensaantia. Syttyneen aineen sammutus on sitten toteutettu sprinklerein, vaahdotuksin tai nestettä läpäisevä kansi ei päästä lävitsensä tarpeeksi happea, jotta aine voisi palamista jatkaa vaan tukahduttaa pian käytettyään säiliössä olevan vapaan hapen. (Väisänen 2017) (Wirén 2017a)

3.5 Palon syttyminen muuntajissa

Palon syttyminen tarvitsee kolme tekijää: happea, palamiskelpoista ainetta, esimerkiksi muuntajaöljyä sekä lämmönlähteen. Muuntajaöljyä voi vapautua vahingon, rasituksen tai onnettomuuden aiheuttamasta vuodosta. Yleensä vuodot ovat volyymiltaan pieniä; vain noruen muuntajan kylkeä pitkin tipoittain ja johtuen tiivistesten tai liitosten pettämisestä. (Electrotechnic 2017) Paineet muuntajan jäähdytys-systeemissä eivät ole suuria, sillä systeemi perustuu lämmöstä aiheutuvaan luonnolliseen kiertoon, ja suurin paine tulee paisuntasäiliön sijoittelusta johtuvasta hydrostaattisesta paineesta. (Väisänen 2017) (Wirén 2017a) Tutkimuksessa otettiin kuitenkin huomioon putken tai säiliön halkeamisesta sekä eristeen rikkoutumisesta johtuvat kokoluokaltaan suuremmat vuodot.

Palon syyttäjänä suurjännitemuuntajapaloissa voi toimia kipinä, oikosulku tai rakenteeseen varautuneen sähkölatauksen äkillinen purkautuminen (Aurecongroup 2017) (T&D World 2017).

3.6 Nestepalon sammuttaminen

Perinteisesti nestepalon sammutus on toteutettu joko vedellä tai sammutuskäyttöön tarkoitettulla vaahdolla. Menetelmät perustuvat palavan aineen tai ympäristön viilentämiseen taikka hapensaannin rajoittamiseen. (Chemguard 2017a)

Tulva-sprinkleri -systeemi (eng. deluge) perustuu hienon vesisumun lämmönsitomiskykyyn ja sitä käytetäänkin usein kohteissa, joissa palonsuojaukselta vaaditaan paljon, kuten suurjänniteympäristöissä tai polttoaineen säilytyksen yhteydessä. Tulva-sprinkleri – systeemi eroaa normaalista sprinklerisysteemistä siten, että sprinkleriputkistossa ei ole jatkuvaa painetta, vaan systeemiin virtaa vesi vasta kun anturi (savu, lämpö, säteily) laukeaa palosta varoittaen. Kun anturi sitten lauetessaan avaa venttiilin, paineistuu sprinklerisysteemi ja alkaa tuottaa hyvin hienojakoista vesisumua. Sumulla pyritään imemään lämpöä palotapahtumasta samalla rajoittaen palon saamaa happea. (Viking 2009, s. 4)

Vesi on ongelmallista hiilivety pohjaisten palojen sammuttamisessa, sillä se hiilivetyjä raskeampana jättää palavan aineen päällensä palamaan. Palon sammumisen jälkeen jäljellä on veden ja hiilivedyn seosta, jota voi olla vaikea hävittää. Vesisumun hienojakoisuudesta johtuen voi sen saaminen oikeaan paikkaan vääranlaisissa olosuhteissa (tuuli, kaasuvirtaukset, lämpönoeste) olla myöskin haastavaa. (Valtanen 2016, s. 382)

Vaahdotussysteemi pyrkii sammuttamaan nestepalot eristämällä palavan aineen lämmönlähteestä sekä hapekkaasta ilmasta ja samalla viilentäen sitä. Vaahto koostuu vedestä, vaahtoavasta aineesta sekä ilmasta ja hiilivetyjä kevyempänä kelluu niiden päällä. Vaahdottimia varten pitää rakentaa mittava järjestelmä, joka yksinkertaistettuna koostuu vedenlähteestä, vaahtoaine-säiliöstä, kontrollisysteemistä sekä itse vaahdotinlinjastosta.

Vaahdotuva aine voi mennä vanhaksi ja sen kuntoa tulee valvoa ajoittain. Vaahdotus on myös hankalaa tuulisissa tai muuten esteellisissä oloissa vaahdon keveyden takia, ja sitä voidaan hankalien olosuhteiden vuoksi joutua käyttämään moninkertaisia määriä ihanneolosuhteisiin verrattuna. Palon tukahtumisen jälkeen on jäljellä hiilivetyjen ja palonsammutusvaahdon seosta, jota voi olla hankala ja kallis hävittää.

(Chemguard 2017a) (Chemguard 2017b, s. 1-2)

4 LIEKKILOUKKU PALONSUOJAKASETTI

Idea Liekkiloukku palonsuojakasettiin syntyi ajatuksesta, ettei palavien nesteiden palonsuojauksen eteen ole tehty vielä kaikkea mahdollista käytettävyyden, turvallisuuden ja toimivuuden suhteen. Pyrkimyksenä oli luoda turvallisuusstandardit täyttävä, laskennallisesti toimiva ja toistettavissa oleva, kevyt mutta luja rakenne.

4.1 Vertailu palonsuojainten kesken

Rakennetta määrittämään valittiin funktion lisäksi modulaarisuus ja helppo kunnan tarkkailu sekä huolto. Idea tarkasteltaviin seikkoihin ja toteutustapoihin saatiin jo olemassa olevissa rakenteissa käytetyistä ratkaisuista kuten myös niiden epäkohdista ja puutteellisuuksista.

4.1.1 Kiviarinan ominaisuudet

Kiviarina koostuu toisiinsa yhdistetyistä teräsrakenteista tai - verkoista, jonka päälle ja/tai väleihin on sijoitettu noin 400–500 mm syvyydeltä kivimateriaalia. Kuvassa 8 on esitetty eräs kiviarinalla varustettu suurjännitemuuntaja-bunkkeri. Tällainen kiviarinahuoltotaso on määrällä kelillä liukas, ylipäänsä vaikeakulkuinen ja hankala huoltaa. Teräsverkko on uusittava aika-ajoin, mikä on kallista ja hankalaa. Teräsverkon kunnontarkkailukin on erittäin haasteellista teräsverkon kunnan vaihdellessa koko valuma-altaan alalla. Saadakseen luotettavan kuvan teräsverkon kunnosta on se tarkastettava koko alalta joko kivet poistamalla tai alapuolelta. Yhden pisteen tuloksia ei siis voi laajentaa kattamaan koko rakennetta. Kiviarinahuoltotason öljyn läpäisykyky määräytyy olennaisesti käytettävän materiaalin eli kivien koosta sekä niiden latomistavasta. Tämän kaltaista läpäisevää rakennetta on mahdotonta tehdä tasalaatuiseksi tai samanlaisena toistettavaksi ja on siten itsessään jo riski palonsuojauksessa. Mikäli käytetään pieniä kiviä, ei läpäisykyky ole hyvä, jolloin on olemassa ympäristövahingon riski. Kun teräsverkko ruostuu, muodostuu henkilövahinkoriski. Kivien asettelu purku/rakentamisvaiheessa on työlästä ja vaatii pinnalle erillisen kulkutien. Kiviarinan puolesta voidaan sanoa sen olevan yksinkertaisin mahdollinen tapa luoda nestettä läpäisevä mutta palon hapensaantia rajoittava rakenne. Perinteistä kiviarinaa ei ole myöskään suunniteltu kannattelemaan mitään hyötykuormaa ja jo henkilön massa voi osoittautua rakenteelle ja henkilölle itselleen kohtalokkaaksi. Kiviarinarakenne on kallis ja sillä on huono kuormituksen kesto. Tällainen huoltotaso ei täytä nykyisiä standardeja. (Wirén 2017a) (Väisänen 2017)



Kuva 8. Nesteen leviäminen kiviarinalla.

Seuraavassa listataan kuvan 23 mukaisen kiviarinan tärkeimmät ominaisuudet.

- Ei vaadi raskasta laskentaa
- Yksinkertainen
- Liukas, vaikeakulkuinen, vaikea huoltaa, teräsverkko uusittava → työ kallista ja vaikeaa
- Öljyn läpäisykyky huono → ympäristövahingon riski
- Kivien asettelu vaikeaa ja kallista, (purku/rakennus)
- Vaatii pinnalle erillisen kulkutien
- Kallis
- Huono kuormituksen kesto, ei nykystandardin mukainen
- Öljyvuodot täytyy pestä kivistä pois
- Öljynläpäisykyky ei ole määriteltävissä
- Kantavien rakenteiden kunnon tarkkailu vaikeaa

4.1.2 Ontelolaatta-arinan ominaisuudet

Ontelolaatta-arina on hieman pidemmälle mietitty versio valuma-altaan palonsuojauksesta, sillä siinä nesteen läpi päästävien rakojen koko on standardoitavissa ja toistettavissa asennuksen käyden myös nopeasti. Ontelolaatta-arinoissa on betonista valmistettuja ontelolaattoja vierekkäin ja limittäin ja niiden välissä on raot, joista öljyn on tarkoitus päästä valumaan alas. Se on nopea asentaa neliömääräänsä nähden mutta voidaan asentaa vain uusiin kohteisiin ennen muuntajaa ja ontelolaatat ovat erittäin raskaita pinta-alaansa nähden. Ontelolaatta-arinassa ei myöskään ole kovin paljon läpäisevää pintaa arinan pinta-alaan nähden ja öljyvudon sattuessa se vain levittää paloa pikemmin kuin tukahduttaa sitä kuten kuvasta 9 voi havaita. Ongelmana ovat myöskin laattarakenteesta muodostuvat pitkät leveät, kuvan 10 mukaiset, raot tai saumat, koska huoltotason päällä liikuttaessa on vaarana astua niihin ja vahingoittaa itseään. Ontelolaatta-arina myös rapautuu sään ja öljyn läsnäolon vaikutuksesta ja kerää päällensä sammalta yms. kuvan 11 mukaisesti, joka voi muodostaa riskin liukastua. Lisäksi jos huoltotasolla on öljyvalumia, se on liukas eikä sen päälle voi asettaa esimerkiksi tikkaita turvallisesti. Huolto ja laattojen vaihto on erittäin hankalaa. (Wirén 2017a) (Väisänen 2017)



Kuva 9. Öljypisaran leviäminen ontelolaatta-arinassa.



Kuva 10. Aukko ontelolaatta-arinan elementtien välissä.



Kuva 11. Ontelolaattaelementin rapautuminen.

Seuraavassa on listattuna ontelolaatta-arinan tärkeimmät ominaisuudet.

- Yksinkertainen
- Helposti mukautettavissa
- Liukas (öljy, vesi, lumi), pitkät ja leveät raot → vaarallinen käyttää
- Raskas, kallis, huono kuormituksen kesto
- Ei voida rakentaa käytössä olevalle muuntajalle → soveltuu vain uusiin kohteisiin
- Huollon tarve → veden pääsy onteloihin, rapautuminen
- Ei nykystandardin mukainen huoltotaso
- Suuri palopinta, $14,5 \text{ m}^2$ / ontelolaatta (1,2 m * 12 m)
- Kalliit ja raskaat tukirakenteet
- Öljyvuodot täytyy pestä laatan pinnasta pois
- Rapautuminen voimakasta

4.1.3 LHD-reikälevyn ominaisuudet

LHD-reikäpelti on uusi tanskalainen vastaus palavien aineiden valuma-aldien ja erityisesti öljyjäähdytteisten muuntajien palonsuojaukseen. Rakenne koostuu erillisistä rei'itetyistä ja muotoon kantatuista levyelementeistä, kuten kuvassa 12 on esitetty. Etuna edellisiin verrattuna on kevyt rakenne, joka mahdollistaa vaivattoman asennuksen ja helpon tuennan. Rakenne on myös yksinkertainen ja voidaan toteuttaa alusta loppuun levytyökeskuksella ja kanttikoneella nopealla tahdilla. Valmistaja lupaa 4,1 % pinta-alasta olevan läpäisevää ja tukahduttavan öljypalon 6 sekunnissa. Tässäkin on kuitenkin sama ongelma kuin aikaisemmissakin palonsuojaus-ratkaisuissa, sillä sammutuspinta on sama kuin työskentelypinta, mikä tekee siitä haavoittuvan iskuille ja mahdollisesti vaarallisen liukkaan roskien ja jään- nösöljyn vuoksi. Sopivasta iskusta aiheutunut reikä pinnassa saattaa tehdä koko rakenteesta hyödyttömän palonsuojausmielessä. (PcP 2013a, s. 3-12)



Kuva 12. LHD-Reikälevy (Rakovic 2015, s. 8).

- Yksinkertainen rakenne
- Kevyt
- Liukas (öljy, vesi, lumi)
- Roskat tukkivat valumareivät → huollon tarve
- Öljyn läpäisykyky huono talvella
- Iskut ja palot kuormittavat suoraan kantavaa rakennetta

- Vaatii maadoituksen jokaisen kasetin osalta
- Irto-osien määrä suuri
- Ei sovellu pohjosiin oloihin lumen, jään tai roskaantumisen vuoksi
- Öljyvuodot täytyy pestä pinnasta pois
- Kantavien rakenteiden kunnontarkkailu vaikeaa

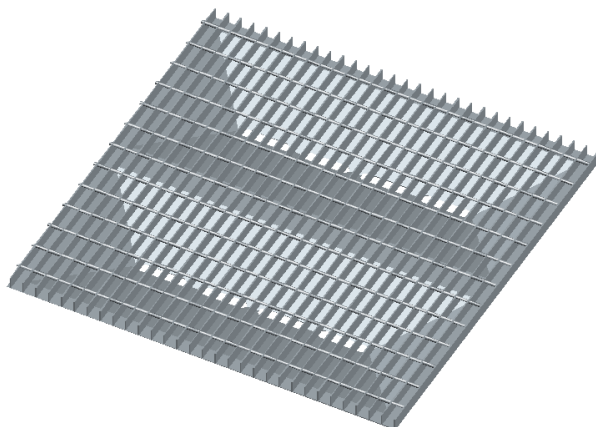
4.1.4 Meiser Stephuit FH

Meiserin valmistama Stephuit FH on olennaisilta osiltaan LHD-reikälevyn kaltainen ja siihen pätee samat hyödyt sekä haitat (Finnritilä 2012 s. 19–21).

4.1.5 Liekkiloukku-palonsuojarakenteen ominaisuudet.

Edellisiä palonsuojarakenteita tarkastellessa käy ilmeiseksi, että tällä saralla ei ole vielä keksitty täydellistä pitkäaikaisratkaisua, joka olisi tehokas, turvallinen sekä helppo huoltaa ja asentaa. Äsken lueteltujen palonsuojaimien puutteista ja epäkohdista tehtiin lista, jonka perusteella alettiin ideoida täysin uudenlaista rakennetta, jossa em. puutteita ei löytyisi. Rakenteen tuli olla kevyt, kuormitettavissa sekä kestävä. Sen täytyi päästää nesteet ja roskat lävitsensä nopeasti mutta rajoittaa kuitenkin tarpeeksi mahdollisen palon hapensaantia, jotta lämpö ei ehtisi rakenteita vaurioittamaan. Rakenteen tuli olla myös modulaarinen, yksinkertainen sekä helposti vaihdettavissa/asennettavissa. Myös huollon sekä kunnan tarkkailun helppous otettiin tuotekehityksessä huomioon.

Näistä lähtökohdista syntyi kuvan 13 mukainen kaksiosainen palonsuojarakenne.



Kuva 13. Liekkiloukku

Liekkiloukun rakenne on toteutettu kahdesta osasta, joista alempi huolehtii nesteen läpäisystä sekä tulen tukahdutuksesta, kun taas yläpuolella oleva turvaritilä suojaa alempaa rakennetta iskuilta ja antaa samalla pitävän ja kestävä tason työskennellä.

- Sammuttaa palon alle 5 sekunnissa
- Hyvä veden ja öljyn läpäisykyky 950 l/min/m²
- Turvallinen nykystandardin mukainen liukuturvalla varustettu kulku- ja huoltotaso
- Palonsuojakasettia voidaan käyttää kaikilla tarkoitukseen soveltuvilla markkinoilla olevilla turvaritilöillä
- Vahva ja kevyt rakenne, tason kantavuus voidaan mitoittaa asiakkaan tarpeen mukaan
- Voidaan asentaa vanhoihin ja uusiin rakenteisiin, pieni rahtikustannus
- Asennus voidaan tehdä ilman keskeytystä, käytön aikana
- Kevyt rakenne, voidaan asentaa ilman nosturia, paino vain 1/10 kiviarkin painosta.
- Itsepuhdistuva (sadevesi huuhtelee)
- Pitkä käyttöikä, kuumasinkitty rakenne
- Matala rakenne → vanhoissa kohteissa valuma-altaan tilavuus kasvaa ja uusissa kohteissa pienentää altaan rakennuskustannuksia
- Rakenteessa 2,4 % ilmakehää
- Soveltuu pohjoisen oloihin
- Saadaan tasomainen hyvin liikuttava turvallinen pinta koko valuma-altaan alueelle
- Jatkuva kunnonvalvonta, rakenteet näkyvissä
- Edulliset rakennuskustannukset
- Huoltovapaa
- Ympäristöystävällinen tuote, ei synny ongelmajätettä
- Öljyvuodon jälkeen ei vaadi pesua (pinta ei ole liukas öljyisenäkään, pito paranee vielä liukuturvaritilää käyttämällä)
- Palonsuojakasetti vahva rakenne, kestää lumikuormat

4.1.6 Palonsuojainten vastakkainasettelu

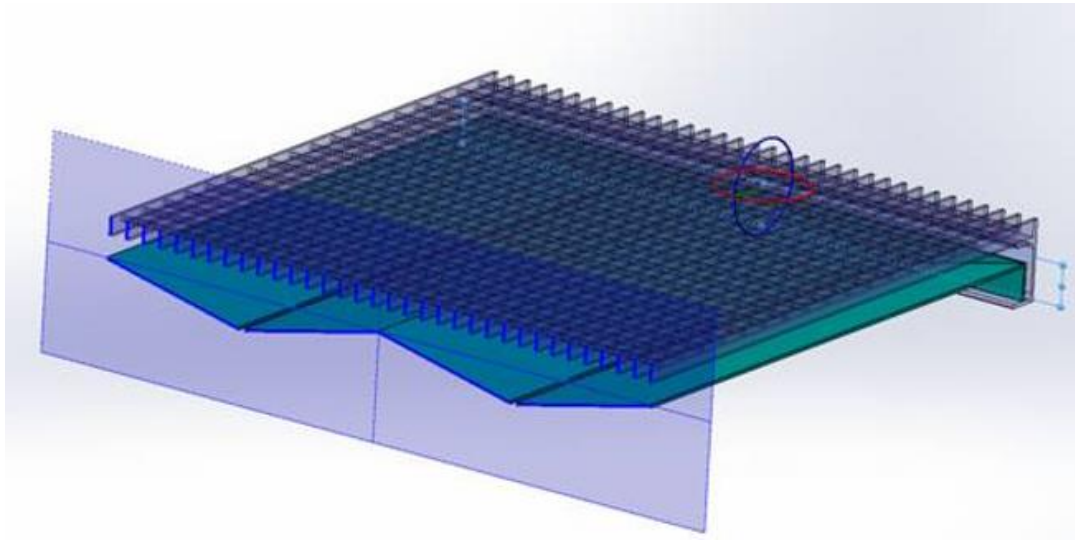
Vertailuun otettiin kehitettävän tuotteen lisäksi kolme jo olemassa olevaa ja yleisesti käytettyä ratkaisua, joita palavien aineiden valuma-aitaiden palonsuojauksessa on käytetty etenkin suurjännitemuuntajien yhteydessä. Vertailun tulokset on avattu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Suurjännitemuuntajien valuma-altaiden palonsuojaustavat palonsuoja-kasettiin verrattuna.

	Kiviarina	Ontelolaatta	LHD/ Stephuit FH	Palonsuoja-kasetti
Modulaarinen		X	X	X
Voidaan asentaa jo olemassa oleviin kohteisiin	X		X	X
Helppo kunnan tarkastus			X	X
Helppo huoltaa			X	X
Standardoitu		X	X	X
Iskunkestävä				X
Rakennustelineen tai muun lisälaitteen kestävä				X
Nopeasti asennettava		X	X	X
Turvallinen kävellä				X
Korroosionkestoisuus [vuotta]		50<		20–60
Pitkäikäinen		X		X

4.2 Palonsuojakasetin rakenne

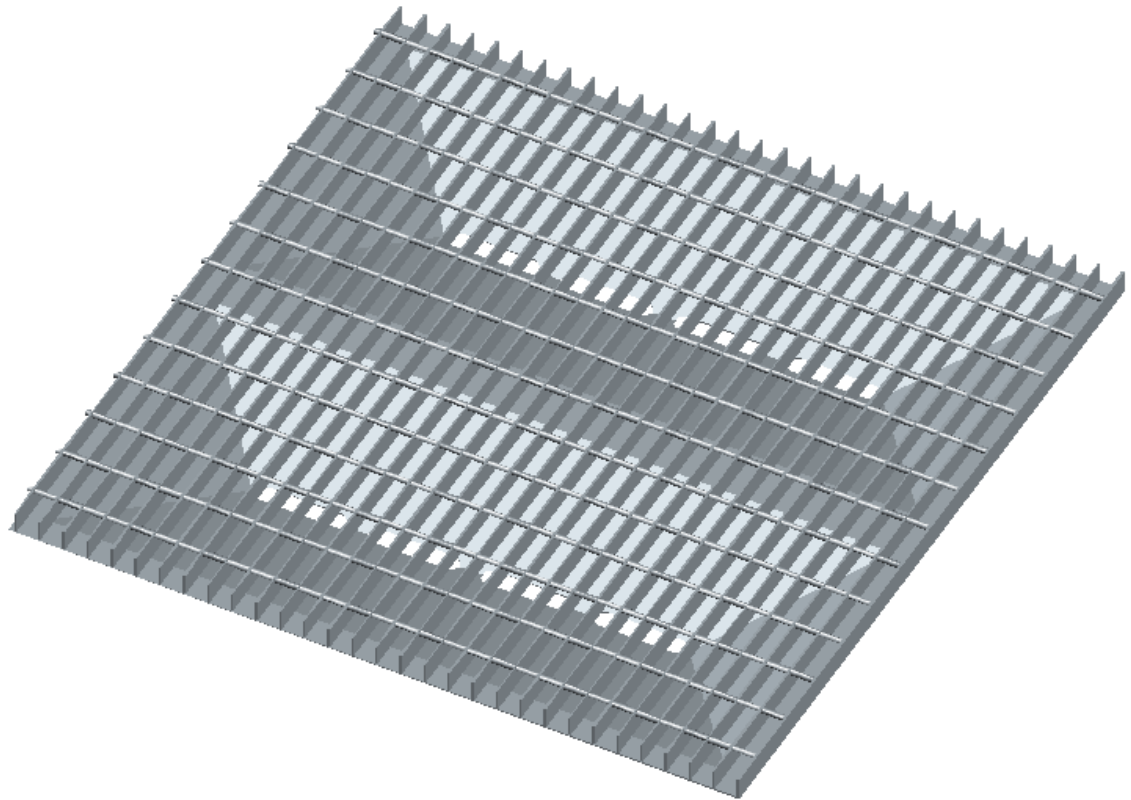
Liekkiloukku- palonsuojarakenne koostuu kolmesta elementistä, rungosta, tasomaisesta pinnasta ja itse palonsuojakasetista kuten kuvasta 14 voi havaita.



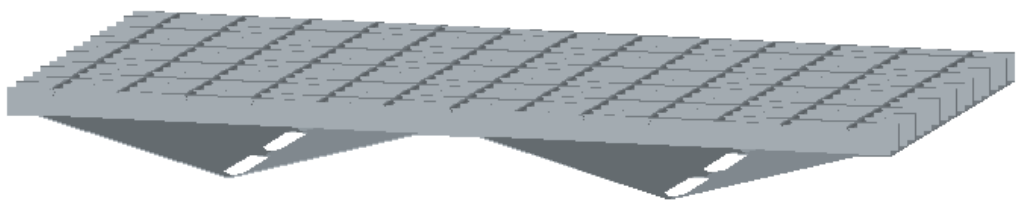
Kuva 14. Palonsuojarakenteen ensimmäinen versio.

Palonsuojarakenne on kuitenkin uusien vaatimusten sekä valmistus- että asennusteknisten seikkojen vuoksi muuttanut muotoaan. Siinä missä palonsuojakasetti ja liukaturvaritilä olivat ennen erillään ja asennettiin runkorakenteeseen, on nyt palonsuojakasetti sekä liukaturvaritilä asennettu yhteen modulaariseksi rakenteeksi, jonka voi muutamalla kiinnityskohdalla asentaa runkorakenteen päälle. Tämä mahdollistaa nopeamman asennuksen ja kestävämmän rakenteen kun palonsuojakasetti voi käyttää liukaturvaritilää tukenaan. Uudenlainen palonsuojarakenne on esitetty kuvissa 15 ja 16.

Muotoilun muuttumiseen vaikutti myös jäätymisestä johtuvat voimat ja niiden väistäminen. Tästä on kerrottu lisää omassa osiossaan.



Kuva 15. Palonsuojarakenne (Fintekra Oy)



Kuva 16. Palonsuojarakenteen leikkaus

Rakenteen jako kolmeen erilliseen elementtiin mahdollistaa tehtävien jakamisen eri elementtien kesken. Tällöin palonsuojakasetin ei tarvitse kannatella suurta hyötykuormaa lumikuorman lisäksi vaan sen rakenne ja materiaalivahvuudet voidaan suunnitella toimimaan täysin palonsuojauksen kannalta.

4.2.1 Palonsuojakasetti

Palonsuojakasetin tuli alusta asti täyttää useita vaatimuksia, joista tärkein vaatimus palonsuojakasetilta oli toimivuuden varmistus suurenkin vuodon ja palon tapauksessa. Kasetin geometria suunniteltiin sellaiseksi, että se päästäisi palavan nesteen lävitsensä mahdollisimman nopeasti tukahduttaen alleen syttyneen palon myöskin mahdollisimman pikaisesti. Näitä kahta parametria keskenään vertailemalla päästiin optimaaliseen arvoon kasetin pinta-alan sekä kasetissa olevien aukkojen pinta-alan suhteen. Toinen vähintäänkin yhtä tärkeä kasettia määrittävä ominaisuus oli modulaarisuus: kasetti tuli olla helposti asennettavissa ja vaihdettavissa, sen tuli sopia moneen paikkaan ja olla helposti muokattavissa kulloiseenkin tilanteeseen sopivaksi. Kasetin muoto suunniteltiin myös sellaiseksi, että se toimisi samalla vahvikkeena itsellensä eikä tarvitsisi erillistä tuentaa. Muodon suunnitteluun vaikutti myös pyrkimys tehdä kasetista mahdollisimman vähän palavaa ainetta ympäristöönsä levittävä, jolloin mahdollista paloa olisi pinnalla paljon helpompi hallita. Jään muodostumisesta sekä lämpölaajenemisesta johtuvat voimat ja niiden huomioiminen vaikuttivat myös voimakkaasti kasetin muotoiluun. Millimetrin paksu teräs ei deformoitumatta kovin suuria kuormia kestä, joten tärkeäksi tuli muotoilla kasetti niin, että nämä voimat voitiin pikemminkin välttää kuin vastaanottaa.

4.2.2 Huoltotaso

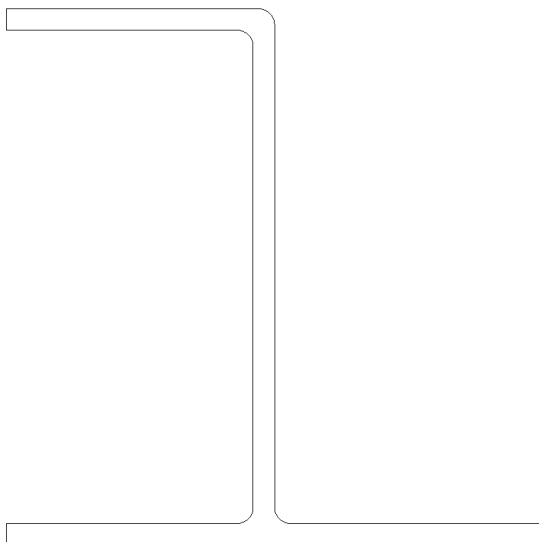
Entisissä palonsuojaratkaisuisissa ei tarkastelun mukaan tasopinta sovellu kovin hyvin huoltotasoksi. Epäkohtia oli useita aina jäykkyyden vähydestä liukkauteen. Nämä epäkohdat on esitetty kattavammin vertailu-osiossa. Lähtötilanne Liekkiloukku-palonsuojakasetin ja sitä ympäröivän rakenteen kanssa oli, että sen tulee soveltua myös nykystandardit täyttäväksi huoltotasoksi. Sen tulisi olla muotoluja, kestävä, turvallinen astua sekä helppo ja halpa asentaa sekä huoltaa. Parhaana ratkaisuna tähän pidettiin pinnastaan karhennettua turvaritilää sen ominaisuuksien vuoksi: se kestävä suuriakin raskuuksia (vaatimus: 5 kN/m² hyötykuorma), on helppo asentaa sekä on helposti saatavilla.

Edellisissä ja nykyisissäkin ratkaisuisa on kulkutason pinnasta suurin osa umpinaista pintaa, joka varsinkin lumettuvissa ja roskaantuvissa oloissa voi muodostua ongelmaksi. Liukaturvaritilää huoltotasona käyttäen on pinnasta noin 84 % aukkoa, jolloin lumen ja roskien kertyminen tulee olemaan paljon pienempi ongelma. Liukaturvaritilä päästää lävitseen kohtuullisen lumisateen sekä roskat, eikä ole suurenkaan öljyvuodon jälkeen liukas. (Finnritilä 2017 s. 16 & 26)

4.2.3 Runko

Rungon kehitys on seurannut tiiviisti palonsuojakasetin kehitystä. Pystysuorien pintojen poistuminen palonsuojakasetista tarkoitti että palonsuojakasetin saattoi nyt asentaa runkorakenteen päälle ja suoraan liukaturvaritilän alle. Tämän johdosta runkorakenteena päädyttiin käyttämään IPE-palkkeja niiden jäykkyyden sekä muodon vuoksi. Rungon mitoitusperusteet on esitetty lujuuslaskenta-kappaleessa.

Rungon ideoinnissa lähdettiin U-palkista sen käytännöllisten laippojen ja hyvän muotojäykkyyden vuoksi. Alun perin U-palkkien tuli olla aukot vastakkain, jotta palonsuojakasetin voisi helposti asetella ja kiinnittää alalappoihin. Ajatuksesta kuitenkin pian luovuttiin, kun alettiin pohtia palonsuojakasetin asennusta runkoon itse työmaalla: jos U-palkkien etäisyys olisi vähänkään niukka, olisi palonsuojakasettia erittäin vaikea pujottaa runkoon. Sen sijaan päädyttiin käyttämään U-palkkia, jonka selkäpuolelle alas tultaisiin kiinnittämään laippa kuvan 17 mukaan.



Kuva 17. Rungon vanha profiili.

Palonsuojakasetin toimintaa jäätymistilanteessa tarkasteltaessa jouduttiin kasetin geometriaa muuttamaan, jolloin tuenta voidaan toteuttaa perinteistä U-palkkia hyväksikäyttäen. Edellä esitetty laipallinen U-palkki sopii erikoistilanteisiin, jolloin palonsuojakasetin täytyy sijaita tietyn matkan päässä huoltotason alapinnasta.

4.3 Palonsuojakasetin toiminta

Palonsuojarakenne koostuu huolto- ja kulkutasona toimivasta liukaturvaritilästä, sekä sen alle tulevasta palonsuojakasetista, joka on viistoista pinnoista koostuva levyrakente. Tämä yhdistelmä viistoja pintoja sekä niiden päällä kulkevia liukaturvaritilän kantoteräksiä toimii ohjurina nesteille sekä kiinteille objekteille. Viistot pinnat ohjaavat niille putoavan nesteen tehokkaasti poistoaukkoa kohden ja kantoteräksiset rajoittavat mahdollisten roiskeiden alaa vähentäen näin mahdollisen palonsuojarakenteen yläpuolisen nestepalon alaa.

Viistot pinnat myös kasvattavat itsepalonsuojakasetin pinta-alaa, jolloin rakenteellinen pinta-ala on suurempi kuin suojattavan alueen pinta-ala. Tämä mahdollistaa fyysisesti suurempien aukkojen käyttämisen niiden suhteellisen pinta-alan ja siten toiminnan pysyessä samana kuin suoralla pinnalla olevien pienempien aukkojen. Toisin sanoen aukon koko määräytyy sen isäntärakenteen profiilista, jos aukon pinta-alan suhde pidetään samana isäntärakenteen pinta-alaan nähden. Rakenteellisen pinta-alan suhde suojattavaan pinta-alaan on merkittävä myös lämpenemisen kannalta. Suurempi pinta-ala toimii tehokkaammin jäähdyttimenä sen haihduttaessa mahdollisesta palosta syntynyttä lämpöä tehokkaammin kuin pienempi pinta-ala. (Valtanen 2016, s. 196) Liukaturvaritilän kantoteräksiset myös toimivat jäähdyttävänä rakenteena omalta osaltaan.

Vaikkakin palolaskuissa olennaista onkin vain projisoitu aukon koko palopinta-alaan nähden, on aukon todellisella fyysisellä koolla kuitenkin merkitystä palonsuojakasetin nesteenläpäisevyyttä laskettaessa. Palonsuojakasetin viistot pinnat myös mahdollistavat tietyillä nestevolyymeillä hydrostaattisen paineen muodostumisen, jolla on kiihdyttävä vaikutus nesteiden virtausmäärää laskettaessa. (Valtanen 2016, s. 185-187)

4.3.1 Huollettavuus ja kunnan tarkkailu

Erittäin tärkeänä rakennetta suunniteltaessa pidettiin tuotteen modulaarisuutta, niin että se olisi mahdollisimman yksinkertainen ja helposti asennettavissa sekä vaihdettavissa. Rakenteen tuli olla myös helppo purkaa ja sen kunto tuli olla helposti ja turvallisesti tarkastettavissa.

Liekkiloukun palonsuojakasetit ovat koko ajan näkyvillä, joten kunnan tarkkailu on vaivatonta. Rakenteen alle pääsee helposti, sillä jokainen, kooltaan 1 m² moduuli, voidaan irrottaa vain 4 kiinnikettä avaamalla. Moduulin poisto ja siirtokin on suhteellisen vaivatonta, sillä 1 m² moduuli painaa vain noin 35 kg.

Liekkiloukun ja huoltotason rakenne on toteutettu niin, että liekinestin puhdistuu sadeveden vaikutuksesta. Palonsuojakasetille mahdollisesti päätyneet roskat kulkeutuvat sadeveden mukana palonsuojarakenteen alle valuma-altaaseen palonsuojakasetin viistojen pintojen sekä pohjan aukkojen ansiosta. Näin ollen ei Liekkiloukku tarvitse olla jatkuvasti valvomassa ja puhdistamassa, jotta se säilyisi toimintakuntoisena.

4.4 Turvallisuus

Palonsuojakasetin ja liukaturvaritilän väliin mahtuu neliölle noin 30 dm³ öljyä. Lisäksi liukaturvaritilän kantoteräksiset ohjaavat virtausta ja kasetin läpi menevän aineen tilavuusvirtauksen ollessa yli 900 l/m²/min voi palonsuojarakenteen asentaa esimerkiksi suurjännitemuuntaja-bunkkerissa aivan tuuletusaukkojen ja sisääntulotason tasaan. Näin palonsuojarakenteen ja muiden kulkuteiden välille ei tule mitään porrasta ja palonsuojarakenteeseen saadaan koko alaltaan täysin tasaiseksi, jolloin huoltotaso täyttää nykystandardin SFS-EN ISO 14122-2:2016 vaatimukset.

Turvallisuuden takaamiseksi palonsuojakasetille tehtiin HAZOP-riskianalyysi, joka on esitetty liitteessä X.

4.5 Palonsuojakasetin materiaalivalinta

Rakenteen tuli olla tehty lämpöä ja korroosiota kestävästä materiaalista, joka olisi tarpeeksi lujaa kestääkseen lumikuorman mutta tarpeeksi kevyttä, jotta rakenne olisi helppo asentaa

ilman nostimien apua. Kasetin materiaalin tuli myös olla tarpeeksi suuren murtovenymän omaava ja muovattavuudeltaan hyvä, jotta se kelpaisi syvävetoon. Olennaiseksi materiaali-valintakriteeriksi muotoutui myös materiaalin lämpölaajenemiskerroin, ominaislämpökapasiteetti, sekä lujuusominaisuuksien säilyminen sitä lämmitettäessä. Lähempään tarkasteluun otettiin ruostumaton teräs, syvävedettävä, kylmävalssattu alapii-alueen teräs DC04 sekä hitsattava, myöskin kylmävalssattu DC01. Tästä lähin DC01-DC07-teräksistä yhdessä yhteydessä puhuttaessa käytetään niistä ryhmänimitystä DC0X.

4.5.1 Metallien ominaisuudet

Taulukossa 2 on esitetty tyypillisten ruostumattomien teräksien fysikaalisia arvoja.

Taulukko 2. Tyypillisten ruostumattomien terästen fysikaalisia arvoja. (Mukaihen: Outo-kumpu 2013, s. 55)

Ominaisuus	Ruostumattoman teräksen tyyppi			
	Ferriit-tinen	Martensiittinen	Duplex	Austeniittinen
Tiheys [g/cm ³]	7,7	7,7	7,8	7,9-8,1
Kimmokerroin [GPa]	220	215	200	190-200
Lämpölaajeneminen [*10 ⁻⁶ /C] 200-400 C	11	12	15	17-18
Lämmönjohtavuus [W/mC] 20C	30	30	12-15	15
Lämpökapasiteetti [J/kgC] 20C	460	460	500	500

Taulukossa 3 taas on esitetty DC01-teräksen vastaavat arvot ja taulukossa 3 vielä DC0X-terästen mekaaniset ominaisuudet.

Taulukko 3. kylmämuovattun DC01-teräksen fysikaaliset ominaisuudet. (mukailten: Kinmachi 2017)

		DC01
Tiheys [g/cm ³]		7,78
Kimmokerroin [GPa]		206
Lämpölaajeneminen [*10 ⁻⁶ /C]		11,7
Lämmönjohtavuus [W/mC]		73,3

DC0X-terästen fysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat eri laatujen välillä hyvin vähän ja erot keskittyvätkin mekaanisiin ominaisuuksiin sekä muovattavuuteen. (SFS-EN 10130 2007, s. 18)

Taulukko 4. DC0X-teräksien mekaaniset ominaisuudet (SFS-EN 10130 2007, s. 18)

Nimike	Numerotunnus	Standardin EN 10020 mukainen luokittelu	Pinnanlaatu	Myötöjuovattomuus	R_e MPa	R_m MPa	A_{80} %	r_{90} %	n_{90} %	Kemiallinen koostumus, sulatusanalyysi				
										C max. %	P max. %	S max. %	Mn max. %	Ti max. %
DC01 ^e	1.0330	Seostamaton laatuteräs ^f	A	-	-280 ^g	270/410	28	-	-	0,12	0,045	0,045	0,60	-
			B	3 kk										
DC03	1.0347	Seostamaton laatuteräs ^f	A	6 kk	-240 ^g	270/370	34	1,3	-	0,10	0,035	0,035	0,45	-
			B	6 kk										
DC04	1.0338	Seostamaton laatuteräs ^f	A	6 kk	-210 ^g	270/350	38	1,6	0,180	0,08	0,030	0,030	0,40	-
			B	6 kk										
DC05	1.0312	Seostamaton laatuteräs ^f	A	6 kk	-180 ^g	270/330	40	1,9	0,200	0,06	0,025	0,025	0,35	-
			B	6 kk										
DC06	1.0873	Seostettu laatuteräs	A	Rajaton	-170 ^h	270/330	41	2,1	0,220	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3 ^j
			B	Rajaton										
DC07	1.0898	Seostettu laatuteräs	A	Rajaton	-150 ^h	250/310	44	2,5	0,230	0,01	0,020	0,020	0,20	0,2 ^j
			B	Rajaton										

Vaikka ruostumattomien terästen lujuus sekä korroosionkesto puoltaisivatkin niitä tähän käyttökohteeseen (Outokumpu 2013, s. 58-60), voidaan taulukoista 3 ja 4 huomata lämmönjohtavuuden olevan DC0X-teräksillä paljon ruostumattomia teräksiä korkeampi. Tämä puolestaan on palonsuojusrakenteita suunniteltaessa kenties merkittävin yksittäinen arvo metal-

lilla, sillä, jos metalli ei voi johtaa/haihduttaa palosta syntynyttä lämpöä pois, sitoo se suuremman osan lämpöenergiasta itseensä. Tämä taas johtaa nopeammin muodonmuutoksiin ja saattaa muodostua ongelmaksi uudelleensyttymisen kanssa. (Valtanen 2016, s. 195-196)

4.5.2 Korroosionkesto

Palonsuojarakenteella tulee olla erittäin hyvä korroosionkesto sen tullessa sijaitsemaan avoimessa ulkoilmassa ympärivuotisesti. Koska DC0X-teräksillä ei luontaisesti ole kummoistaakaan suojaa korroosiota vastaan, päädyttiin suojaamaan pinnat kuumasinkitsemällä.

Kuumasinkityn rakenteen korroosionkesto tarkistettiin standardista EN-ISO 14713-1, joka käsittelee sinkittyjen rauta-teräsrakenteiden korroosionkestävyyttä (SFS-EN ISO 14713-1 2009, s. 14). Tätä varten tarkistettiin ympäristön korroosioluokka standardista SFS-EN ISO 9223. Palonsuojakasetin korroosiolaskuissa käytettäväksi ympäristöstä johtuvaksi syövyttävyytsluokaksi valittiin C3, sen antaessa hyvän keskiarvon Suomen olosuhteisiin. C3-syövyttävyytsluokassa vaihtelee korroosionopeus $0,7 - 2,0 \mu\text{m/a}$ kuten taulukosta 5 voi todeta. Taulukossa on myös kuvailtu kunkin syövyttävyytsluokan ympäristöä. (SFS-EN ISO 9223 2012, s. 3-4).

Taulukko 5. Korroosiolaskuissa käytetyt korroosiokategoriat. (SFS-EN ISO 9223 2012, s. 4).

Syövyttävyyden luokka C Sinkin korroosionopeus (perustuen yhden vuoden altistukselle), r_{corr} ($\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$) ja korroosion taso	Tyypilliset ympäristöt (esimerkkejä)	
	Sisäilma	Ulkoilma
C1 $r_{\text{corr}} \leq 0,1$ Erittäin pieni	Lämmitetyt tilat, joissa on pieni suhteellinen kosteus ja saasteiden määrä merkityksetön, esim. toimistot, koulut, museot	Kuiva tai kylmä vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa hyvin vähän saasteita ja kosteutta, esim. tietyt aavikot, keskinen arktinen alue/Etelämanner
C2 $0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$ Pieni	Lämmittämättömät tilat, joiden lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihtelevat. Harvoin tapahtuvaa kondensoitumista ja vähäinen saasteiden määrä, esim. varastot, urheiluhallit	Laukkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa vähän saasteita ($\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), esim. maaseutu, pienet kaupungit. Kuiva tai kylmä vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa lyhytaikaisesti kosteutta, esim. aavikot, subarktiset alueet
C3 $0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2$ Keskimääräinen	Tilat, joissa kohtalaisesti kondensaatiota ja saasteita tuotantoprosesseista, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot, meijerit	Laukkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa kohtalaisesti saasteita ($\text{SO}_2: 5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tai vähäinen kloridien vaikutus, esim. kaupunkialueet, rannikkoalueet, joissa pieniä määriä klorideja, subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet, joissa vähän saasteita
C4 $2 < r_{\text{corr}} \leq 4$ Suuri	Tilat, joissa paljon kondensaatiota ja saasteita tuotantoprosesseista, esim. teollisuuslaitokset, uimahallit	Laukkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa paljon saasteita ($\text{SO}_2: 30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tai huomattava kloridien vaikutus, esim. saastuneet kaupunkialueet, teollisuusalueet, rannikkoalueet, joissa ei ole merivesiroiskeita, altistuminen jäänsulatusuoloille, subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet, joissa kohtalaisesti saasteita
C5 $4 < r_{\text{corr}} \leq 8$ Erittäin suuri	Tilat, joissa erittäin runsaasti kondensaatiota ja/tai paljon saasteita tuotantoprosesseista, esim. kaivokset, teollisiin tarkoituksiin rakennetut luolat, ilmastoimattomat hallit subtrooppisilla ja trooppisilla vyöhykkeillä	Laukkeat ja subtrooppiset vyöhykkeet, ilmasto-olosuhteet, joissa erittäin paljon saasteita ($\text{SO}_2: 90 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja/tai merkittävä kloridien vaikutus, esim. teollisuusalueet, rannikkoalueet, katetut tilat rannikolla
CX $8 < r_{\text{corr}} \leq 25$ Äärimmäinen	Tilat, joissa lähes pysyvää kondensaatiota tai pitkiä altistumisia äärimmäiselle kosteudelle ja/tai paljon saasteita tuotantoprosesseista, esim. ilmastoimattomat hallit kosteilla trooppisilla vyöhykkeillä yhdessä ulkoilman saasteiden sekä ilmassa olevien kloridien ja korroosiota kiihdyttävien hiukkasten kanssa	Subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet (erittäin pitkiä aikoja kosteutta), ilmasto-olosuhteet, joissa erittäin paljon saasteita (SO_2 yli $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mukaan lukien tuotantoprosessien saasteet ja/tai voimakas kloridien vaikutus, esim. äärimmäiset teollisuusalueet sekä rannikko- ja offshore-alueet, joissa ajoittaisia merivesiroiskeita

Alapiiteräksistä ($S_i \leq 0,04$ %) puhuttaessa tulee sinkittävän kerroksen paksuudeksi 70 – 90 μm (Suomen kuumasinkitsijät ry 2007, s. 2). Puhuttaessa 1 mm paksuisista teräksistä, on sinkkikerroksen paksuus kuitenkin huomattavasti alhaisempi ja vaihtelee 35 – 45 μm välillä (SFS-EN 10346 2015, s. 4) (SFS-EN ISO 14713-1 2009, s. 14). Jos korroosionopeus on 0,7 – 2 $\mu\text{m}/\text{a}$, niin silloin 40 μm paksuinen sinkkikerros kestäisi 20 – 57 vuotta kuten taulukosta 6 voidaan todeta.

Taulukko 6. Sinkkipinnoitettujen teräs- ja valurautarakenteiden kestoikä pinnoitustavan, kerrospaksuuden ja syövyttävyyssluokan mukaan. (SFS-EN ISO 14713-1 2009, s. 14)

Järjestelmä	Viite- standardi	Vähimmäis- paksuus µm	Valittu syövyttävyyssluokka (ISO 9223) kestoikä min./max. (vuotta) ja kestävyysluokka (VL, L, M, H, VH)							
			C3		C4		C5		CX	
Kuumasinkitys	ISO 1461	85	40/ > 100	VH	20/40	VH	10/20	H	3/10	M
		140	67/ > 100	VH	33/67	VH	17/33	VH	6/17	H
		200	95/ > 100	VH	48/95	VH	24/48	VH	8/24	H
Kuumasinkitty ohutlevy	EN 10346	20	10/29	H	5/10	M	2/5	L	1/2	VL
		42	20/60	VH	10/20	H	5/10	M	2/5	L
Kuumasinkitty putki	EN 10240	55	26/79	VH	13/26	H	7/13	H	2/7	L
Sherardisointi	EN 13811	15	7/21	H	4/7	M	2/4	L	1/2	VL
		30	14/43	VH	7/14	H	4/7	M	2/4	VL
		45	21/65	VH	11/25	H	6/11	M	3/6	L
Sähkösaostamalla pinnoitettu levy	ISO 2081	5	2/7	L	1/2	VL	1/1	VL	0/1	VL
		25	12/36	H	6/12	M	3/6	M	1/3	VL
Mekaaninen pinnoitus	ISO 12683	8	4/11	M	2/4	L	1/2	VL	0/1	VL
		25	12/36	H	6/12	M	3/6	L	1/3	VL

Kestävyysluokat (VL, L, M, H, VH) luokitellaan sinkittävän rakenteen kestoian suhteen (SFS-EN ISO 14713-1 2009, s. 12):

- a) Erittäin pieni (VL): 0... < 2 vuotta
- b) Pieni (L): 2... < 5 vuotta
- c) Keskimääräinen (M): 5... < 10 vuotta
- d) Suuri (H): 10... < 20 vuotta
- e) Erittäin suuri (VH): ≥ 20 vuotta

Korroosiolta suojautuminen ei koske ainoastaan kemiallista, ympäristötekijöistä johtuvaa korroosiota, vaan myös galvaanista korroosiota. Runkorakenteen sekä liukaturvaritilän ollessa sinkittyä rakenneterästä, olisivat ne reagoineet ruostumattomasta teräksestä valmistetun palonsuojakasetin kanssa, ja näin ollen vähentäneet merkittävästi rakenteen kestoikää. (Teräsrakenneyhdistys 2015, s. 2-6)

Sinkin sulamislämpötilan ollen vain noin 419 °C on aivan mahdollista, että tulipalon aikana sinkkipinnoite ohenee merkittävästi tai jopa katoaa sinkin sulamisen seurauksena. Tämä ei tietenkään vaikuta palonsuojarakenteen paloa tukahduttaviin ominaisuuksiin, mutta sillä on epäsuotuinen vaikutus palonsuojarakenteen korroosionkestoon tulevaisuudessa. (RSC 2017)

4.6 Lujuuslaskenta

Rakenteiden lujuutta laskiessa otettiin huomioon omakuorman lisäksi hyöty- ja lumikuorma mutta myös räjähdyksestä aiheutuva äkillinen kuormitustapaus. Laskenta suoritettiin perinteisiä kaavoja käyttäen sekä varmistettiin erinäisin laskentaohjelmin. Rakenteen stabiilius varmistettiin laskemalla runkorakenteen kestävyys taivutuksen sekä kiepahduksen suhteen. Rungon laipalle laskettiin pistekuormitukselle myös kimmainen sekä plastinen ratkaisu.

4.6.1 kuormat

Liekkiloukku-palonsuojakasetin ja sitä ympäröivän rakenteen lujuutta laskiessa otettiin huomioon rakenteista syntyvän omakuorman lisäksi hyöty- ja lumikuorma, sekä alapuolisessa säiliössä olevan öljyn äkillisestä syttymisestä syntyneen paineen aiheuttama kuorma. Liekkiloukun rakenteesta johtuen suurin osa kuormituksesta normaalitapauksessa vaikuttaa juuri runkorakenteeseen. Muuttuva hyötykuorma vaikuttaa huoltotason lisäksi itse runkorakenteeseen. Itse palonsuojakasettiin vaikuttaa oman painon lisäksi vain lumikuorma. Äkillisessä räjähdystapauksessa syntyvä paineaalto vaikuttaa palonsuojakasettiin, mutta myös rakenteen runkoon, palonsuojakasetin ollessa siinä kiinni.

Lujuuslaskennassa huomioon otetut kuormat on esitetty taulukossa 7. Palonsuojakasetille laskettiin suurin mahdollinen sen kestävä rasitus, joka myös kuvaa miten suuren räjähdysten aiheuttaman paineaallon kasetti voi ottaa vastaan. Näin saatiin runkoa kokonaisuudessaan kuormittavat voimat selvitettyä ja voitiin aloittaa rungon ja rungon tuennan mitoitus.

Taulukko 7. Palonsuojarakenteeseen vaikuttavat kuormat

Kuorman lähde	Kuorma [N/m ²]	Pistekuorma [N]	Kuorma [N/m]
Runko			102
Palonsuojakasetti (1 m ²)	140		
Liukaturvaritilä	265		
Hyötykuorma	5000		
Lumi	2750		
Pistekuorma		1200	
Paineennousu	-340 (testistä)		

Lujuuslaskennassa tulee ottaa myös huomioon teräsrakenteen alentunut lujuus tulipalossa. Kohonnut lämpötila aiheuttaa muutoksia teräsrakenteen lujuuteen ja noin 600 °C asteessa rakenneteräksen lujuus on enää noin 30 % siitä lujuudesta, mitä rakenteella on 20 °C asteen lämpötilassa. (Teräsrakenneyhdistys 1978 s. 25)

Jotta kaasuseos voisi räjähtää palonsuojarakenteen alla, tulee sen olla koostumukseltaan optimaalinen. Tällainen tilanne voi syntyä vain, jos palonsuojarakenteen alla on jo kaasuntuoneita hiilivetyjä, ja hiilivetyjen määrää vähennetään samalla kun hapen määrää nostetaan tuuletuksen avulla. Käytännössä räjähdyskelpoinen seos voi tuulettamattomassa tilassa muodostua vain aukkojen välittömään läheisyyteen ja siten olla kooltaan niin pieni, ettei sillä ole merkitystä.

4.6.2 Runko

Tässä tutkimuksessa palonsuojarakenteen rungon rakenteena käytetään S355 IPE-120 –palkkia, sen ollessa dimensioiltaan sekä kuormituskyvyiltään tarkoituksenmukainen. Rungon jännitystä sekä taipumaa laskettaessa otettiin huomioon omakuorman lisäksi kasetin, huoltotason sekä lumi- tai hyötykuorma, jolloin kokonaiskuormitus varmuuskertoimen ($n=1.5$) kanssa oli maksimissaan 8,17 kN/m. Oletuksena laskuissa oli, että ennen hyötykuorman lisäystä rakenteen päällä oleva lumikuorma on ensin poistettava, jolloin vain toinen kuormista on kerrallaan voimassa. Rungon jännityksiä sekä taipumia laskiessa käytettiin kuormitustapausta, jossa päistään tuetulla palkilla vaikuttaa tasainen voima. Rungon maksimijännitys saatiin kaavalla 1 (Valtanen 2016, s. 317):

$$\sigma_{max} = \frac{yF_{eq}L^2}{8I} \quad (1)$$

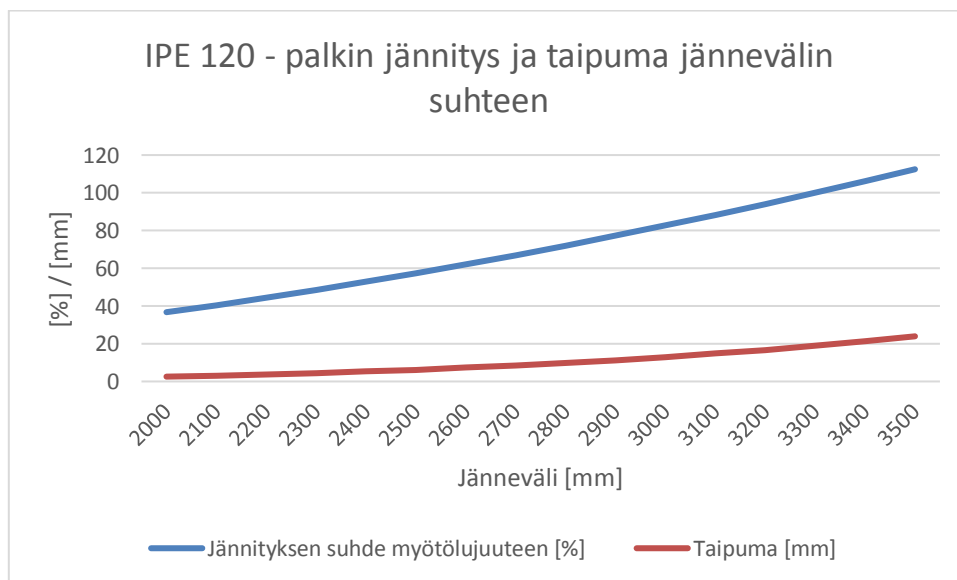
Rungon maksimitaipuma taas saatiin kaavalla 2 (Valtanen 2016, s. 317):

$$\delta_{max} = \frac{5F_{eq}L^4}{384EI} \quad (2)$$

Kaavoissa 1 ja 2 $E=210\text{GPa}$, $y=50\text{ mm}$, $F_{eq}= 8,17\text{ kN/m}$, $L = 1600 - 3500\text{ mm}$, $I=3180000\text{ mm}^4$ ja varmuuskerroin $n=1.5$. Kaavoja 1 ja 2 käyttämällä saatiin taulukon 8 ja siitä johdetun kuvan 18 mukaiset arvot.

Taulukko 8. rungon jännityksen ja taipuman suhde jänneväliin 8.17 kN/m kuormituksella.

Jänneväli [mm]	Jännitys [Mpa]	Taipuma [mm]
1600	49,35849057	1,044624139
1700	55,72110849	1,331299632
1800	62,46933962	1,673285883
1900	69,60318396	2,077277564
2000	77,12264151	2,550351902
2100	85,02771226	3,099968676
2200	93,31839623	3,733970219
2300	101,9946934	4,460581416
2400	111,0566038	5,288409704
2500	120,5041274	6,226445073
2600	130,3372642	7,284060067
2700	140,5560142	8,471009781
2800	151,1603774	9,797431866
2900	162,1503538	11,27384652
3000	173,5259434	12,9111565
3100	185,2871462	14,72064712
3200	197,4339623	16,71398622
3300	209,9663915	18,90322424
3400	222,884434	21,30079412
3500	236,1880896	23,91951139

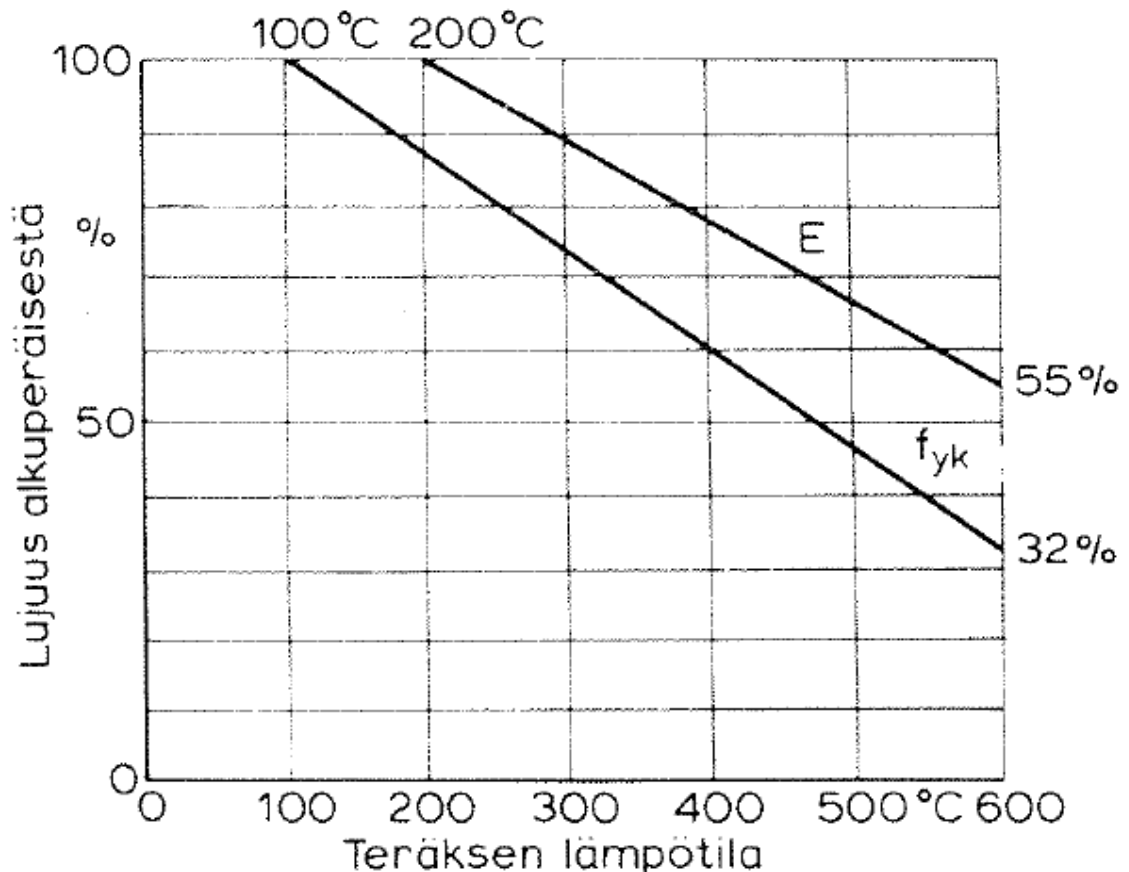


Kuva 18. Rungon jännityksen sekä taipuman suhde jänneväliin.

Runkorakenteen stabiiliutta taivutus- ja kiepahduskestävyyden mukaan laskettaessa sekä palokuormituksen kestoja laskettaessa käytetään runkorakenteen tarkasteltavana jännevälinä

3000 mm, sen ollessa pilottikohteen suurin jänneväli sekä sillä pätee vielä ehto: taipuma $< l/200$.

Runkorakenteen kuormituksen kestoja palotilanteessa tarkasteltavaksi on otettu tilanne, jolloin rakenteella on suurin mitoitettu kuormitus ja tilanne, jolloin kuormitusta aiheuttaa vain omapaino. Näistä kuormituksista johtuvat jännitykset 3000 mm jännevälillä ovat 173 MPa ja 11 MPa, 49 % ja 3 % materiaalin myötörajan. Kuvasta 19 voidaan havaita kuumavalsatun teräspalkin myötörajan laskevan 50 % alkuperäisestä vasta 470 °C asteessa. Jotta materiaalin myötöraja laskisi 3 % alkuperäisestä, on materiaalin oltava jo lähes sulamispisteessä.



Kuva 19. Alemman myötörajan f_{yk} ja kimmomoduulin E riippuvuus lämpötilasta. (Teräsrakenneyhdistys 1978 s. 25)

Näin ollen rakenteen kuormituksenkestoa palotilanteessa laskettaessa on olennaista, missä ajassa runkorakenteen lämpötila nousee 470 °C asteeseen. Tarkastelu tästä on esitetty palolaskenta osiossa.

Runkorakenteen stabiilius varmistettiin laskemalla arvot taivutuskestävyyden sekä kiepahduksen suhteen.

Taivutuskestävyyttä laskettaessa on tiedettävä kyseisen profiilin poikkileikkausluokka, jonka mukaan lasketaan mitoitusarvo taivutuskestävyydelle. Poikkileikkausluokka laskettiin taivutetun uuman sekä puristetun laipan mukaan. Molemmissa tarvittiin kaavalla 3 laskettavaa arvoa ε_l . (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 63)

$$\varepsilon_l = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3)$$

Taivutetun uuman poikkileikkausluokan tarkastaminen aloitetaan laskemalla kaavan 4 mukainen hoikkuus. (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 49)

$$c/t = \frac{h_p - 2(t_f + r_p)}{t_w} \quad (4)$$

Yhtälössä 4 c/t on poikkileikkauksen hoikkuusluku, h_p on palkin poikkileikkauksen korkeus [mm], t_f laipan paksuus [mm], t_w uuman paksuus [mm] ja r_p viisteen säde [mm].

Puristetun laipan poikkileikkausluokan tarkastamiseen tarvitaan taas kaavan 5 mukaista yhtälöä. (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 49)

$$c/t = \frac{\frac{b_p}{2} - (\frac{t_w}{2} + r_p)}{t_f} \quad (5)$$

Kaavassa 5 b_p on laipan leveys [mm].

Tarkasteluun valitun IPE-120 –palkin poikkileikkauksen dimensiot ovat seuraavat: $h_p = 120$ mm, $t_f = 6,3$ mm, $t_w = 4,4$ mm, $r_p = 7$ mm, $b_p = 64$ mm ja $W_{pl} = 607 \cdot 10^3$ mm³.

Vertaamalla kaavoja 3 ja 4 keskenään huomataan, että $c/t < 72 \varepsilon_l$ jolloin taivutetun uuman poikkileikkausluokka on 1. (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 63)

Vertaamalla kaavoja 3 ja 5 keskenään huomataan, että $c/t < 9 \varepsilon_l$ jolloin puristetun laipan poikkileikkausluokka on myöskin 1. (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 63)

Molempien poikkileikkausluokkien ollessa 1 voi riittävän kiertymiskyvyn omaava nivel syntyä eikä ole lommahdusvaaraa, jolloin voimasuureet voidaan laskea plastisuusteorian mukaan.

Palkin poikkileikkausluokan ollessa 1, voidaan taivutuskestävyyden mitoitusarvo laskea kaavalla 6. (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 49)

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6)$$

Kaavassa 6 $M_{c,Rd}$ on taivutuskestävyyden mitoitusarvo [kNm], W_{pl} plastinen taivutusvastus [mm³] ja γ_{M0} osavarmuusluku 1,0. Kaavasta 6 saadaan taivutuskestävyyden mitoitusarvoksi 215,5 kNm.

Maksimimomentti M_{max} kyseessä olevalle palkille voidaan laskea kaavalla 7. (Valtanen 2014, s. 317)

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8} \quad (7)$$

Kaavassa 7 q on tasaisesti vaikuttava kuorma 8,18 kN/m ja l on palkin jänneväli 3 m. Näin ollen suurin momentti palkilla on 3 kNm. Näin ollen ei taivutus tule ongelmaksi rungon stabiliteettia tarkastellessa.

Runkorakenteen stabiliteetin varmistamiseksi tarkistettiin vielä palkin kiepahtamisen riski. Palonsuojamoduulit kiinnitetään runkorakenteeseen siten, että tuentakohtien väliseksi etäisyydeksi tulee suurimmillaan 900 mm. Koko palonsuojarakenteen (runko, palonsuojamoduulit) ollen näin kiinni voidaan palonsuojamoduulin kiinnitysten katsoa toimivan rungolle sivusuunnassa tapahtuvia siirtymiä estävänä tukirakenteena. Jos todetaan puristuvan laipan sivuttaistukien olevan tarpeeksi tiheässä ei palkki kiepahda ja taivutuskestävyys on $M_{c,Rd}$. Palkin kiepahdus on sivuttaistuilla estetty, jos tuentakohtien välit L_c ja siitä seuraava ekvivalentin puristetun laipan hoikkuuden arvo $\bar{\lambda}_f$ ovat kaavan 8 mukaiset. (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 57)

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_l} \leq \bar{\lambda}_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,ed}} \quad (8)$$

Kaavassa 8 k_c on momenttien jakautumisen mukainen korjauskerroin 1,0, $i_{f,z}$ on ekvivalentin puristetun laipan jäyhyys säde ja lasketaan kaavalla 10, λ_l kaavalla 9 laskettavissa oleva materiaalin mekaanisten arvojen mukainen hoikkuus, $\bar{\lambda}_{c0}$ kaavalla 12 laskettavissa oleva ekvivalentin puristetun laipan hoikkuuden yläraja ja $M_{y,ed}$ on tukipisteiden välillä esiintyvä suurin momentin mitoitusarvo. (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 57)

$$\lambda_l = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (9)$$

Kaavasta 9 saadaan materiaalin mekaanisten arvojen mukaisen hoikkuuden arvoksi 76,4.

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_f}{A_f + A_w/3}} \quad (10)$$

Kaavassa 9 I_f on laipan jäyhyys [mm^4] ja lasketaan kaavalla 11, A_f on puristetun laipan pinta-ala 403 mm^2 ja A_w on uuman pinta-ala 473 mm^2 .

$$I_f = \frac{b_p t_f^3}{12} \quad (11)$$

Kaavasta 11 saadaan I_f arvoksi 1333 mm^4 ja sijoittamalla se kaavaan 9 saadaan ekvivalentin puristetun laipan jäyhyysäteeseen $i_{f,z}$ arvoksi $1,54 \text{ mm}$.

$$\bar{\lambda}_{c0} = \bar{\lambda}_{LT,0} + 0,1 \quad (12)$$

Kaavassa 12 $\bar{\lambda}_{L,0}$ arvo on valssatuissa kaksoisymmetrisissä I-profiileissa $0,4$, jolloin $\bar{\lambda}_{c0}$ arvoksi tulee $0,5$.

Syöttämällä edellisistä kaavoista ja taulukoista saadut arvot kaavaan 8 saadaan varmistettua rakenteen tuentojen täyttävän ehdot palkin kiepahduksen estämiselle. Kaavan 8 ollen ratkaistussa muodossa $7,65 \leq 35,91$ voidaan todeta, ettei nykyisillä tuennoilla ole riskiä runkorakenteen palkkien kiepahdukselle.

Runkorakenteen laipalle laskettiin vielä kimmainen sekä plastinen ratkaisu pistekuormitettavuudelle. Laskuissa käytettävät kaavat 13 ja 14 on johdettu liitteessä IX esitetyllä tavalla. Kimmotilassa suurin laipan kestävä pistekuormitus P_k laskettiin kaavalla 13.

$$P_k = \frac{f_y t_f^2}{2,86 \gamma_{M0}} \quad (13)$$

Kaavassa 13 f_y on materiaalin myötöraja 355 MPa , t_f on laipan paksuus $6,3 \text{ mm}$ ja γ_{M0} on varmuuskerroin $2,5$

Plastinen ratkaisu suurimmalle laipan kestäväälle pistekuormitukselle laskettiin kaavalla 14.

$$P_k = \sqrt{2} f_y t_f^2 \left[1 - \frac{\sigma_m^2}{f_y^2} \right] \frac{1}{\gamma_{M0}} \quad (14)$$

Kaavassa 14 σ_m on puristuksesta johtuva jännitys 0 MPa .

4.6.3 Palonsuojakasetti

Palonsuojakasettiin ei kohdistu muita rasituksia kuin lumi-, ja nestekuorma lumikuorman ollen näistä kahdesta suurempi. Laskennassa oletettiin, ettei palonsuojakasettiin kohdistu kerrallaan kuin toinen näistä kuormista.

Lumikuormaa kasetille laskiessa noudatettiin standardin SFS-EN 1991:2002 1-2 mukaista laskentakaavaa, jolloin kuorma mitoitetaan kaavan 15 avulla.

$$F_d = \gamma_f F_{rep} \quad (15)$$

Kaavassa 3 F_d on kuorman mitoitussarvo, γ_f on kuorman osavarmuusluku ja F_{rep} on kuorman edustava arvo, joka lasketaan kaavalla 16.

$$F_{rep} = \Psi F_k \quad (16)$$

Kaavassa 16 Ψ on kuorman pienennyskerroin ja F_k on kuorman ominaisarvo (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 35).

Pienennyskerroimeksi valittiin käytettävän Ψ_0 :n arvoa 0.7 (Teräsrakenneyhdistys 2010 s. 35).

Tuloksia tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että kasetin ja ritilän välisen tilan täytyttyä yhä suurempi osa kuormasta tulee jakautumaan ritilän päälle, joten todellinen jännitys tulee jäämään laskennallisen jännityksen alapuolelle. Laskenta suoritettiin siten, että eri tuentakombinaatioille laskettiin maksimaalinen kuormituksenkesto. Näin voitiin luoda ohjeet kiinnityksien määrän ja paikoituksen suhteen kulloisenkin lumikuorman mukaan. Suurimman sallitun jännityksen määrättiin olevan metallin alin myötöraja jaettuna varmuuskertoimella ~ 1.5 . DC04-teräksen tapauksessa tämä tarkoitti ~ 140 MPa maksimijännitystä. Jännityksen lisäksi laskettiin suurin siirtymä, joka sai olla $\leq L/200$, eli ≤ 5 mm.

Jännityksen ollessa lähellä 140 MPa tai suurimman siirtymän lähestyessä 5 mm, saatiin maksimaalisen lumikuorman laskussa käytettävä voima. Lumikuorman suuruus neliömetrille laskettiin kaavalla 17:

$$S_k = F_k \Psi_0 * 2 \quad (17)$$

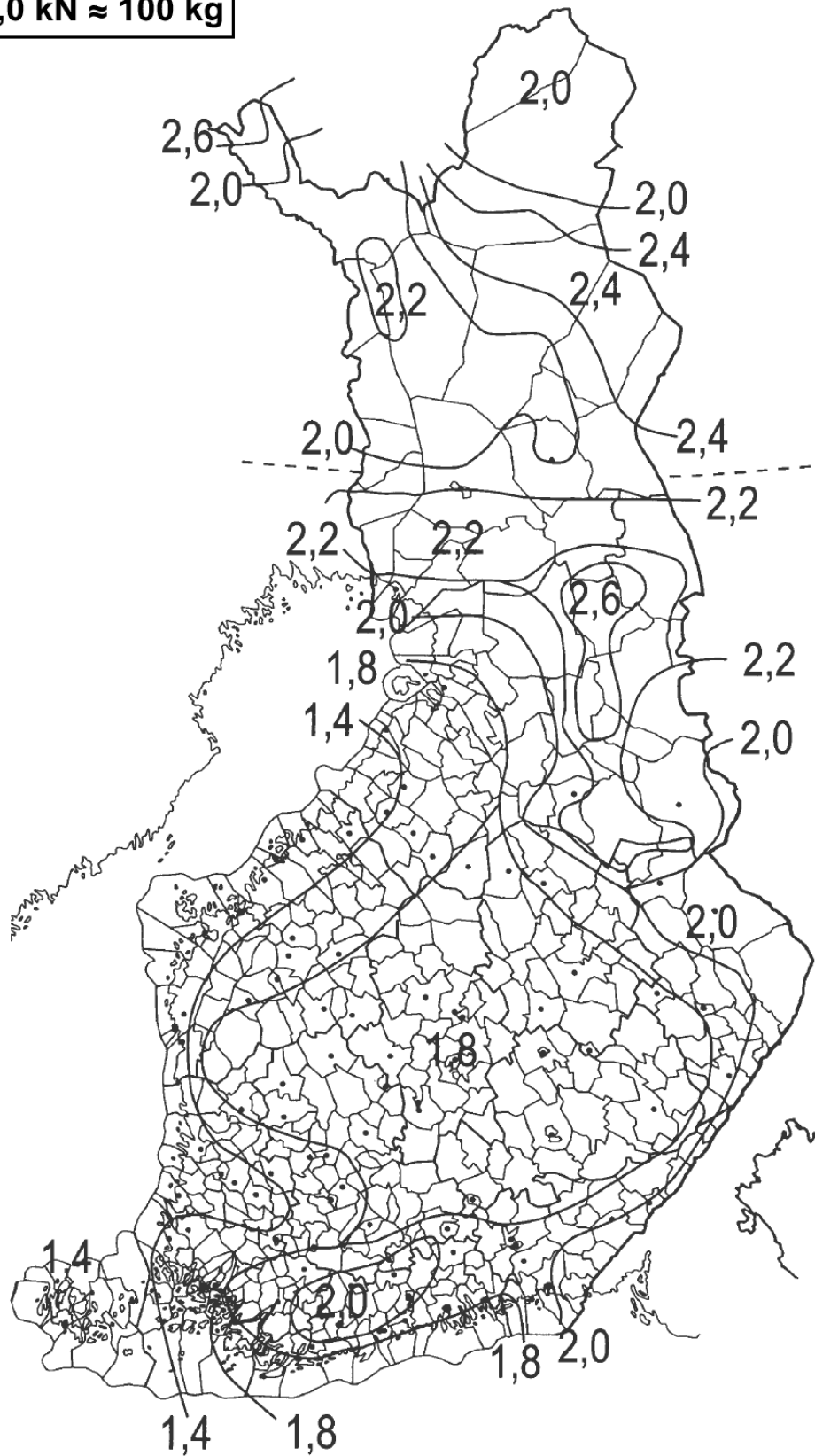
Palonsuojakasetin lujuuslaskennasta lumikuormien suhteen saatiin tulokseksi kasetin suurimmat siirtymät ja jännitykset tuentoja sekä kuormituksia varioiden. Tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Tuentojen riippuvaisuus kulloisestakin alueellisesta lumikuormasta, sekä niistä johtuvat jännitykset sekä siirtymät.

Suurin sallittu lumikuorma [kN/m ²]	Tuentakohtien määrä/sivu [n]	Suurin todellinen jännitys [MPa]	Suurin siirtymä [mm]	Reunan suurin siirtymä z-akselilla -/+ [mm]
0,82	0	140,9	1,805	0/-1,769
2,38	1	140,4	1,355	+0,254/-0,194
2,85	2	140	1,271	+0,322/-0,136
2,97	3	141,1	1,212	+0,238/-0,122
3,09	4	143	1,197	+0,136/-0,087
3,15	5	143,3	1,179	+0,158/-0,090

Kuvassa 20 on esitetty lumikuormien suuruudet Suomen alueella, joita tulisi käyttää ohjearvoina palonsuojakasetin kiinnityskohtien lukumäärää ja sijaintia suunnittellessa.

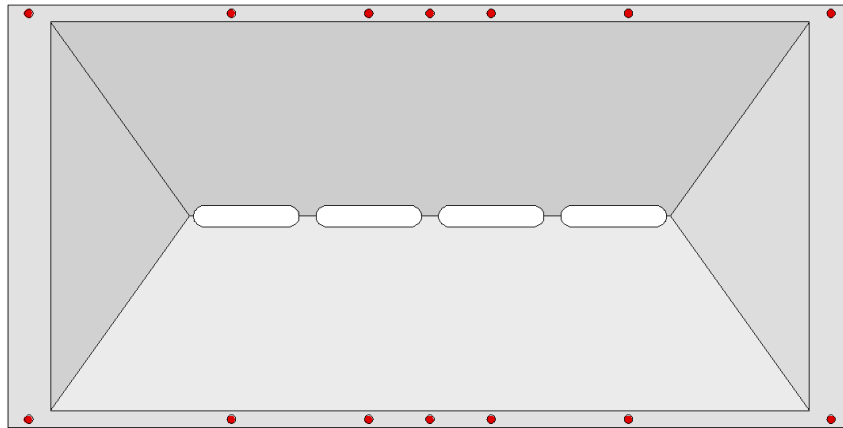
1,0 kN \approx 100 kg



Rakenteiden kuormitusmäärien mukaiset peruslumikuormat 1998-
kN/m²

Kuva 20. Suomen peruslumikuormat. (Suomen ympäristökeskus 2013)

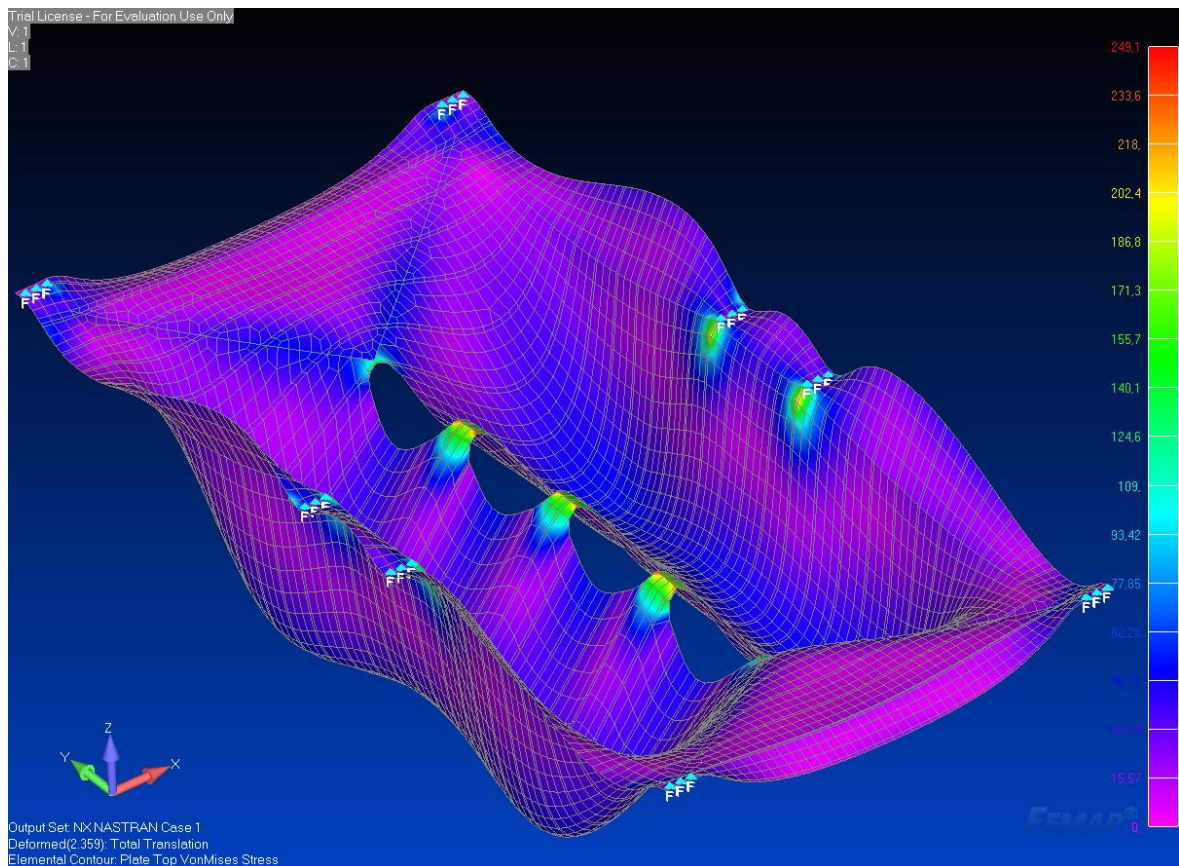
Lumikuormien aiheuttamia rasituksia sekä siirtymiä laskiessa hyödynnettiin Femap-ohjelmaa, sekä siihen liittyvää NX Nastran – laskentatyökalua. Laskennassa käytetty kasetin malli tehtiin levyelementeistä, joille paksuutta annettiin 1 mm. Laskennassa käytetyn materiaalin elastinen kimmokerroin oli 210000 MPa, Poissonin luvun ollessa 0,3. Lumikuormasta aiheutuva voima jakautui koko kasetin pinta-alalla ja tuentakohdat sijoittuivat kuvan 21 mukaisesti.



Kuva 21. Tuentakohdat

Kasetti kiinnitetään aina päissänsä olevasta neljästä kohdasta. Kuormitustapauksesta riippuen tuentakohdat vaihtelevat eikä niiden sijoittelu ole yhdentekevää, jännityksen vaihdeltaessa suurestikin tuentakohdien sijoittelusta määräytyen vaikka niiden lukumäärä olisikin kuormitustapausten kesken muuttumaton. Tästä syystä liitteessä II on esitetty eri kuormitustapauksissa käytettävien tuentojen määrä sekä sijoittelu.

Kasettia kuormitettaessa tasaisesti sijoittuivat jännitykset sekä siirtymät kuvan 22 mukaisesti. Kuvassa muodonmuutos esittää kokonaissiirtymien suuruutta ja värjätyt alueet jännityksiä rakenteessa.



Kuva 22. Jännitysten sekä siirtymien jakautuminen rakenteeseen. Tässä tapauksessa kasettiin kohdistui 1000 N voima tasaisesti koko kasetin pinnalle ja kasetti oli kiinnitetty liukurivaritilään kulmistaan sekä kahdesta kohdasta sivuiltaan.

Kuormitustapaukset lumikuormista sekä niiden kuvaajat on esitetty liitteessä I.

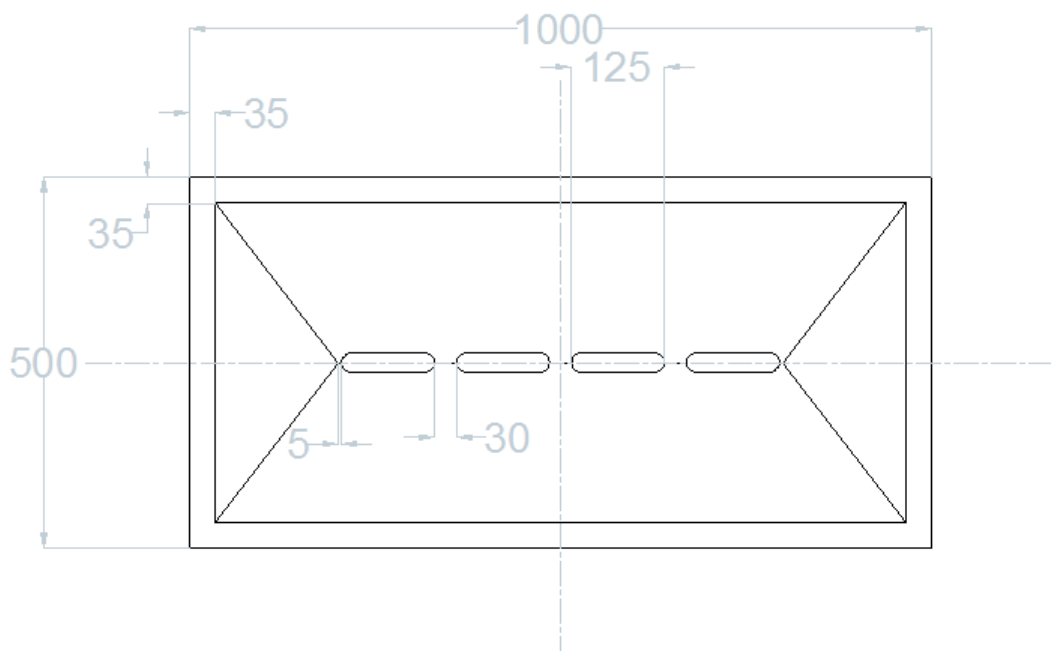
Palotilannetta ajatellen on loogista ajatella, ettei palonsuojakasetin lämpötila pääse kohoamaan lujuuden kannalta kriittisiin arvoihin ennen kuin sen päällä oleva lumi- tai jääkuorma on kokonaan sulanut, jolloin palonsuojakasetin voidaan palolaskennallisesti katsoa olevan kuormittamaton.

4.7 Virtauslaskenta

Virtauslaskennassa otettiin tarkasteluun paisuntasäiliöstä tulevan putken vuoto sekä pahin mahdollinen tilanne, jolloin esimerkiksi paisuntasäiliön tai suuren putken repeämisen johdosta palavaa ainetta vapautuu suojattavasta rakenteesta sellaisella tahdilla, että palonsuojakasetin ”kaukalot” ovat ääriänsä myöten täynnä. Tällöin kasetin läpivirtaavan neste

kenta on suoritettavissa puhtaasti ”vuotavan avoimen säiliön” kaavalla. Laskennassa oletuksena on, ettei nesteeseen vaikuta muita voimia kuin ilmanpaineesta sekä gravitaatiosta aiheutuva, vaan lähtötilanne on pikemminkin kuin avoimen säiliön pohjalta avaisi venttiilin.

Laskennassa tarkasteluun otettiin 1000*1000 mm kokoinen kasettikokonaisuus, jolloin saadaan suurin mahdollinen tilavuusvirtaus neliömetrille. Kasetissa on neliömetrillä 8 kpl 2400 mm² kokoista aukkoa, jolloin auki olevan pinnan ja koko kasetin pinta-alan suhteeksi tulee noin 2,4 %, kuten kuvasta 23 voidaan havaita.



Kuva 23. 1000 x 500 mm palonsuojakasetti.

Säiliön repeämän lisäksi tarkasteluun otettiin lisäksi DN 65 ja DN 80 kokoisten putkien halkaaminen. Tässä skenaariossa putket tulevat paisuntasäiliöltä muuntajalle, jolloin pinnan korkeudeksi saadaan 2 m. Laskennassa käytettiin seuraavia kaavoja 4 ja 5:

virtausnopeus v 1 m² kokoisen palonsuojarakenteen läpi laskettiin kaavalla 18 (Valtanen 2106, s.187):

$$v = \sqrt{2gh_o} \quad (18)$$

Yhtälössä 1 g on putoamiskiihtyvyyys [m/s^2] ja h_o on pinnankorkeus reiästä [m]. Tilavuusvirta q [m^3/s] saatiin kaavalla 19 (Valtanen 2016, s.187):

$$q = A_o C v \quad (19)$$

Kaavassa 19 A_o on aukon pinta-ala [m^2], C on aukon purkauskerroin ja v nesteen virtausnopeus [m/s].

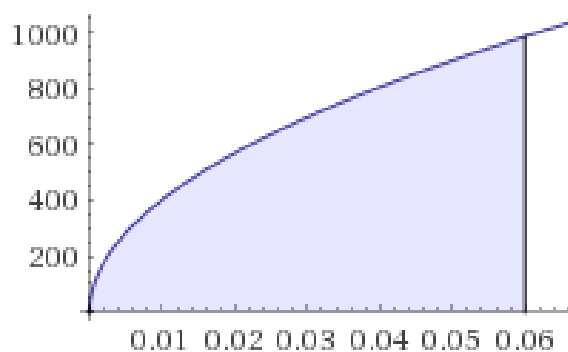
Kaavassa 19 on tilavuusvirta q esitetty muodossa m^3/s . Jotta saataisiin arvo muotoon l/min , pitää q muokata kaavalla 20:

$$Q = q * 1000 \text{ l} * 60 \text{ s} \quad (20)$$

Yhdistämällä kaavat 4-6 ja integroimalla nestepinnan korkeuden mukaan, niin kuin kaavassa 21 on esitetty, saadaan maksimaalinen tilavuusvirtaus 1 m^2 palonsuojarakenteelle [l/min] kulloisenkin nestepatsaan korkeudesta aiheutuvan hydrostaattisen paineen mukaan.

$$Q = \int_{0.06}^0 1000 \text{ l} * 60 \text{ s} * A_o * C * \sqrt{2 * g * h_o} \text{ dh} \quad (21)$$

Kaava 21 laskemalla saatiin kuvan 24 mukainen kuvaaja.



Kuva 24. Nestepatsaan korkeuden [m] vaikutus tilavuusvirtaukseen [l/min/ m^2].

Taulukkoon 10 on koottu virtauslaskennan tulokset sekä niihin vaikuttaneet tekijät.

Taulukko 10. Virtauslaskennan tulokset

	Kasetti	DN65	DN80	Säiliö
Aukon pinta-ala [m ²]	1,68*10 ⁻³	4,083*10 ⁻³	5,661*10 ⁻³	-
Aukkojen pinta-ala/m ² [m ²]	20,4*10 ⁻³	-	-	-
Pinnankorkeus [m]	0,06	2	2	-
Virtausnopeus [m/s]	1,085	6,26	6,26	
Purkauskerroin	0,61	0,61	0,61	-
Tilavuus [m ³]	-	-	-	100
Tilavuusvirta [m ³ /s]	0,013	0,015	0,022	-
Tilavuusvirta [l/min]	950	936,1	1297,9	

Kuten taulukosta 9 voidaan todeta, vaaditaan DN80-kokoisesta putkesta vuodon tapahtuessa 2 m² kokoinen ala palonsuojakasetistosta vuotoa kompensoimaan. Tapauksessa, jossa muuntajassa kiertäisi kaikkineen 100 m³ verran muuntajaöljyä, olisi valuma-altaankin pinta-ala noin 260 m². Tällaisessa tapauksessa, jossa 100 m³ öljyä pääsisi vapaaksi kaikki yhdellä kertaa, kestäisi palonsuojakasetistolla hieman alle 30 sekuntia laskea öljymäärä valuma-altaaseen.

Kilpailevalle LHD-reikälevylle on 4,1 % aukkosuhteella ilmoitettu tilavuusvirtauksen määräksi 660 l/min/m². Heidän laskentatavastaan ei voi olla varma, mutta LHD-levyn rakenteesta johtuen aukkosuhde pienenee nestepinnan pudotessa ylöspäin stansattujen aukkojen tasalle, jollaisia 2/3 aukoista on. Tällöin vain 1/3 aukoista on toiminnallisia nesteen läpäisylle. Tasaisen pinnan vuoksi ei LHD-reikälevyn aukkojen päälle pääse kertymään myöskään hydrostaattista painetta. (PcP 2013a, s. 10)

4.8 Palolaskenta

Olellainen osuus palonsuojakasetin toimintaa on sen kyky sammuttaa allansa palava tuli sellaisessa ajassa, että palonsuojarakenteen teräsosat eivät ehdi kuumenemaan palavan nesteen itsesyttymispisteeseen saakka taikka menetä kantokykyään kuumenemisen vuoksi. Palonsuojarakenteen tulee myös kestää allansa palava tuli muuttamatta merkitsevästi muotoaan tai menettämättä lujuuttaan. Seuraavissa kappaleissa on avattu pyrolaskennan sisältöä sekä siinä käytettyjä metodeja ja kaavoja.

4.8.1 Palonkesto

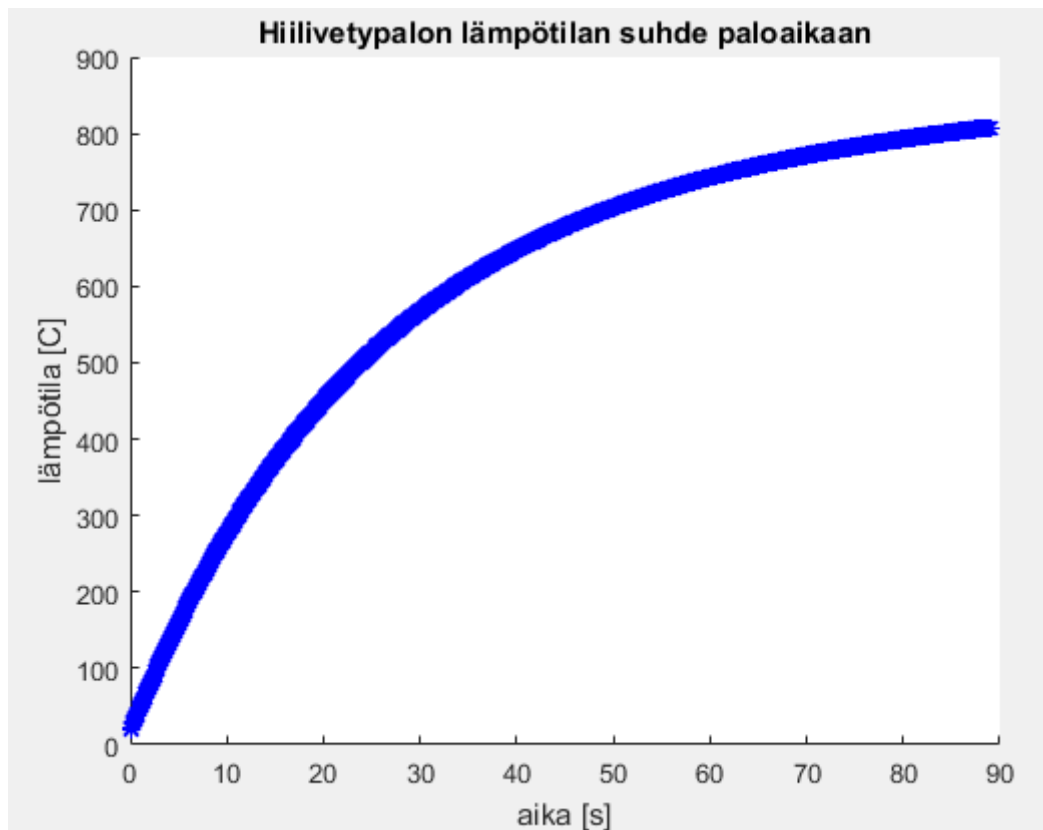
Palonsuojakasetin palonkestoä määrittäessä oli tärkeää selvittää palonsuojakasetin lämpeneminen ajassa, jona se sammuttaa allaan palavan tulen. Tärkeää oli myös selvittää missä ajassa palonsuojakasetti lämpenee kulloisenkin sammutettavan nesteen itsesyttymislämpötilaan asti.

Laskennassa käytettiin itsesyttymislämpötilan esimerkkiarvona muuntajaöljyn itsesyttymislämpötilaa [350 °C]. Laskennassa määrättiin myöskin pahin mahdollinen tilanne, eli otettiin huomioon vain palokasetin massa eikä siitä haihtuvaa tai siirtyvää lämpöä.

Hiilivetypalon lämpötilakäyrä ajan suhteen täydellisessä palossa on esitetty kaavassa 22 (SFS-EN 1991-1-2+AC 2003, s. 44):

$$T_p = 1080 * (1 - 0,325 * e^{-0,167t} - 0,675 * e^{-2,5t}) + 20 \quad (22)$$

Kaavassa 22 ainut muuttuja on t aika [min]. Kaavan 22 tuottaman lämpötilan suhde aikaan on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Hiilivetypalon lämpötilan suhde paloaikaan.

Suojaamattomien teräsrakenteiden lämpötilan muutos palotilanteessa laskettiin taas kaavalla 23 (Siirilä et al. 1978, s. 46):

$$\Delta T_t = \frac{\alpha}{\rho_t c} * \frac{A}{V_t} * (T_p - T_t) * t_h \quad (23)$$

Kaavassa 23 ΔT on rakenteen lämpötilanmuutos, α on lämmönsiirtymisluku ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$), ρ_t on teräksen tiheys (kg/m^3), c on teräksen ominaislämpökapasiteetti ($\text{J}/\text{kg C}$), joka lasketaan kaavalla 23, A on teräksen paloa vastaan olevan profiilin pinta-ala pituusyksikköä kohden (m^2/m), V_t on teräksen tilavuus pituusyksikköä kohden (m^3/m), T_p on tulipalon lämpötila hetkellä t (C), T_t on teräksen lämpötila hetkellä t (C) ja t_h on laskenta-aikavälin pituus (h).

Lämmönsiirtoluku α koostuu konvektio-osasta α_k ja emissio-osasta α_s . Konvektio-osan arvona voidaan pitää vakiota $25 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ ja emissio osa vaihtelee kaavan 22 mukaisesti (Siirilä et al. 1978, s. 39).

$$\alpha = \frac{5,77 * \varepsilon_m}{T_p - T_t} * \left[\left(\frac{T_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_t + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (22)$$

Kaavassa 22 ε_m on resultoiva emissioluku, ja sen arvona voidaan pitää vakiota 0,7, kun rakenne sijaitsee palon keskellä. (Siirilä et al. 1978, s. 39)

Rakenneterästen ominaislämpö c määräytyy teräksen vallitsevasta lämpötilasta taulukon y osoittamalla tavalla ja voidaan laskea kaavalla 23 (Siirilä et al. 1978, s. 38):

$$c = 0,46 + 0,33 * 10^{-3} * T_t \quad (23)$$

Kaavasta 23 laskemalla saadaan taulukon 11 mukaiset arvot teräksen ominaislämpökapasiteetille kulloisestakin lämpötilasta määräytyen.

Taulukko 11. Rakenneteräksen ominaislämpökapasiteetti teräksen lämpötilan mukaan. (Siirilä et al. 1978, s. 38)

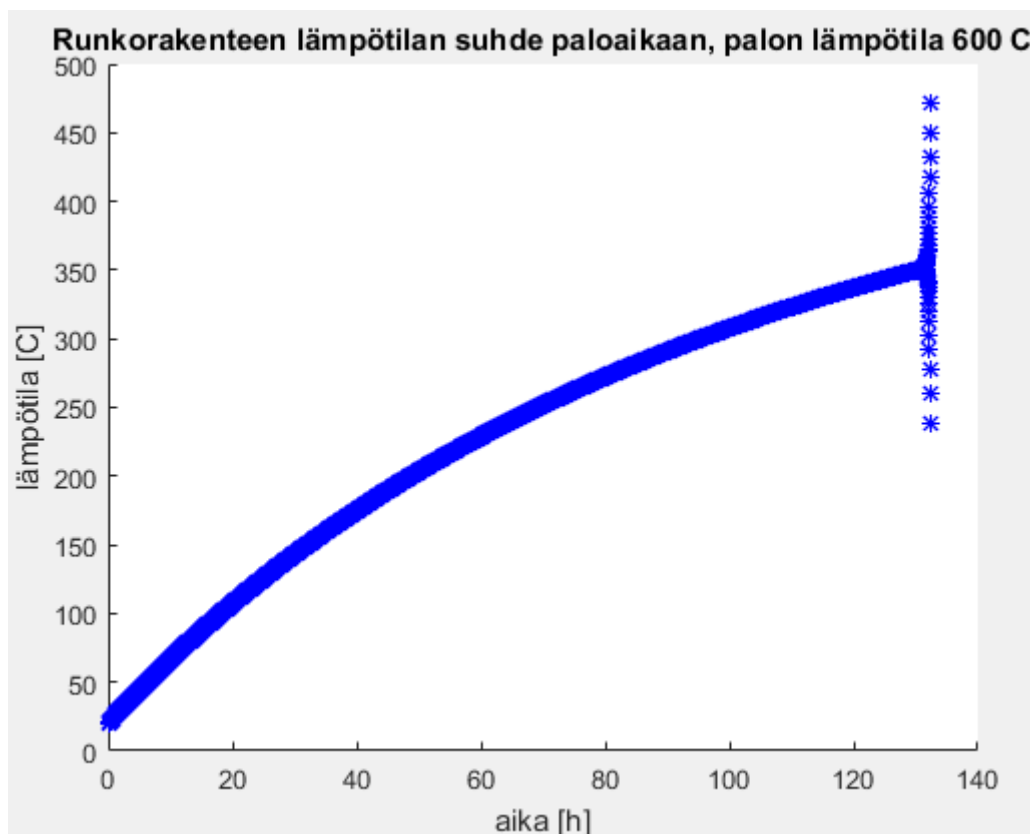
Lämpötila [°C]	Ominaislämpökapasiteetti [J/kg °C]
0	0,482
100	0,482
200	0,522
300	0,560
400	0,600
500	0,640
600	0,682
700	0,695

Lujuuslaskentaosiossa todettiin runkorakenteen menettävän suurimmalla mitoitetulla kuormituksella kantokykynsä teräksen ollessa 470 °C asteista. Olennaista tässä on missä ajassa runkorakenne lämpenee tähän pisteeseen asti.

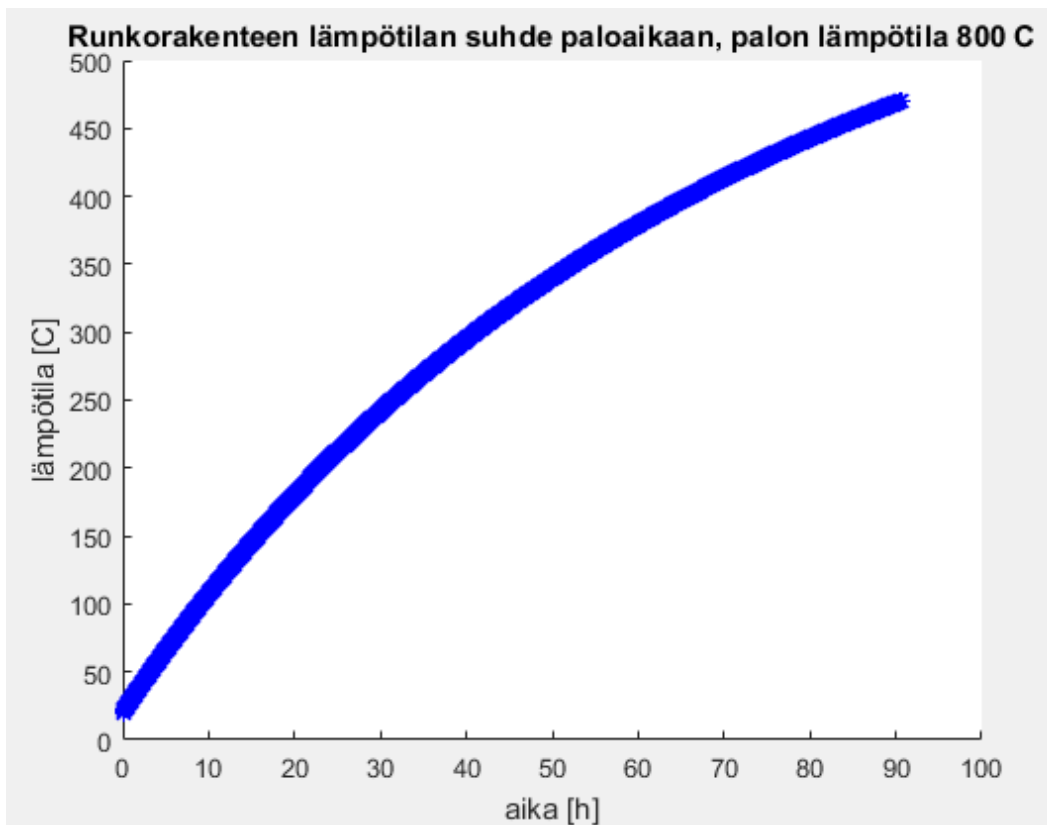
Jotta teräksellä olisi edes mahdollisuus lämmitä lämpötilaan, jossa runkorakenne menettää kantokykynsä, on terästä lämmittävän palon oltava vähintään 470 °C asteinen. Muuntajaöljyllä tehdyissä testeissä palokaasujen lämpötila ei noussut palonsuojarakenteen toimiessa kuin 200 °C asteeseen.

Tarkastelun alle otettiin kolme eri lämpötilaa: 600 °C, 800 °C ja hiilivetypalon aikasidonnaisen käyrän mukaan laskettu lämpötila, joka korkeimmillaan on noin 1100 °C. Rajoittamattomien hiilivetypalojen aikasidonnainen lämpötila saavuttaa huippunsa vain muutamassa minuutissa.

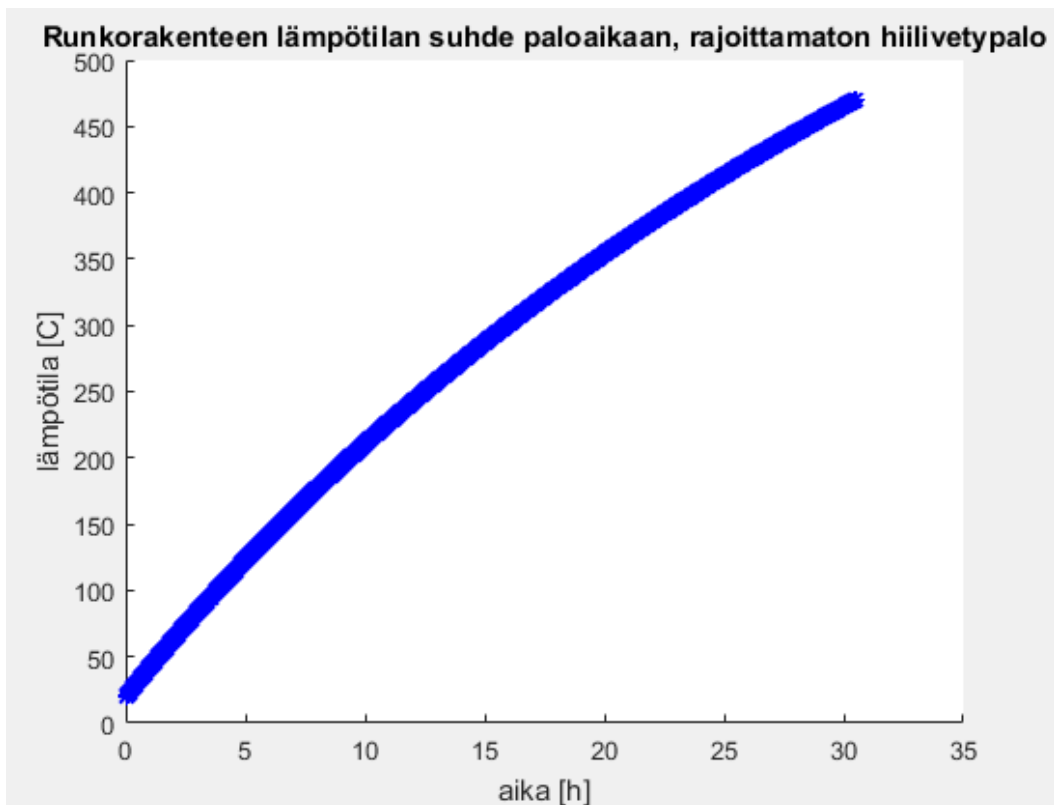
Tarkastelussa oletettiin teräspalkin olevan alussa 20 °C, sen pinta alan palopintaan nähden olevan 0,064 m³ ja sen tilavuuden olevan 0,132 m³ poikkileikkauksen ollen IPE-120 -palkin mukainen. Laskennassa käytettiin liitteessä VII esitettyjä laskukaavoja. Runkorakenteen lämpötilan nousuun kriittiseen arvoon asti vaadittu aika tarkastelluilla palon lämpötiloilla on esitetty kuvissa 26-28.



Kuva 26. Runkorakenteen lämpötila 600 °C palossa.



Kuva 27. Runkorakenteen lämpötila 800 °C palossa.

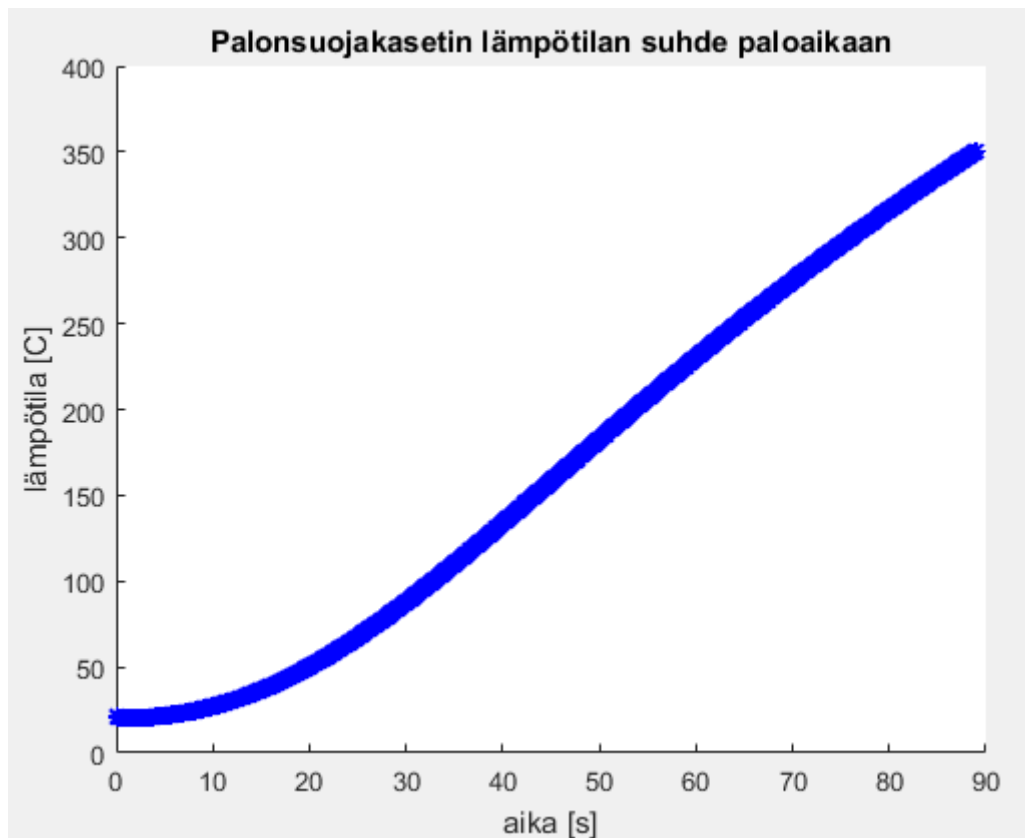


Kuva 28. Runkorakenteen lämpötila rajoittamattomassa hiilivetypalossa.

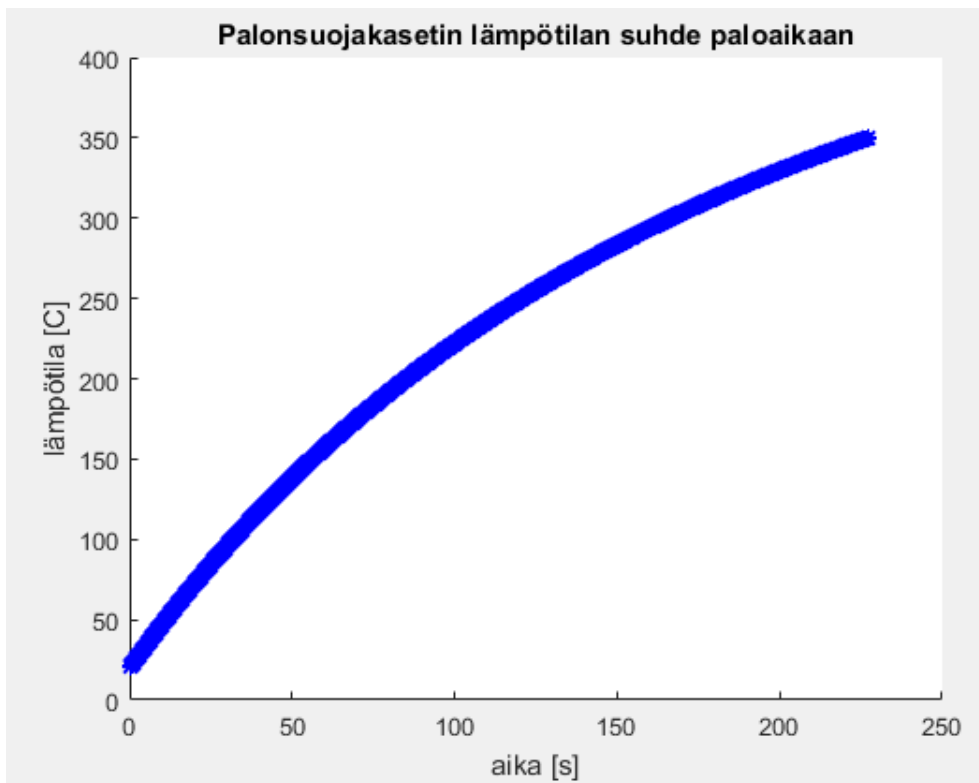
Kuten kuvista 26-28 voidaan todeta, ei 600 °C asteen palossa runkorakenne voi edes lämmentyä 470 °C asteiseksi. Virhe kuvaajan lopussa johtuu lämmön nousun loppumisesta johtuvasta virheestä.

Palonsuojakasetin lämpötila ajan suhteen ei ole täysin suoraviivainen, vaan vaihtelee teräksen muuttuvan ominaislämpökapasiteetin mukaan. Teräksen lämpötilaa laskiessa käytetty laskentakaava on esitetty liitteessä VII.

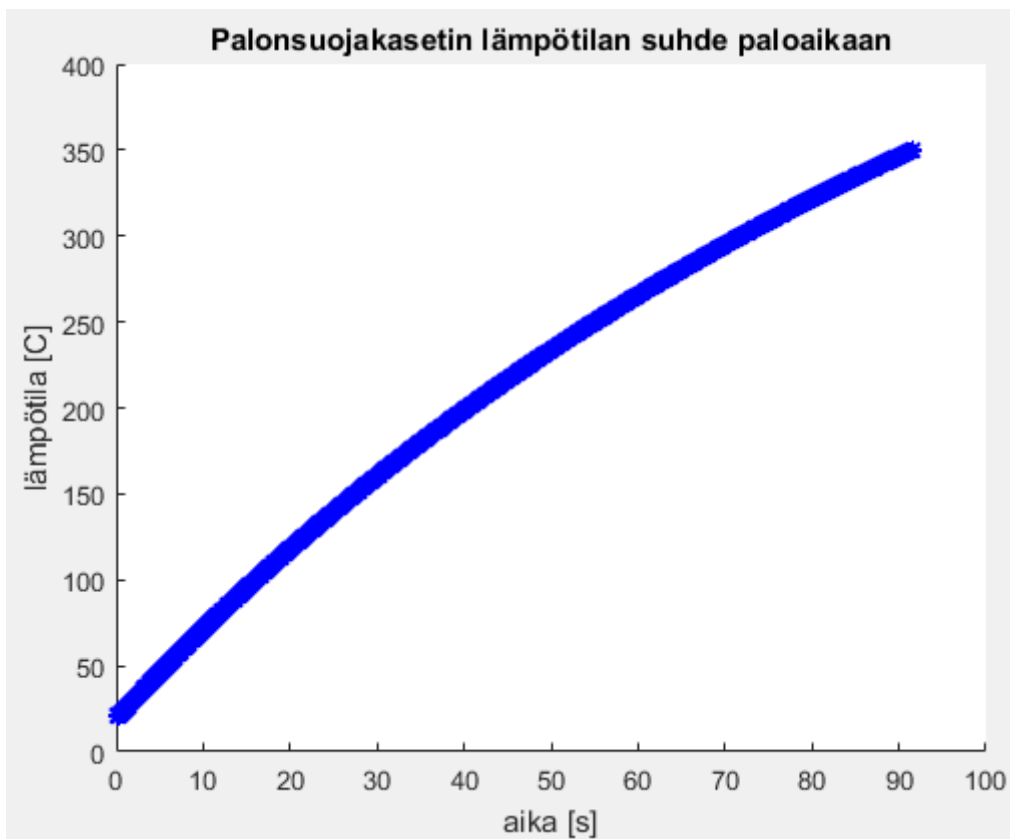
Laskennassa käytettiin kaavassa 8 esitettyä hiilivetyjen täydellisen palamisen kaavaa, mutta koska palonsuojarakenteen alla ei palaminen ole täydellistä, niin teräsrakenteen lämpötilan laskemisessa käytettiin myös hiilivetypalon lämpöarvoina vakioita $T_p=600\text{ °C}$ ja $T_p=800\text{ °C}$. Laskennasta saadut palonsuojakasetin lämpötilat ajan suhteen on esitetty kuvissa 29-31.



Kuva 29. Palonsuojakasetin lämpötilan suhde paloaikaan, laskettu hiilivetyjen täydellisen palamisen kaavalla.



Kuva 30. Palonsuojakasetin lämpötilan suhde paloikaan, $T_p=600\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 31. Palonsuojakasetin lämpötilan suhde paloikaan, $T_p=800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.8.2 Palavan aineen hapensaanti ja tukahtuminen

Hapen osuus ilmassa on noin 20,95 %. Yleisesti palo tukahtuu happipitoisuuden laskiessa 12–15 prosenttiin. (Puolitaival 2015)

Edellisiin testeihin nojautuen saa enintään 16 % palon pinta-alasta olla ilma-aukkoa, jotta palo vielä tukahtuisi. Tähän arvoon nojautuen saadaan laskettua kasetin alla olevalle palolle pinta-ala, joka saa tarpeeksi hapetta palonsuojakasetin aukoista palon ylläpitämiseen. Jos ilma-aukon tulee olla min 16 % palon pinta-alasta ja palonsuojakasetistosta on 2,4 % / m² ilma aukkoa, niin silloin kaavalla 24 saadaan raja-arvo palon pinta-alalle palonsuojakasetin pinta-alaa kohden.

$$A_p = A * 0,024 / \frac{16}{100} \quad (24)$$

A_p :n ollessa palopinta-ala palonsuojakasetin pinta-alaa kohden [m²/m²], A :n ollessa palonsuojakasetiston pinta-ala [m²].

Asennuksesta sekä rakenteiden elämisestä johtuen ei voida olettaa tehollisen aukon pinta-alan olevan 2,4 % vaan todellinen arvo tulee olemaan jopa pari prosenttiyksikköäkin suurempi.

Oleellinen osa palon tukahdutusta on tarkkailla kaikkia kolmea palon mahdollistavaa edellytystä: palavaa ainetta, lämpöä ja hapetta (Peda 2017). Kasetin toimintaperiaate on tukahduttaa hapenpuutteeseen allansa oleva palo ennen kuin se voi lämmittää teräsrakenteet palavan nesteen itsesyttymislämpötilaan asti, mikä muuntajaöljyllä on noin 350 C° (Univar 2010, s 4). Edellisiin testeihin nojautuen vastaavanlaisessa tilanteessa oleva palo sammuu kasetin alapuolisen kaasun happipitoisuuden pudotessa alle 12-15 %:n. Vastaavasti palo saa taas hapen puolesta edellytyksen syttyä, kun happipitoisuus nousee 16 %:n (Puolitaival 2015). Kasetin pinta-alasta aukkoa ollen 2.4 %, kuluu tähän 3 % happipitoisuuden nousuun noin 25 s. Arvo on saatu edelliseen testaukseen nojautuen, jossa aukon määrä koko pinta-alasta oli 4.1 % ja 3 % happipitoisuuden nousuun meni noin 15 s. (Rakovic 2015, s. 17)

Palavat aineet tarvitsevat palavan reaktion ylläpitämiseen eri määrän happea (Fedechko et al. 2017). Näin ollen on palonsuojakasetin palontukahdutusnopeutta laskiessa järkevää rakentaa laskentaohjelma, jossa muuttujana on tapauksessa oleva aine. Aineen ominaisuuksien sekä palonsuojakasetin rakenteen ominaisuuksien perusteella voimme laskea palotapahtuman tuottaman lämmön, aineenkulutuksen sekä siitä johtuvat kaasuvirtaukset sisään ja ulos. Kun laskentaohjelmassa on vakiona aineen sekä palonsuojakasetin ominaisuudet, niin ratkaistavaksi tuntemattomaksi jää vain palon tukahtumiseen kuluva aika, sekä paloreaktion tuottamat suureet.

Palon tukahtuttamisessa on kriittistä tarkastella kaasuvirtauksia säiliöstä sisään ja ulos. Avoimen aukon pinta-ala sekä säiliön että sen ulkopuolisen kaasun paine-ero muodostuivat kaasuvirtauksen ratkaisevaksi tekijäksi. (Tanaka 2016, s.466–474) Palonsuojakasetin alapuolisen tilan paineen ollessa paljon ulkopuolen painetta suurempi ei kasetin alapuolelle pääse virtaamaan happirikasta ilmaa ollenkaan. Näin ollen tilanne on lähes vastaava kuin suljetussa tilassa vallitsevalla palolla. Paine-eron ollessa lähellä nolaa muuttuu yksisuuntainen kaasuvirtaus kaksisuuntaiseksi tai vuorotellen suuntaa muuttavaksi. (Chow & Li 2011 s. 2598–2600) Tämän seurauksena palaminen on jaksollista tai vähintäänkin epävakaa ja voi vieläkin tukahtua hapen puutteeseen. Avoimen aukon ollessa kuitenkin tarpeeksi suuri saa paloreaktio enemmän tai saman verran happea kuin se kuluttaa, jolloin palo sammuu vasta polttoaineen loputtua. (He et al. 2013, s. 247)

Kaasun tilayhtälön mukaisesti kaasun lämmitessä kasvaa joko tilavuus tai paine. (Valtanen 2016, s. 192) Tilavuudenkin ollessa lähes suljetussa tilassa vakio kasvaa paine hyvin nopeasti vallitsevaan ilmanpaineeseen nähden. Kaavalla 25 voimme todeta 2,4 % pinta-alaprocentin aukosta maksimissaan purkautuvan tilavuusvirran olevan paljon pienempi kuin palamistapahtumassa syntyvien palokaasujen tilavuusvirran. (Lu et al. 2014, s. 362)

$$\dot{m}_{g,max} = 0,055 \left(\frac{4}{\pi}\right) A_o (gD|\varepsilon|)^{1/2} \quad (25)$$

Kaavassa 13 A_v on aukkojen pinta-ala [m^2], D on pinta-alaltaan vastaavankokoisen ympyrän halkaisija [m] ja ε on Atwoodin numero. Atwoodin numero on dimensioton määre, jolla ilmaistaan kahden eri kaasun tai nesteen lämpötilojen tai tiheyksien suhdetta toisiinsa, ja voidaan ilmaista kaavalla 26 (Chow & Li 2011 s. 2599):

$$\varepsilon = -2(T_g - T_a) / (T_g + T_a) = -2(\rho_a - \rho_g) / (\rho_a + \rho_g) \quad (26)$$

Kaavassa 26 T_g on palokaasun lämpötila [°C], T_a vallitseva ilmanlämpö [°C], ρ_a ilmantiheys [kg/m³] ja ρ_g palokaasujen tiheys [kg/m³].

Kaasun tiheys on lämpötilariippuvainen suure, joten ei ole tarkoituksenmukaista käyttää palokaasuille vain yhtä tiheyden arvoa. Sen sijaan palokaasujen tiheys laskettiin suoraan ideaalikaasulaista johdetulla kaavalla 27 (Tanaka 2016, s. 460):

$$\rho_g = 352.8 / (T_g + 273) \quad (27)$$

Kaavaan syötettävän kaasun lämpötilan on oltava kelvineinä, joten tämä on kompensoitu lisäämällä kaasun lämpötilaan $T_g = 273$ K.

Suljetussa tilassa olevan palon tukahtumisaika voidaan laskea kaavalla 28 (He et al. 2013, s. 248):

$$t_e = (Y_{O_2, \infty} - Y_{O_2, LOI}) \frac{\Delta H_{R, O_2} \rho_g V}{Q} \quad (28)$$

Kaavassa 28 $Y_{O_2, \infty}$ on alkuperäinen hapen osuus [%], $Y_{O_2, LOI}$ on rajoittava hapen osuus (12-15%) [%], $\Delta H_{R, O_2}$ on palon tuottama energia happikiloa kohti [kJ/kg], ρ_g on palonsuojaketin alapuolisten kaasujen tiheys [kg/m³], V on palonsuojaketin tilavuus sekä Q on palon teho [W].

Karakteristinen tukahtumisaika taas voidaan laskea kaavalla 29 (He et al. 2013, s. 248):

$$t_{e, o} = \frac{V}{Q} \quad (29)$$

Tukahtumisajan suhde karakteristiseen tukahtumisaikaan on suoraan suhteessa dimensiottomaan avoimen aukon suuruuteen kaavan 30 mukaan (He et al. 2013, s. 248):

$$\frac{t_e}{t_{e,o}} = 1 + 0.011 \exp\left(\frac{0.0031 \rho_g g^{\frac{1}{2}} A_o^{\frac{5}{4}}}{\dot{m} A_p}\right) \quad (30)$$

Kaavassa 30 g on maan vetovoimasta johtuva putoamiskiihtyvyys [m/s^2], A_v on avoimen aukon ala [m^2] ja A_f on palon pinta-ala [m^2].

Palamisessa tuotettu teho ja energia ovat ajan suhteen toisiinsa kytköksissä kaavalla 31 ja palotapahtuman tuottaman tehon voi laskea kaavalla 32

(Bengtsson 2001, s. 183):

$$E = Qt \quad (31)$$

$$Q = \dot{m}_b A_f \Delta H_c \chi \quad (32)$$

Kaavassa 32 \dot{m}_b on palamisesta johtuva polttoaineen massavirta [$\text{kg/m}^2\text{s}$], A_p on palon pinta-ala [m^2], ΔH_c on höyryjen alempi palamislämpö [MJ/kg] ja χ on palamisen tehokkuuskerroin.

Polttoaineen todellinen massavirta voidaan laskea polttoainekohtaisesta maksimaalisesta massavirrasta kaavalla 33 (Gottuk & White 2106, s. 2574):

$$\dot{m} = \dot{m}_{inf} (1 - e^{k_\beta D}) \quad (33)$$

Kaavassa 33 \dot{m}_{inf} on polttoaineen maksimaalinen massavirta palotapahtumassa [$\text{kg/m}^2\text{s}$], k_β on palavan nesteen ainevakio ja D on pinta-alaltaan palopinta-alaa vastaavan ympyrän halkaisija [m].

Palokaasujen lämmönmuutos tietyssä ajassa laskettiin kaavalla 34 (Karlsson & Quintiere 2000, s. 119):

$$\Delta T g = \frac{Q}{\dot{m} * c_p * h k * A_p} \quad (34)$$

Kaavassa 34 c_p on palokaasujen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK], A_p on palopinnan ala [m²] ja hk on lämmönsiirtymiskerroin, joka saadaan kaavalla 35 (Karlsson & Quintiere 2000, s. 121):

$$hk = \sqrt{\frac{k\rho_g c_p}{t}} \quad (35)$$

Kaavassa 35 k on lämmönjohtuvuus [W/mK].

Paine ero lähes suljetussa tilassa olevassa palossa syntyvien palokaasujen ja ulkopuolisen tilan välillä voidaan laskea kaavalla 36 (Bengtsson 2001, s. 70):

$$\Delta p = \frac{\left(\frac{Q}{c_p T_g A_o}\right)^2}{2\rho_e} \quad (36)$$

Kaavassa 36 Q on palon teho [W], c_p palokaasujen ominaislämpökapasiteetti, T_g purkautuvan kaasun lämpötila [K], A_o Aukon koko [m²], ρ_e on purkautuvan kaasun tiheys.

Kriittisin arvo laskennassa on kuitenkin Δp_{cri} , kriittinen paine-ero aukon eri puolilla. Jos paineiden erotus on kriittistä paine-eroa suurempi, on aukossa tapahtuva kaasuvirtaus yksisuuntaista. Tällöin palotapahtumassa muodostuvien palokaasujen sekä ilman seoksen purkautuessa ulos palonsuojakasetiston alapuolisesta tilasta ei hapekasta ilmaa pääse kasetiston alle paloa ruokkimaan. Käytettyään palonsuojakasetiston alapuolisessa tilassa olevan hapen tukahtuu palo. Kriittinen paine ero voidaan laskea kaavalla 37 (Chow & Li 2011, s.2599):

$$\Delta p_{cri} = 0,2427 * \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right) * \exp^{1,1072 * \varepsilon} * (4 * g * \Delta rho * D_o) \quad (37)$$

Kaavassa 37 Δrho on palokaasujen ja ilman tiheyksien erotus ja D_o on alaltaan aukkojen pinta-alaa vastaavan ympyrän halkaisija.

Nesteen palamiseen vaadittavan ilmapvirtauksen määrä voidaan laskea kaavalla 38:

$$m_a = m_b * s \quad (38)$$

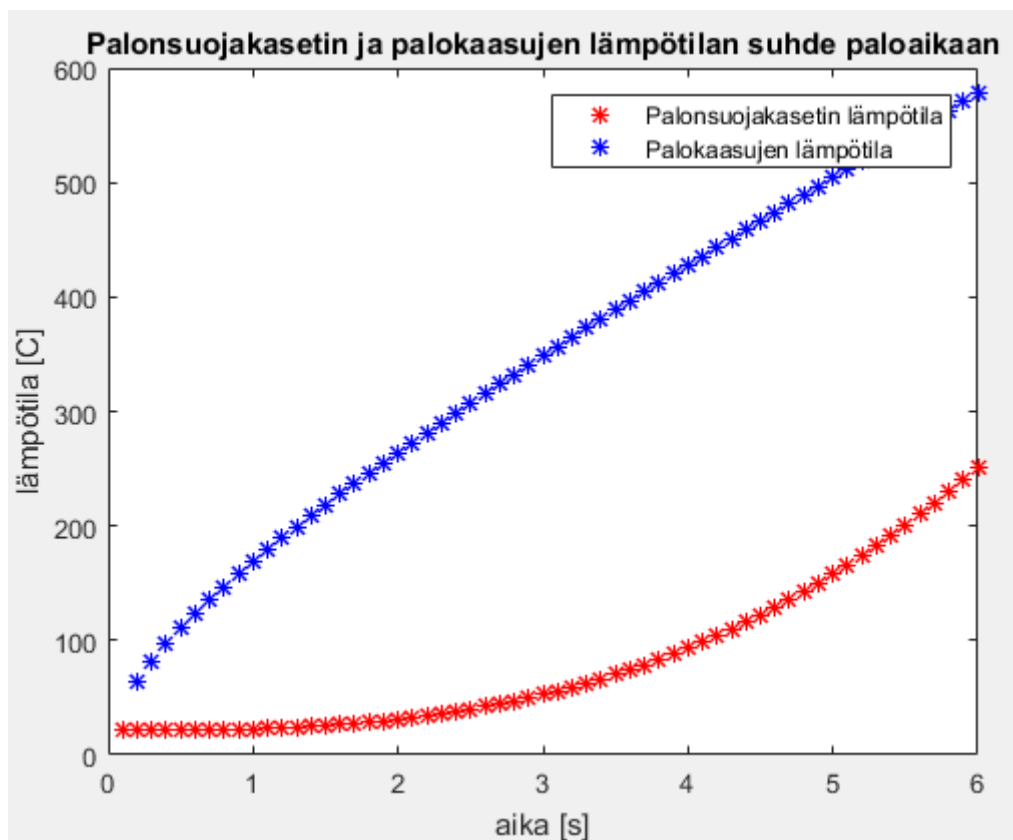
Kaavassa 38 s on stokiometrisessä palossa aineen tarvitseman ilman määrän kerroin.

Palonsuojakasetin läpi virtaavan ilmamassan määrä voidaan myös laskea suolavesimallinnuksesta tutulla kaavalla 39 (He et al. 2013, s. 248):

$$m_a = 0.068 \rho_\infty A_v^{5/4} \sqrt{g} \sqrt{\frac{2(1-\theta)}{1+\theta}} \quad (39)$$

Kaavassa 39 θ on vallitsevan lämpötilan suhde palonsuojakasetin alapuoliseen lämpötilaan.

Kun palokaasujen lämpötilan kaava syötettiin teräsrakenteiden lämpötilan laskemiseen rakennettuun kaavaan saatiin palonsuojakasetin lämpötila laskettua suhteessa palokaasujen lämpötilaan. Kuvassa 32 on esitetty palokaasujen ja niistä johtuva palonsuojakasetin lämpötila paloajan suhteen.



Kuva 32. Palonsuojakasetin sekä palokaasujen lämpötila ajan suhteen.

Kootut palolaskut on esitetty liitteessä VIII

4.9 Jäätyminen

Eräs suunnittelussa nousseista huolenaiheista liittyi palonsuojakasetin kestoon kun mahdollisesti tukkeutuneen kasetin keräämä vesi jäätyy. Jäätyessään vesi laajenee karkeasti 1.1-kertaiseksi nestemäisen faasin tilavuuteen verrattuna (Orphardt 2003). Lisäksi jään pituuden lämpötilakerroin on $50 \cdot 10^{-6}/K$ (Valtanen 2016, s. 388), mikä on melko paljon kun eri materiaalin lämpölaajenemiskertoimia verrataan keskenään.

Pahin mahdollinen tilanne rakenteen jäätymisessä syntyy, kun palonsuojakasettiin kertynyt jää jäähtyessään pienenee ja näin syntynyt tila on täyttynyt vedellä, joka sekin jäätyy. Tämän kaltainen tilanne käy erityisen kohtalokkaaksi jäämassojen lämmitessä ja luodessa siten puristusta jäätä rajoittaviin pintoihin. Vaikka kasetin rakenteessa neljä sivua ovat viistottuja, tahdottiin silti selvittää kuormittuisivatko kasetin laidat vai laajenisiko jää viistottuja reunoja pitkin. Jään lämpöliikehdinnästä aiheutuvat voimat voivat olla vesialtaassa jopa 200kPa. (Petrich et al. 2015, s. 40)

Laidan kulman ollessa tarpeeksi loiva ($\leq 30^\circ$) on voiman laidan suuntainen komponenttiosuus tarpeeksi suuri, jotta se voittaa lepokitkan ja mahdollisen kiinnijäätyksen. Näin ollen lähtee jää paisuessaan liukumaan laitaa pitkin ylöspäin. Sen sijaan, että jään laajenemisesta aiheutuva voima kohdistuisi rakenteen laitoihin, se pikemminkin on muuntunut jäämassaa liikuttavaksi voimaksi. Vaikka Paavilaisen & Tuhkurin tutkimuksessa jäästä aiheutuva voima ei juurikaan muutu laidan kulman vaihtuessa, todetaan sen johtuvan vain siitä, että vastaavan voiman matalammilla kulmilla aiheuttaa itse jään paino eikä laajenemisesta johtuva paine. (Paavilainen & Tuhkuri 2102, s. 161)

Jos palonsuojakasetin ja liukaturvaritilän välinen tila jäätyy kokonaan umpeen, tulisi se painamaan vain noin 13 kilogrammaa. Näin ollen jäätymisestä ja jään lämpölaajenemisesta aiheutuvien voimien keskittyessä jään liikuttamiseen ei palonsuojakasettiin pitäisi kohdistua mitään vaaraa aiheuttavia kuormia.

4.10 Palonsuojarakenteen asennus

Tässä kappaleessa käydään läpi lyhyesti palonsuojarakenteen tärkeimmät asennustekniset seikat.

Tukirakenne suurjännitemuuntajien valuma-altaissa koostuu IPE-120 – palkeista, jotka on ripustettu sopivalle korkeudelle, jotta koko valuma-altaan peittävästä kulku- ja huoltotasosta saadaan samassa tasossa oleva pinta. Tukirakenteen pääasiallinen tehtävä on ottaa vastaan suurimmat kuormitukset ja antaa palonsuojarakenteelle sopivassa korossa oleva tukipinta. Tukirakenne kiinnitetään seinämissä oleville L-raudoille ja tuetaan pohjasta tarvittaessa palkeilla. Siirrettävissä valuma-altaissa tukirakenteena pyritään käyttämään itse valuma-altaan muotoiltuja reunoja.

Palonsuojarakenne (palonsuojakasetti ja liukaturvaritilä) asennetaan moduuleittain tukirakenteen päälle, johon se kiinnitetään itsekierteyttävillä, sinkatuilla ruuveilla neljästä kulmasta. Tämän kaltainen sinkkipinta sinkkipintaa vasten – liitos takaa palonsuojarakenteen riittävän maadoituksen tukirakenteeseen, jolloin koko palonsuoja-arina tarvitsee maadoittaa enää vain kahdesta kohtaa kohteissa, joissa lataussähkö on huomioon otettava tekijä.

5 PALOTESTIT

Tuotteen toiminnan varmistamiseksi suoritettiin palotestejä muutaman neliömetrin koekappaleilla. Ennen virallisia VTT:n testejä tehtiin omia testejä, jotta osattiin luoda oikeanlaiset testausjärjestelyt VTT:n testeihin. Kokeessa kaadettiin 130 litraa 90 asteiseksi lämmitettyä ja sitten palamaan sytytettyä öljyä palonsuojakasetin päälle. Kokeen aikana valvottiin lämpötiloja sekä kaasujen kemiallisia pitoisuuksia. Järjestelmä putsattiin testien välillä mahdollisimman tasalaatuisen tuloksen aikaansaamiseksi. Testien kulku sekä niiden tulokset on kuvattu liitteissä IV-VI.

Öljyn esilämmittämiseen käytettiin neljää 2 kW:n uppovastusta, jolloin öljyn tiheyden ollessa 910 kg/m^3 ja ominaislämpökapasiteetin ollessa $1,67 \text{ (kJ/(kg K))}$, lämmittämiseen 10°C :sta 90°C :een kului aikaa noin 50 minuuttia. (Engineering Toolbox 2017a)

Öljyn lämmittämiseen kulunut aika saatiin empiirisistä testeistä veden lämmityksellä, sekä vastuksen tehontarpeen kaavalla 40 (Meyer 2015):

$$P=Q/(t*\chi) \quad (40)$$

Kaavassa 40 Q on tehontarve / teho [W], t on lämmitysaika [h], E on tarvittava energia [Wh] ja χ on hyötysuhde. Testilaitteen hyötysuhde saatiin tarkkailemalla 120 vesilitran lämpiämiseen 3°C asteesta 90°C asteeseen kulunutta aikaa, sekä hyödyntämällä vastuksen tehontarpeen yhtälöä, että alla olevaa taulukkoa 12.

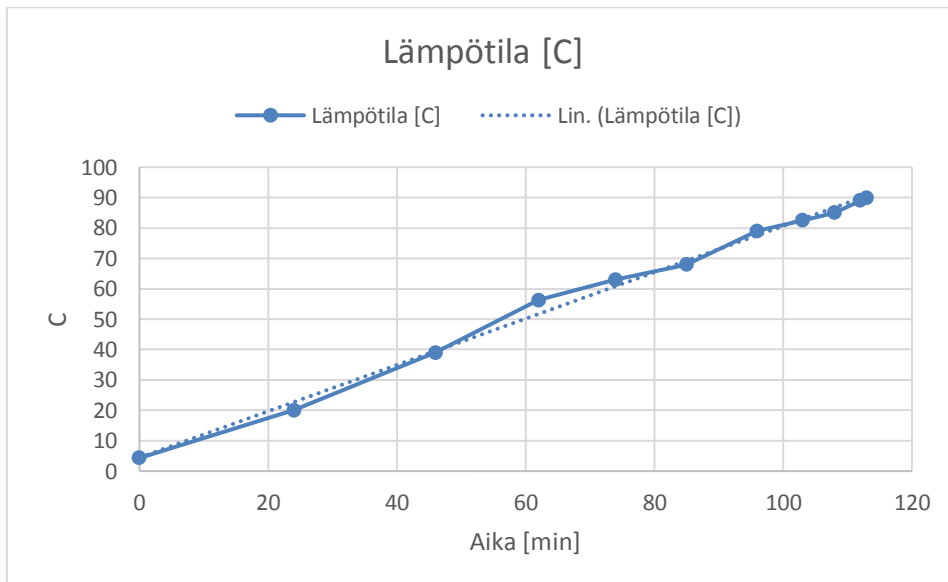
Taulukko 12. Lämpötilan nousuun tarvittava energia eri aineille. (Meyer 2015)

Lämmitettävä aine	Lämpötilan nousuun tarvittava energia Q (Wh)				
	10°C	20°C	50°C	90°C	200°C
10 L Vettä	116	232	580	1046	-
20 L Vettä	232	464	1160	2092	-
50 L Vettä	580	1160	2905	5230	-
100 L Vettä	1160	2320	5810	10460	-
Öljy	$\frac{1}{2}$ vedestä	$\frac{1}{2}$ vedestä	$\frac{1}{2}$ vedestä	$\frac{1}{2}$ vedestä	$\frac{1}{2}$ vedestä
1kg Alumiinia	2,49	4,98	12,5	22,4	50
1kg Valurautaa	1,4	2,8	7	12,6	28
1kg Kuparia	1,08	2,2	5,4	9,7	22
1kg Silumiinia	2,44	4,9	12	22	49

Veden lämmitys sujui taulukoiden 13 – 14, sekä taulukoista johdettujen kuvien 33 - 34 mukaisesti.

Taulukko 13. Veden lämpötila testilaitteistossa ajan funktiona.

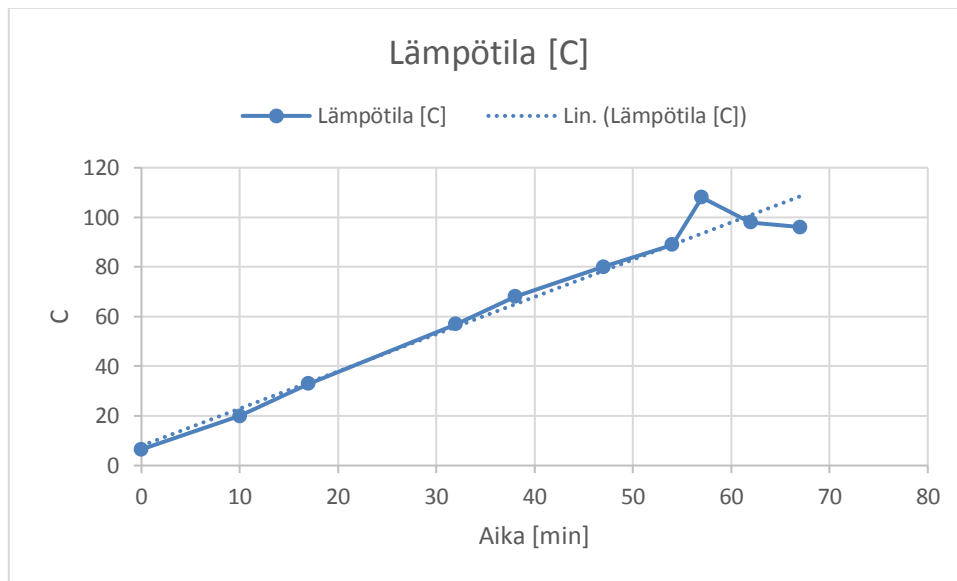
Aika [min]	Lämpötila [C]
0	4,3
24	20
46	39
62	56,3
74	63
85	68
96	79
103	82,5
108	85
112	89
113	90



Kuva 33. Veden lämpötila testilaitteessa ajan funktiona.

Taulukko 14. Veden lämpötila ajan funktiona.

Aika [min]	Lämpötila [C]
0	6,5
10	20
17	33
32	57
38	68
47	80
54	89
57	108
62	98
67	96



Kuva 34. Veden lämpötila testilaitteessa ajan funktiona.

Oheisista taulukoista 14 - 15, sekä kaavasta 40 saatiin testilaitteiston lämmityshyötysuhteeksi 0,8. Lukuun vaikuttaa lämmitysastian eristämättömyys sekä ympäröivä ilmasto.

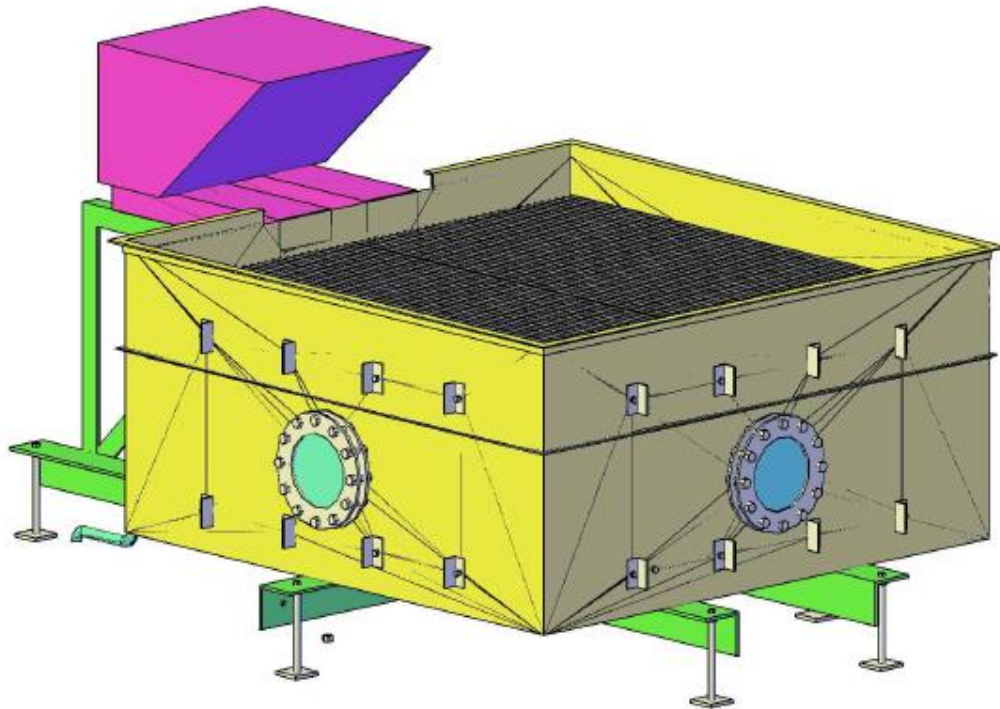
Testeissä tulotaisiin lämmittämään 120 litraa öljyä 90 asteeseen, joten taulukosta 100 l veden lämmittämiseen 90 asteen verran käytetty energiamäärä tuli puolittaa ja kertoa luvulla 120/100, jolloin saadaan energiamäärä, jolla 120 öljyä lämpenee 90 °C astetta. Tuntemalla tehon ($4 \cdot 2$ kW), lämmitykseen kuluva energiamäärän (6276 Wh) sekä testilaitteiston hyötysuhteen, voidaan kaavaa 28 hyväksikäyttäen laskea öljyn lämpenemiseen kuluva aika.

Laskennallinen aika 120 öljylitran 90 °C asteen lämmittämiseen on 0,98 h \approx 59 min. Pelastusopistolla tapahtuneissa testeissä kokonaislämmön nousun tuli olla vain 85 °C astetta ja VTT:llä 70 °C astetta, jotta testeissä käytettävä öljy olisi 90 °C asteista. Vastaavasti lämmittämiseen kulunut aika on Pelastusopistolla 55 min ja VTT:llä 45 min.

5.1 Testilaitteisto

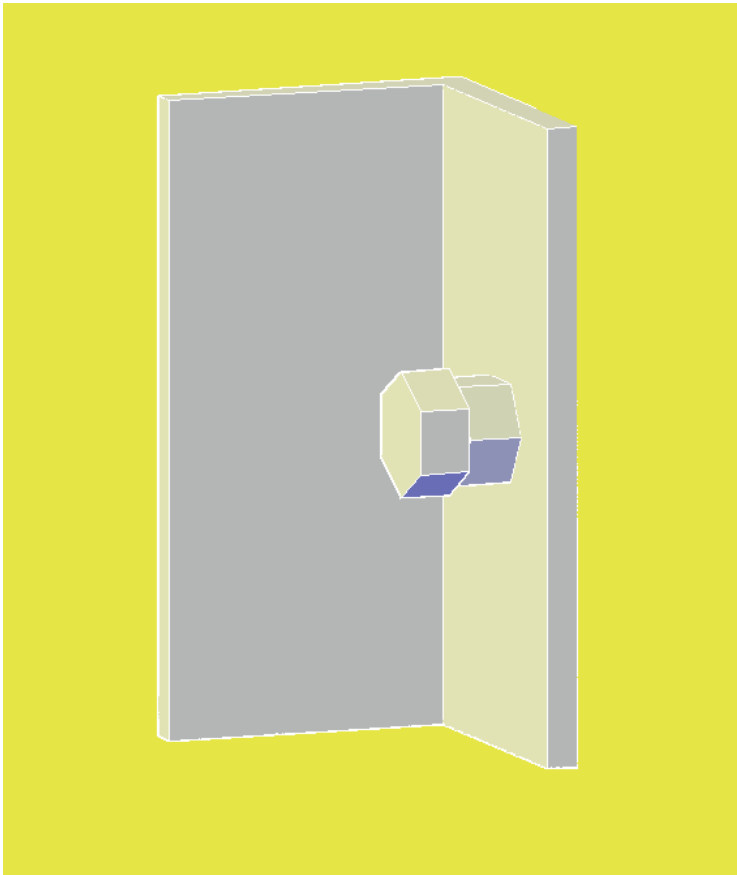
Palotestejä varten kehiteltiin oma testilaitteistonsa, jolla olisi turvallista tarkkailla palonsuojaketin toimintaa. Laitteisto koostuu kuvan 35 mukaisesti altaasta, öljysäiliöstä sekä mitauslaitteistosta. Laitteisto on koottu neljän L-profiilin päälle kuljetusta helpottamaan sekä toimimaan tukipintana. L-profiileiden päihin on liitetty säädettävä jalkasysteemi, jolla on mahdollista saattaa laitteisto maan kaltevuudesta huolimatta tasaan, sekä muuttaa kallistuskulmaa altaan tyhjennyksessä. Altaan sivuille on porattu reikiä, joihin palonsuojaketin

sekä huoltotasoja kannattelevat kiinnikkeet voidaan asentaa. Reiät ovat useassa eri tasossa, jotta testi voidaan suorittaa myös kasetin alapuolista ilmatilaa varten. Altaaseen on myös integroitu kaksi palonkestävää näkölasia palotapahtuman ja tukahtumisen seurantaan ja kuvaamista varten.



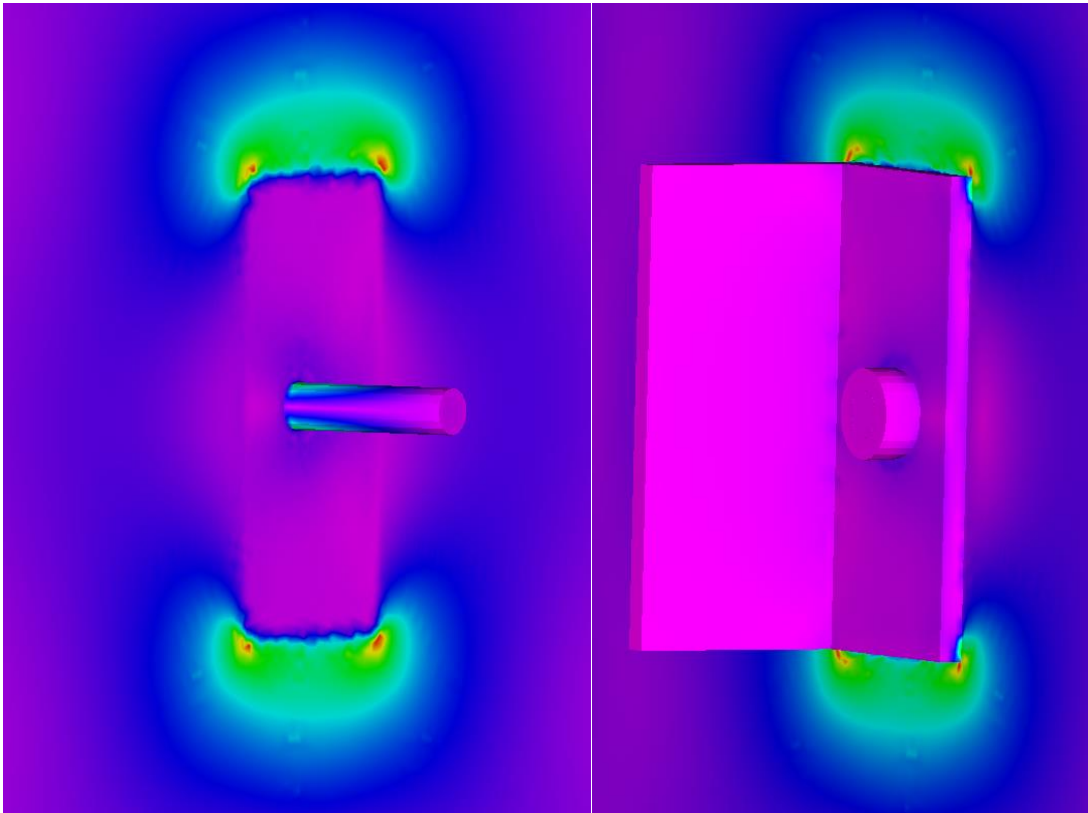
Kuva 35. Testilaitteisto

Testilaitteistoon kohdistuvat voimat eivät ole suuria, mutta altaan ohuudesta johtuen palonsuojarakennetta kannattelevat pultit aiheuttivat myötörajan ylittävän jännityksen altaan seinämiin. Tämä korjattiin kuvan 36 mukaisesti hitsaamalla pulttiliitännän ja altaan väliin 100 mm pitkät palat 50 mm L-rautaa. L-rauta levittää kannakkeesta aiheutuvan momentin suuremmalle alalle, jolloin kuormituksesta aiheutuva jännitys ei pääse kasvamaan liian suureksi. Kuormitustapauksessa otettiin huomioon palonsuojarakenteesta sekä sen kannakkeista sekä öljystä aiheutuva kuorma. Kertomalla kyseinen kuorma varmuusluvulla 1,5 saatiin kannakkekohtiin jännityksiä aiheuttava voima ~ 4 kN. Kuorma jakautuu tasaisesti neljän sivun kesken. Jakamalla kuormitus neljälle pisteelle joka sivulla ja jakamalla jännitys L-raudoilla suuremmalle alueelle saatiin jännitys laskemaan 193 MPa: n.



Kuva 36. Kannakkeesta aiheutuvat rasitukset jakava L-palkki

Jännityksiä tutkittaessa käytettiin L-raudan sekä altaan läpi menevää M 10 –pulttia. Voima vaikutti pultin päähän ja sen suuruus määräytyy käytettävien tuentojen määrästä. Kuvissa 37 - 38 on esitetty jännityksen jakautuminen kannakekohdissa.



Kuvat 37 & 38. Jännityksen jakautuminen altaan reunassa. Vasemmalla jännitykset altaan sisäpuolella, oikealla ulkopuolelta.

5.2 Itsenäiset testit

Itsenäiset testit järjestettiin valvotuissa oloissa Kuopion Pelastusopiston harjoitusalueella. Testeissä kiinnitettiin erityistä huomiota palamisessa syntyneiden myrkyllisten kaasujen aiheuttaman turvallisuusriskin suhteen. Tämä toteutettiin pitämällä joko tarpeeksi pitkä etäisyys testilaitteeseen testin aikana tuulensuunta huomioon ottaen tai käyttämällä paineilma – laitteistoa. Kaikkiaan Pelastusopistolla toteutettiin 9 testiä parametreja varioiden. Testeistä tuloksina otettiin öljypalon sammumisaika, palotapahtuman kulku, alustavia lämpötilamittauksia rakenteille ja öljylle sekä polttoaineen kulumisen paloreaktiossa. Testien kulku, palotapahtumaan vaikuttaneet tekijät sekä palokokeen variaatiot on kuvattu liitteessä IV sekä liitteessä V.

5.3 Testit VTT:llä

VTT:n testit suoritettiin VTT:n Espoon palolaboratoriossa, jossa testin kulusta ja järjestelyistä vastasivat VTT:n henkilökunta. Testeissä noudatettiin erityistä turvallisuutta paloalu-

een suuruuden ja polttoaineen määrän vuoksi. Kokeen aikana testihallissa sai olla vain koulutuksen saanut henkilökunta täydellisissä palontorjuntavarusteissa sekä paineilmalaitteistolla varustettuna.

VTT:llä toteutettiin kaikkiaan 4 testiä, kahdella eri alkutilanteella. Testeistä otettiin tuloksina palotapahtuman kulku ja sen ajat, lämpötilat sekä rakenteille että kaasuille, happipitoisuus palonsuojarakenteen alla sekä paloreaktiosta syntynyt paine-ero palonsuojarakenteen alapuolisen tilan ja testihallin välillä. Testien kulku, palotapahtumaan vaikuttaneet tekijät sekä palokokeen variaatiot on kuvattu liitteessä IV sekä VII.

6 TULOKSET

Tässä kappaleessa on eritelty tutkimuksesta, laskennasta sekä testauksesta saadut tulokset.

6.1 Lujuuslaskenta

Lujuuslaskennasta saatiin selville rungon suurin mahdollinen jänneväli rungon ollessa rakenneteräksestä S355 valmistettu IPE-120 – palkki. Laskennassa käytettiin lujuuslaskentakappaleessa esiteltyjä ja eriteltyjä arvoja itse rakenteelle että kuormitukselle. Taulukossa 8 ja kuvassa 18 on esitetty rungon jännitys sekä taipuma jännevälin suhteen.

Runkorakenteen stabiliteetti varmistettiin taivutuskestävyyden sekä kiepahduksen suhteen eikä kummankaan suhteen esiintynyt ongelmia. Runkoon ei kohdistu puristusta pitkittäissuunnassa, joten lommahdus tai nurjahdus ei tule ongelmaksi.

Runkorakenteen laipan pistekuormitukselle laskettiin myös kimmainen ja plastinen ratkaisu. Kimmoisen ja plastisen ratkaisun kaavojen johto on esitetty liitteessä IX. IPE-120 palkin laippa kestää kimmotilassa suurimmillaan 1970 N pistekuorman ja plastisen ratkaisun mukaan 7970 N pistekuorman. Molemmat kuormat ylittävät säädetyn pistekuormituksen (1200 N)

Tärkeää rakenteen lujuuslaskennan kannalta oli myös palonsuojaketin kesto, erityisesti lumikuormien suhteen. Taulukossa 8 on eritelty palonsuojarakenteen kestävä maksimaalinen lumikuorma eri tuennoilla.

Muuntajaöljyllä tehdyissä palotesteissä lämpötilat olivat niin lyhytkestoisia sekä matalia että ne eivät vielä heikentävästi vaikuta teräsrakenteeseen.

6.2 Tilavuusvirtaus

Laskennallisen tilavuusvirtauksen osoitettiin olevan noin 950 l/min kun palonsuojaketissa on nestettä sen yläreunaan asti. Nestemäärän vähetessä vähenee tilavuusvirtauksenkin suuruus hydrostaattisen paineen vastaavasti pienentyessä nestepatsaan korkeuden mukana.

Kokeellisin mittauksin todettiin palonsuojarakenteen mahdollistavan tilavuusvirtauksen olevan yli 900 l/min. Kokeellisissa mittauksissa kaadettiin 125 litraa vettä palonsuojarakenteen päälle ja videoitiin tapahtuma. Videolta voitiin tarkistaa pinta-ala jolle neste levisi ja missä ajassa kaikki neste oli valunut palonsuojarakenteen läpi.

6.3 Korroosionkesto

Palonsuojarakenteen yksi käyttökohde on suojaamattomissa ulkotiloissa, jolloin ympäristön vaikutukset (kosteus, suola, maa-aines, lika, saasteet, lämpö ym.) vaikuttavat rakenteeseen ainetta poistavasti ja siten käyttöikää lyhentävästi. Tästä syystä tuli palonsuojarakenteen suojata korroosiota (kemiallista ja galvaanista) vastaan. Parhaaksi keinoksi tässä osoittautui kuumasinkitys. Taulukossa 6 on esitetty kuumasinkityksellä saavutettava kestoikä sinkkipinnalle.

Palonsuojakasetti tulee sinkitä standardin SFS-EN 10346 – mukaisesti, jolloin C3-syövyttävyyssluokassa palonsuojakasetin sinkkipinnan kestoikäksi tulee 20–60 vuotta.

Palossa sinkkipinnoite voi ohentua merkittävästi sinkin alhaisen sulamislämpötilan vuoksi. Muuntajaöljyllä tehdyissä testeissä kaasun lämpötilat kohosivat vain 200 °C ja palonsuojakasetin lämpötila korkeimmillaan noin 100 °C.

6.4 Palolaskenta

Runkorakenteen lämpeneminen lujuuden menetyksen kannalta kriittiseen lämpötilaan ideaalisella hiilivetyjen palamisella kestäisi yli 30 tuntia. Palon ollessa 800 °C kestäisi rakenteen lämpeneminen kriittiseen lämpötilaan yli 90 tuntia.

Palonsuojakasetin lämpötila laskettiin kolmella eri palotapahtuman lämmöllä: hiilivetyjen ideaalisesta palamisesta syntyvällä lämpötilalla, palon ollessa 600 °C ja palon ollessa 800 °C. Arvot ovat hypoteettiselle tilanteelle, jossa paloa ei liiemmin rajoiteta. Testauksesta saadut palotapahtuman arvot ovat paljon laskennassa käytettäviä arvoja matalammat, palokaasujen lämpötilan jäädessä noin 200 °C asteeseen.

Kuvista 29-31 voidaan havaita, että palonsuojaketin lämpenemiseen muuntajaöljyn itsesyttymislämpötilaan asti kestää teoreettisissakin olosuhteissa jopa 90 sekuntia. Laskennassa ei otettu edes huomioon muita rakenteita kuin palonsuojaketin sen ollessa ohuin ja siten nopeimmin lämpiävä rakenne. Tästä syystä palonsuojaketin on palonsuojarakenteen heikoin lenkki koko rakenteen lämpiämistä tarkastellessa. Laskennassa ei myöskään otettu huomioon palonsuojaketista haihtuvaa tai siirtyvää lämpöä.

Kootuista palolaskuista saatiin palonsuojaketin sekä palotapahtumassa syntyneiden palokaasujen lämpötilat ajan suhteen. Nämä arvot on esitetty kuvassa 32.

6.5 Palokokeet

Palokokeissa varioitiin palotapahtumaan vaikuttavia tekijöitä valuma-altaan kammiokorkeuden, esipaloajan, altaan puhtauden sekä siemenvesityksen osalta. Jokaisessa testissä palo sammui palonsuojarakenteen yläpuolisen palon sammussa 3-6,5 sekunnissa ja sen alapuolisen palon sammussa 10 sekunnissa tai ennemmin.

6.5.1 Itsenäiset palokokeet

Itsenäisissä palokokeissa Pelastusopistolla toteutettiin 9 palokoea, joissa testattiin palonsuojarakenteen toimivuutta 3 eri tilanteessa. Testin kulku on tarkemmin kuvattu liitteessä IV. Palo sammui joka kerta hapenpuutteeseen.

Itsenäisissä palokokeissa palonsuojarakenteen yläpuolinen palo sammui 6,5-3 sekunnissa palonsuojarakenteen alle jäävän tilan korkeudesta määräytyen. Sattumisaajat sekä testiin vaikuttaneet tekijät on eritelty taulukossa 15

Taulukko 15. Pelastusopistolla tehtyjen testien tulokset ja niihin vaikuttaneet tekijät

Testi	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Palonsuojarakenteen positio	ylä	ylä	ylä	ylä	ylä	ylä	ala	ala	ala
Siemenvesi	ei	ei	ei	ei	ei	kyllä	ei	ei	ei
Altaan kunto	X,Y,Z	X	X	X	X,Y,Z	X	X,Y	X	X
Öljymäärä [l]	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Öljyn lämpö [°C]	96	88	96	93	89	90	90	89	90
Öljyn laatu	0	1	2	0	0	1	0	1	2
Esipolttoaika [min:s]	1:40	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	4:00
Yläpuolisen palon sammumisaika [s]	6,5	3	3	3	3	3	4	3	4

Selitykset: X = valutettu, Y = lastalla vedetty, Z = Öljyt poltettu kaasupolttimella

0 = käyttämätön öljy, 1 = kerran käytetty jne.

6.5.2 VTT:lla tehdyt palokokeet

VTT:n palokokeissa tehtiin 4 palokoetta, joilla testattiin palonsuojarakenteen toimivuutta kahdella eri korkeudella valuma-altaan pohjasta. Testin kulku on tarkemmin kuvattu liitteissä IV ja V. Palo sammui joka kerta hapenpuutteeseen.

VTT:n palokokeissa palonsuojarakenteen yläpuolinen palo sammui 6,5-3 sekunnissa palonsuojarakenteen alle jäävän tilan korkeudesta riippuen. Palotapahtumasta johtuvien palokaasujen lämpötila nousi ylimmillään 200 °C – asteeseen, palonsuojakasetin pintalämpötila nousi ylimmillään 100 °C – asteeseen, happipitoisuus palonsuojarakenteen alapuolisessa tilassa putosi alimmillaan ~3 %:n ja paine-ero palonsuojarakenteen alapuolisen tilan ja testihallin välillä oli suurimmillaan 375 Pa.

Taulukossa 16 on esitetty tiivistetysti palotapahtumasta johtuneet arvot sekä niihin vaikuttaneet tekijät. Kaikki arvot on tarkemmin taulukoitu ja esitetty liitteessä V.

Taulukko 16. VTT:llä tehtyjen testien kulku ja niihin vaikuttaneet tekijät

Testi	1	2	3	4
Palonsuojarakenteen positio	ylä	ylä	ala	ala
Siemenvesi	ei	ei	ei	ei
Altaan kunto	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z
Öljymäärä [l]	120	120	120	120
Öljyn lämpö [°C]	90	90	90	90
Öljyn laatu	0	0	0	0
Esipolttoaika [min:s]	2:00	2:00	2:00	2:00
Yläpuolisen palon sammumisaika [s]	6,5	6,0	3	3
Suurin paine-ero [Pa]	325	375	80	78
Palokaasujen suurin lämpötila palonsuojarakenteen alla [°C]	210	145	80	100
Palokaasujen suurin lämpötila palonsuojarakenteen päällä [°C]	200	210	94	120
Palonsuojakasetin suurin lämpötila [°C]	98	120*	64	70
Happipitoisuus palonsuojarakenteen alapuolisessa tilassa [%]	3	7	10	13

Selitykset: X = valutettu, Y = lastalla vedetty, Z = painepesurilla ja aineella pesty

0 = käyttämätön öljy, 1 = kerran käytetty jne.

*=anturin yhteet ja anturi jäivät palamaan ja vääristivät tuloksia

6.6 Palonsuojarakenteiden vertailu

Taulukossa 1 on esitetty jo olemassa olevien palonsuojarakaisujen ominaisuuksien vertailu keskenään ja Liekkiloukkuun verrattuna.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSET

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli suunnitella uudenlainen palonsuojarakenne palavien nesteiden valuma-altaita, siirtoa ja varastointia varten. Palonsuojarakenteen tuli toimia myös huolto- ja hoitotasona, kestää ulkotiloista johtuvaa korroosiota sekä päästää palava neste lävitsensä tarpeeksi suurella tilavuusvirtauksella läpi, jonka jälkeen rakenteen tuli tukahduttaa kyseinen palo turvallisesti ja nopeasti allensa.

Tuloksena syntyi palonsuojarakenne, joka toimii myös standardin SFS-EN 14122-2:2016 – mukaisena työskentely- ja kulkutasona. Palon sammuttava vaikutus perustuu palonsuojarakenteen läpi kulkevien kaasuvirtausten suuntaa rajoittavaan tekijään, jolloin paloreaktio ei palonsuojarakenteen alla saa tarpeeksi happea reaktion jatkamiseen vaan tukahtuu itsestään syötyään palonsuojarakenteen alapuolisessa tilassa olevan hapen.

Testien sekä laskennan mukaan Liekkiloukku-palonsuojarakenne soveltuu käyttötarkoitukseensa ja päästää läpi sekä sammuttaa allensa palavan muuntajaöljyn. Sammutus tapahtuu tarpeeksi nopeasti, jotta palonsuojarakenne ei pääse lämpiämään öljyn itsesyttymislämpötilaan asti.

Palonsuojarakenne päästää lävitsensä palavan nesteen yli 900 l/min tilavuusvirtauksella ja sammuttaa rakenteen yläpuolisen palon noin 6 sekunnissa. Palonsuojarakenteen alapuolinen palo sammuu noin 10 sekunnissa. Tässä ajassa palonsuojarakenne ei ehdi lämpenemään lähellekään tutkimuksissa esimerkkinä käytetyn muuntajaöljyn itsesyttymislämpötilaa, jolloin palotapahtumalla ei ole edellytyksiä syttyä uudelleen happipitoisuuden palattua taas tarpeeksi korkealle, jotta hapen puolesta olisi paloreaktiolla edellytys toimia.

Palonsuojarakenne kestää maksimaalisesti mitoitussarvon mukaan kuormitettuna ideaalissa hiilivetypalossa yli 30 tuntia ennen kuin rakenteen lujuusarvot romahtavat lämmön noususta johtuen.

Palonsuojarakenne sinkittää korroosionkestäväksi ja sinkkipinnalle saadaan kestoikää ulkotiloissa 20–60 vuotta ympäristöstä riippuen. Muuntajaöljypalossa ei ole näiden tutkimusten perusteella syytä olettaa palonsuojarakenteen sinkkipinnoitteen sulavan.

Palonsuojarakenne myös kestää jopa 5 kN/m^2 hyötykuormaa ja ainakin $2,65 \text{ kN/m}^2$ lumi-kuormaa 1.5 varmuuskertoimella. Rakenne on myös suunniteltu jäätyminen kestäväksi sekä itsepuhdistuvaksi eikä ole liukas öljyisenäkään. Rakenteen hyötykuormaa voidaan kasvattaa yksinkertaisesti rungon tuentoja sekä dimensioita muuttamalla, kuten myös liukaturvaritilää varioimalla.

Toteutettujen testien sekä laskennan mukaan ei muuntajaöljypalo heikennä palonsuojarakenteen lujuus-, tai korroosionkesto-ominaisuuksia.

Tämän tutkimuksen perusteella Liekkiloukku – palonsuojarakenne toimii hyvin muuntajaöljyn ja vastaavien nesteiden sammuttamisessa nopeasti ja varmasti. Palonsuojarakenteen toimivuuden varmistamiseksi muiden palavien nesteiden kohdalla tulee palolaskentaa laajentaa ja toteuttaa uusi koesarja, jossa varioidaan tällä kertaa palavia nesteitä ja tarkkaillaan niiden synnyttämän paloreaktion ominaisuuksia.

Liekkiloukku – palonsuojarakenne sopii myös pohjoisen oloihin, sillä se on lumikuorman ja jäätyminen kestävä ja liukaturvaritilä päästää sataneen lumen lävitsensä, jolloin lumisateen jälkeen ei tarvitse välttämättä palonsuojarakennetta puhdistaa, jotta se olisi turvallinen kulkea. Liekkiloukun liukaturvaritilä päästää lävitsensä mm. tuulen mukana tulleet roskat ja palonsuojaketin viistojen pintojen sekä tarpeeksi suurien aukkojen vuoksi sadevesi huuhtelee roskat sen pinnalta pois. Tämä itsepuhdistuvuus – ominaisuus tekee Liekkiloukun huoltotarpeesta vähäisen.

Modulaarinen rakenne helpottaa itse Liekkiloukun ja sen alapuolisen valuma-altaan huoltoa mahdollistaen Liekkiloukun alle pääsyn mistä vain 4 mutteria avaamalla ja 1 m^2 kokoisen moduulin pois nostamalla. Liekkiloukun kunnontarkkailu on myös erittäin helppoa, sillä rakenteet ovat koko ajan näkyvillä liukaturvaritilän läpi, joten mahdolliset ongelmakohdat on helppo havaita.

Liekkiloukun koostuessa liukaturvaritilästä sekä sen alapuolisesta palonsuojaketistä on sen palonsuojaava ominaisuus varmistettu laiterikon tai onnettomuuden aikaanakin. Liukaturvaritilän ottaessa pääkuormitukset sekä iskut vastaan ei suurempikaan putoava kappale vaaranna palonsuojaa palonsuojaketistä vaurioittamalla.

Palotapahtuman yhteen laskuun kokoavaa kaavakokoelmaa on vielä parannettava. Se laskee uskottavat ja toteutettujen sekä edeltävien testien arvoja vastaavat arvot sekä palokaasujen että palonsuojakasetin lämmölle. Kuitenkin paineen, kriittisen paineen sekä hapen kulutuksen ja siten palotapahtuman kestoajan suhteen ei laskuri vielä anna empiiristen kokeiden mukaisia arvoja. Tästä johtuen laskurin jatkokehitystä vaaditaan, jotta sitä voisi uskottavasti käyttää Liekkiloukun toimivuuden arviointiin. Vaikka paloreaktio onkin tapahtumana erittäin monimutkainen, on mahdollista rakentaa laskuri, joka antaisi edes perustavanlaatuisen ja kenties paremmankin arvion paloreaktion arvoista Liekkiloukkaa käytettäessä. Tärkein kehityskohta laskurissa on palotehon kaavan muuttaminen aika- sekä happipitoisuus – sidonnaiseksi, jolloin laskuri myöskin varmaan tuottaisi uskottavampia arvoja hapenkulutukselle sekä syntyville paineille.

Tavoitteena on kehittää laskuri, jolla voidaan laskea eri aineille paloreaktion tärkeimmät arvot Liekkiloukkaa käytettäessä. Näihin arvoihin kuuluu paloreaktiosta johtuvat lämpötilat, paine, happipitoisuuden muutos sekä aika, jossa palo käyttää Liekkiloukun alapuolisen tilan hapen loppuun ja siten tukahduttaa itsensä.

LÄHTEET

Aurecongroup. Transformer fire risk mitigation. 2107. [Aureconin www-sivuilla]. Päivitetty 10.7.2017. [Viitattu 2.7.2017]. Saatavissa: <http://www.aurecongroup.com/en/thinking/thinking-papers/transformer-fire-risk-mitigation.aspx>

Bengtsson, L-G. 2001. Enclosure fires [verkkodokumentti]. Swedish Resque Services Agency. Huskvarna, Sweden: 2001. [Viitattu: 22.5.2017]. s. 194. Saatavilla PDF-tiedostona: <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/20782.pdf>

Chemguard. 2107a. General foam information. [Chemguardin www-sivuilla]. Päivitetty 12.6.2017. [Viitattu 2.7.2017]. Saatavissa: <http://www.chemguard.com/about-us/documents-library/foam-info/general.htm>

Chemguard. 2017b. Design manuals: Diked & Spill protection. [Verkkodokumentti]. Mansfield: 2005 [Viitattu 2.7.2017]. Tuotedokumentti. Chemguard. 4 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.chemguard.com/pdf/design-manuals/D10D03200.pdf>

Chow, W.K. Li, J. 2011. On the bidirectional flow across an atrium ceiling vent. Building and environment 46. Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hungghonm, Kowloom, Hong Kong: 12.6.2011. [Viitattu 7.6.2017]. s. 2598–2602.

Electrotechnik. Oil leakages in transformers. 2106. [Electrotechnicin www-sivuilla]. Päivitetty 9.7.2017. [Viitattu 1.7.2017]. Saatavissa: <http://www.electrotechnik.net/2014/01/oil-leakages-in-transformers.html>

Fedechko, R. Hanania, J. Heffernan, B. Jenden, J. Stenhouse, K. Toor, J. Donev, J. 2017. Hydrocarbon combustion [Calgaryn yliopiston www-sivuilla]. Calgary: 2017. [Viitattu: 14.5.2017]. University of Calgary. Saatavissa: http://energyeducation.ca/encyclopedia/Hydrocarbon_combustion

Finnritilä. 2012. Tasoprofiilit [verkkodokumentti.] Julkaisupaikka tuntematon: 31.5.2012. [Viitattu 26.2.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.meiser.de/fi/luette-lot.html?file=files/Meiser%20fi/Download%20FI/Tasoprofiilit.pdf>

Finnritilä. 2017. Ritolät [verkkodokumentti]. Iisalmi: 2009 [viitattu 23.4.2017]. Tuotedoku-
menti. Finnritilä Oy. 52 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.meiser.de/fi/luette-lot.html?file=files/Meiser%20fi/Download%20FI/Ritila%CC%88t.pdf>

Gottuk, D. White, D. 2016. Liquid Fuel Fires. SFPE Handbook of Fire Protection Engineer-
ing. Fifth edition. Springer. Greenbelt, MD, USA: 2016. [Viitattu 7.6.2017]. s. 3512.

He, Q. Li, C. Lu, S. 2013. Vent size effect on self-extinction of pool fire in a ceiling vented
compartment. Procedia Engineering 62. State Keu Laboratory of Fire Science, University of
Science and Technology of China, Hefei 230026, China: 2013. [Viitattu 9.6.2017] s. 7 (242–
249)

Karlsson, B. Quintiere, J. 2000. Enclosure fire. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida: 2000.
[Viitattu 8.6.2017]. s. 320.

Kinmachi. 2017. New Item Steel Strip DC01 Material. [Kinmachin [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivi-
tetty 10.7.2017. [Viitattu 2.7.2017]. Saatavissa: [https://kinmachi.en.alibaba.com/pro-
duct/60464009051-803221682/New_Item_Steel_Strip_DC01_Material.html](https://kinmachi.en.alibaba.com/product/60464009051-803221682/New_Item_Steel_Strip_DC01_Material.html)

Lu, S. Zhang, J. Li, C. Yuen, R. 2014. Vent Location impacts on Building Compartment Fire
under Natural Roof Ventilation. APCBEE Procedia 9 (2014) 360–364. [Viitattu 9.6.2017].
s. 4.

Orphardt, C. 2003. Which is more dense – Ice or Liquid Water? [Elmhurst Collegen [www-
sivuilla](http://www.sivuilla)]. Virtual Chembook, Elmhurst College: 2003. [Viitattu 26.6.2017]. Saatavissa:
<http://chemistry.elmhurst.edu/vchembook/122Adensityice.html>

Outokumpu. 2013. Outokumpu stainless steel handbook [verkkodokumentti]. Espoo: 2103 [viitattu 3.7.2107]. Tuotedokumentti. Outokumpu Oy. 92 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu-stainless-steel-handbook.pdf>

Oy Meyer vastus Ab. 2015. Rakenne / mitoitusohjeet [Meyer-vastuksen www-sivuilla]. Julkaisupaikka tuntematon:2015. Päivitetty: 11.7.2017. [Viitattu 1.5.2017]. Saatavissa: <http://www.meyervastus.fi/tuotteet/nesteiden-lammitys/putkivastukset/taivutusmallit-ja-kuvia-3/>

Paavilainen, J. Tuhkuri, J. 2012. Pressure distributions and force chains during simulated ice rubbing against sloped structures. Cold Regions Science and Technology 85. Department of Applied Mechanics, School of Engineering, Aalto University, Finland: 3.9.2012. [Viitattu 26.6.2017]. s.17.

PcP. 2013a. PCP. fire protection gratings type LHD [verkkodokumentti]. Julkaisupaikka tuntematon: 16.12.2013. [Viitattu 10.4.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.ren.no/documents/10206/72058/Metallrist,%20PcP.+fire+protection+gratings+type+LHD.pdf/bc18170f-149f-433f-9f94-b8e852601223>

PcP. 2013b. PCP. fire protection LHD gratings for trafostations [verkkodokumentti]. Julkaisupaikka tuntematon: 27.6.2016. [Viitattu 15.4.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://en.pcp.dk/media/26362401/114_LHD-TRAFO_Brochure-UK-DK.pdf

PcP. 2013c. PCP. safety gratings type LHD [PCP:n www-sivuilla]. Julkaisupaikka tuntematon. Päivitetty 13.7.2017. [Viitattu 20.2.2017]. Saatavissa: http://en.pcp.dk/pcp_products/safety-gratings/safety-gratings-type-lhd

Peda. 2017. Palaminen. [Kotkan perusopetuksen www-sivuilla]. Päivitetty 10.7.2017. [Viitattu 20.3.2017]. Saatavissa: <https://peda.net/kotka/perusopetus/kotkansaaren-koulu/kt/oppiaineet/kemia/jannen-ryhmat/1-yleinen-kemia/kemiallinen-reaktio/palaminen>

Petrich, C. Saether, I. Fransson, L. Sand, B. Arntsen, B. 2015. Time-dependent spatial distribution of thermal stresses in the ice cover of a small reservoir. *Cold Regions Science and Technology* 120. Julkaisupaikka tuntematon: 11.9.2015. [Viitattu 26.6.2017]. s. 9.

Puolitaival, M. 2015. Palofysiikan lyhyt oppimäärä. [Satakunnan pelastuslaitoksen www-sivuilla]. Päivitetty 10.7.2017. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <http://www.satapelastusblogi.fi/palofysiikan-lyhyt-oppimaara/>

Rakovic, A. 2015. Fire Testing of fire protection gratings type LHD [verkkodokumentti]. Göteborg 28.8.2015. [Viitattu 15.4.2017]. SP Technical Research Institute of Sweden. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.pcp.dk/media/13812659/SP_Report_Fire_protection_gratings_LHD.pdf

Royal Society of Chemistry. 2017. Periodic Table - zinc [Royal Society of Chemistryn www-sivuilta]. [Viitattu 30.08.2017] Saatavissa: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/30/zinc>

SFS-EN 10346. 2015. Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut kylmämuovattavat ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki. Metalliteollisuuden Standardointiyhdistys ry. 73 s.

SFS-EN ISO 1461. 2009. Valurauta- ja teräskappaleiden kuumasinkkipinnoitteet. Spesifikaatiot ja testausmenetelmät. Helsinki. Metalliteollisuuden Standardointiyhdistys ry. 35 s.

SFS-EN ISO 14713-1. 2009. Sinkkipinnoitteet. Ohjeet ja suositukset rauta- ja teräsrakenteiden korroosionestoon. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet ja korroosionkestävyys. Helsinki. Metalliteollisuuden Standardointiyhdistys ry. 36 s.

SFS-EN 1991-1-2+AC. 2003. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Helsinki. Rakennetuoteollisuus RTT ry. 104 s.

SFS-EN ISO 9223. 2012. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation. European Committee for Standardization. Brussels. S. 28.

Siirilä, R. Nakari, P. Viljakainen, S. 1978. Teräsrakenteiden palotekninen mitoitus. Jyväskylä: Teräsrakenneyhdistys. 160 s.

Suomen kuumasinkintyjät ry. 2007. Teräksen valinta kuumasinkittävään rakenteeseen [verkkodokumentti]. Kokkola. Julkaistu 2007. [Viitattu 15.02.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.kuumasinkitys.fi/teraksenvalintaohje_2007.pdf.

Suomen ympäristökeskus. 2013. Kattojen peruslumikuorma. [Suomen ympäristökeskuksen www-sivuilla]. Päivitetty 21.10.2013. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <http://www.i2.ymparisto.fi/i2/kattolumikuorma.html>

Tanaka, T. 2016. Vent Flows. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth edition. Springer. Greenbelt, MD, USA: 2016. [Viitattu 7.6.2017]. s. 3512.

Teollisuuden Voima Oyj. 2013. OL1 & OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt [verkkodokumentti]. Helsinki. Julkaistu 2013. [viitattu 17.2.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/OL1_OL2_laitosyksikot_tekninen_esite.pdf

Teräsrakenneyhdistys. 1978. Teräsrakenteiden palotekninen mitoitus. Jyväskylä. 1978.

Teräsrakenneyhdistys. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Eurocode 3 oppikirja. Helsinki. Julkaistu 2010.

Teräsrakenneyhdistys. 2015. Teräs kosketuksissa muiden materiaalien kanssa [verkkodokumentti]. Julkaisupaikka tuntematon: 17.4.2015. [Viitattu 10.7.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/152/89718ce/teras_kosketuksissa_muiden_materiaalien_kanssa_1703_2015.pdf

The Engineering Toolbox. 2017a. Specific Heat of Liquids and Fluids [The Engineering Toolboxin www-sivuilla]. Julkaisupaikka tuntematon: 2017. [Viitattu 24.5.2017]. Saatavissa: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-fluids-d_151.html

The Engineering Toolbox. 2017b. Temperature and strength of metals [The Engineering Toolboxin www-sivuilla]. Julkaisupaikka tuntematon: 2017. [Viitattu 30.8.2017]. Saatavissa: http://www.engineeringtoolbox.com/metal-temperature-strength-d_1353.html

Trafcomic. Muuntaja. 2017. [Trafcomicin www-sivuilla]. Päivitetty 10.07.2017. [Viitattu 20.2.2017]. Saatavissa: <http://www.trafomic.fi/muuntaja>

T&D World. Transformers transformed. 2104. [T&D Worldin www-sivuilla]. Päivitetty 10.7.2017. [Viitattu 2.7.2017]. Saatavissa: <http://www.tdworld.com/sponsored-articles/transformers-transformed>

Univar. 2010. Käyttöturvallisuustiedote Shell Diala [verkkodokumentti]. Vantaa: 9.9.2010. [Viitattu 12.3.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: https://hyvamaa.fi/application/files/7014/3039/3193/GSAP_msds_00107934.PDF

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21. painos. Mikkeli: Genesis-kirjat Oy. 1296 s.

Viking. 2009. Deluge system manual [verkkodokumentti]. Hastings: 2009 [viitattu 6.7.2017]. Tuotedokumentti. Viking corp. 64 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.vikingcorp.com/sites/default/files/documents/Deluge%20System%20Manual.pdf>

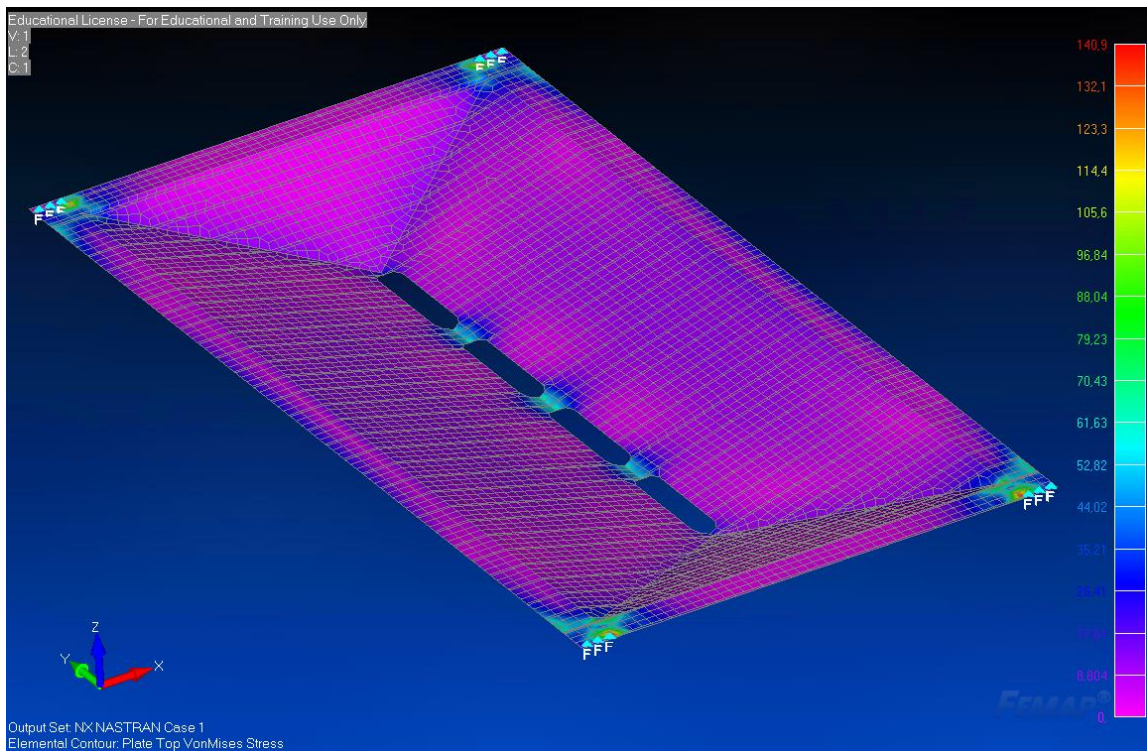
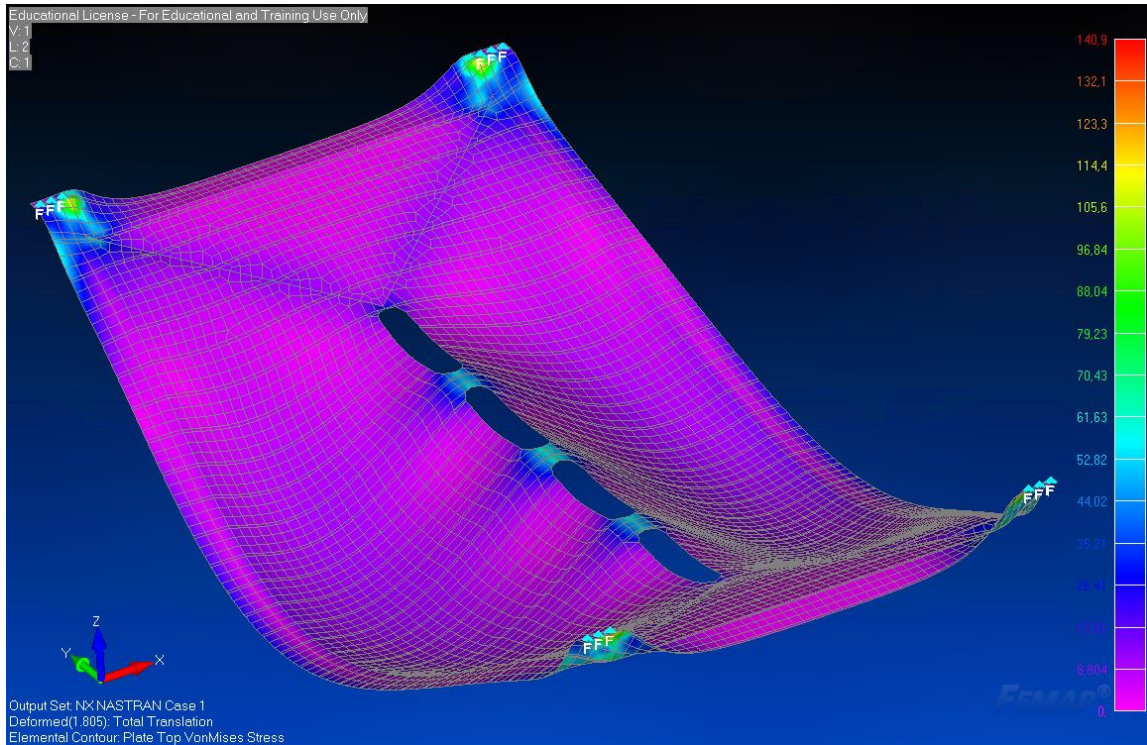
Väisänen, P. 2017. Konetekniikan kandidaatti; toimitusjohtaja, Fintekra Oy. Haastattelu 13.2.2017. Haastattelijana Mikko Myllymäki. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Wirén, M. 2017a. Oppiarvo, asema yrityksessä. Haastattelu 14.6.2017. Haastattelijana Mikko Myllymäki. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

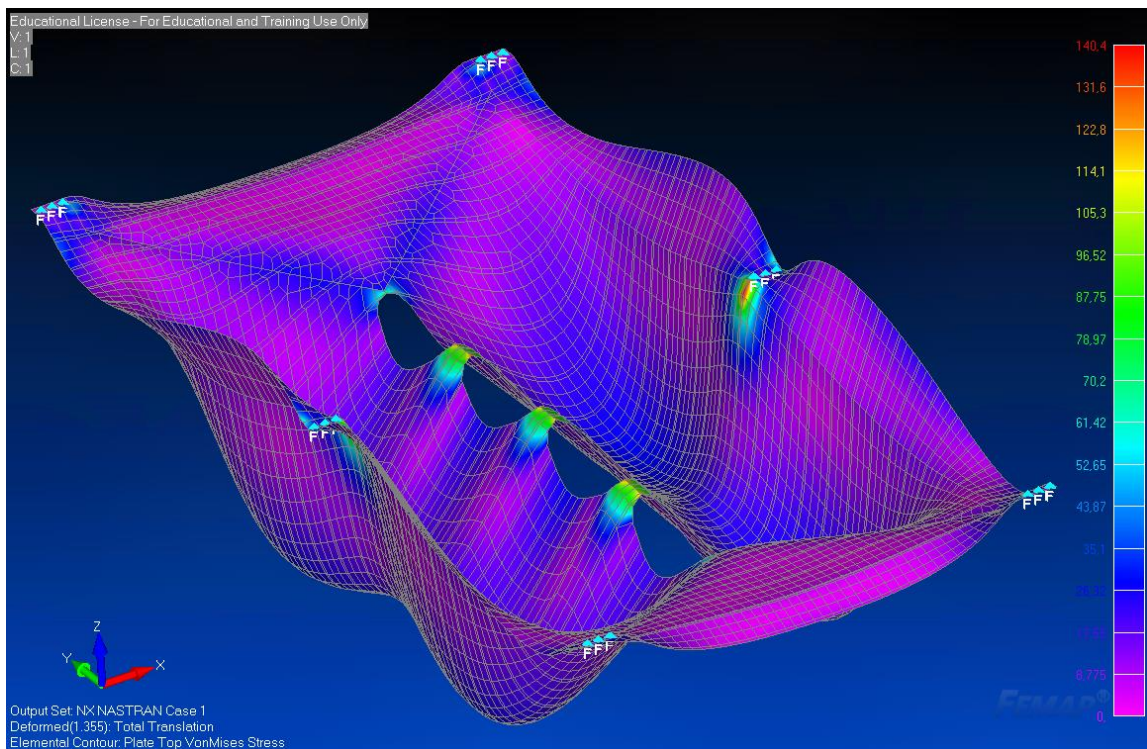
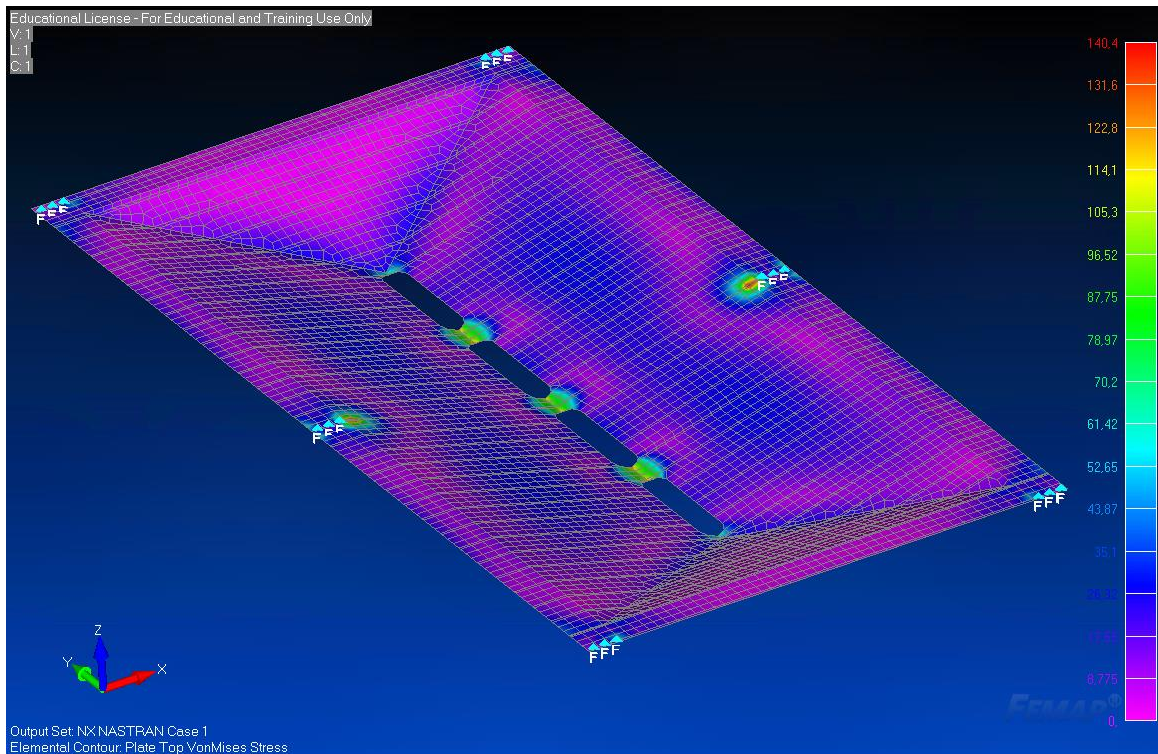
Wirén, M. 2017b. re: Ulvila ACT2 pilotti [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Heikki Hynninen, Timo Heiskanen, Pertti Väisänen, Mikko Myllymäki. Lähetetty 24.3.2017 klo. 13.23 (GMT +0200)

LIITTEET

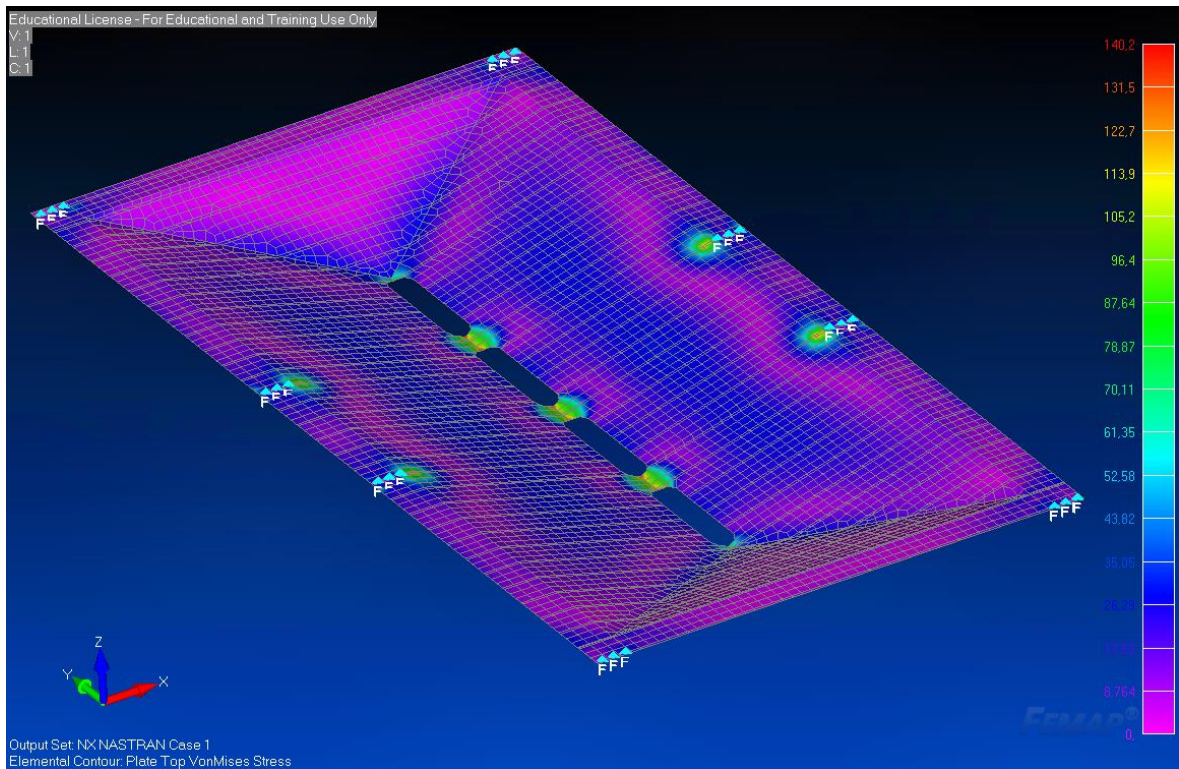
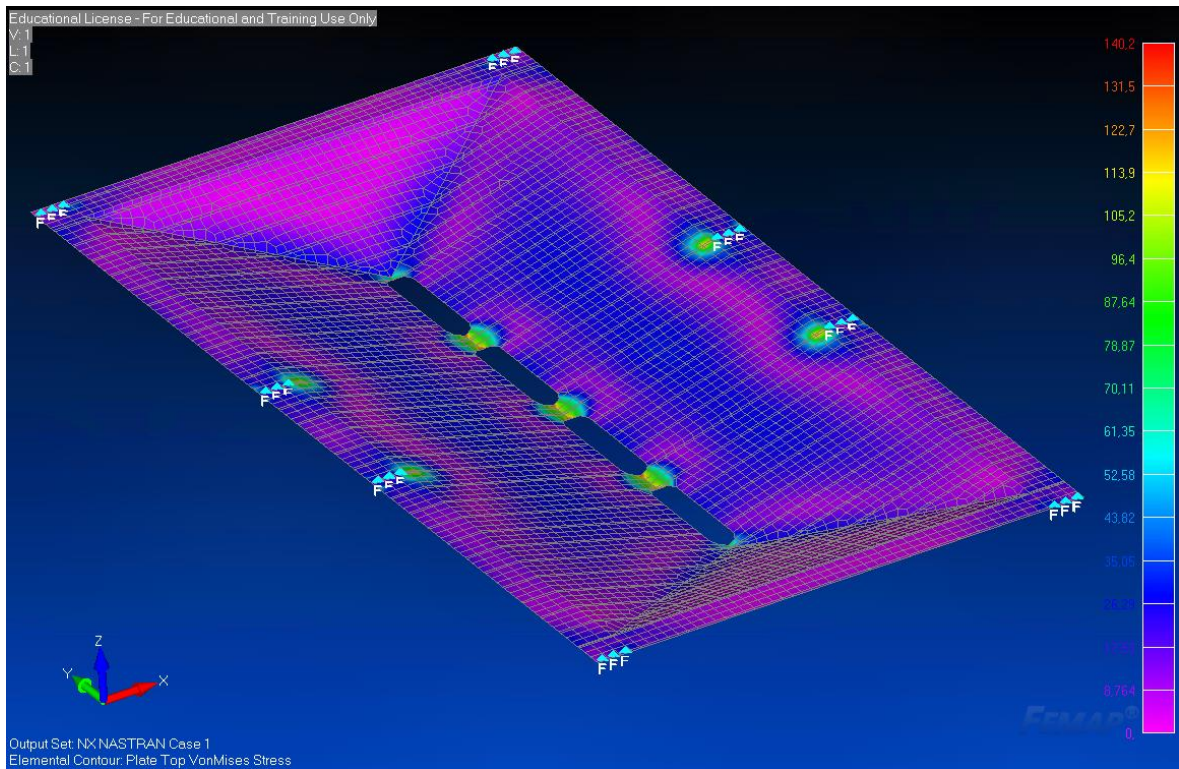
Liite I Palonsuojakasettien rasitukset yksilöllisesti tuettuna



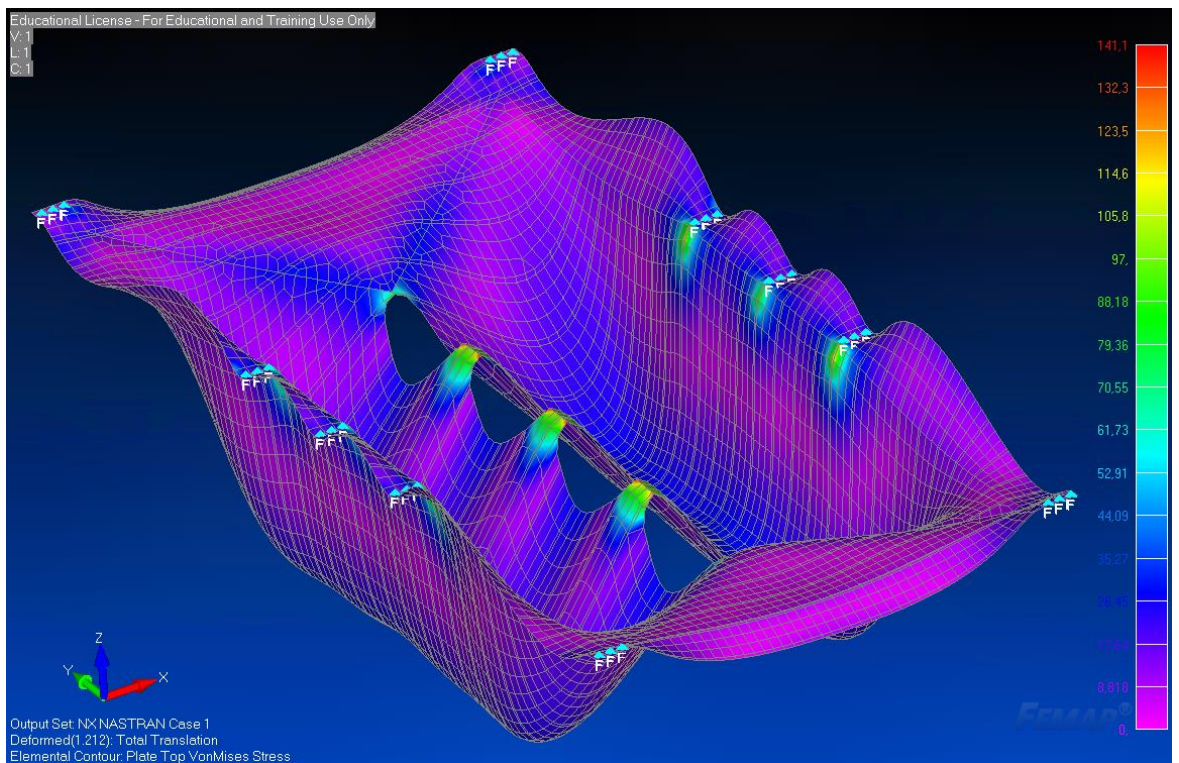
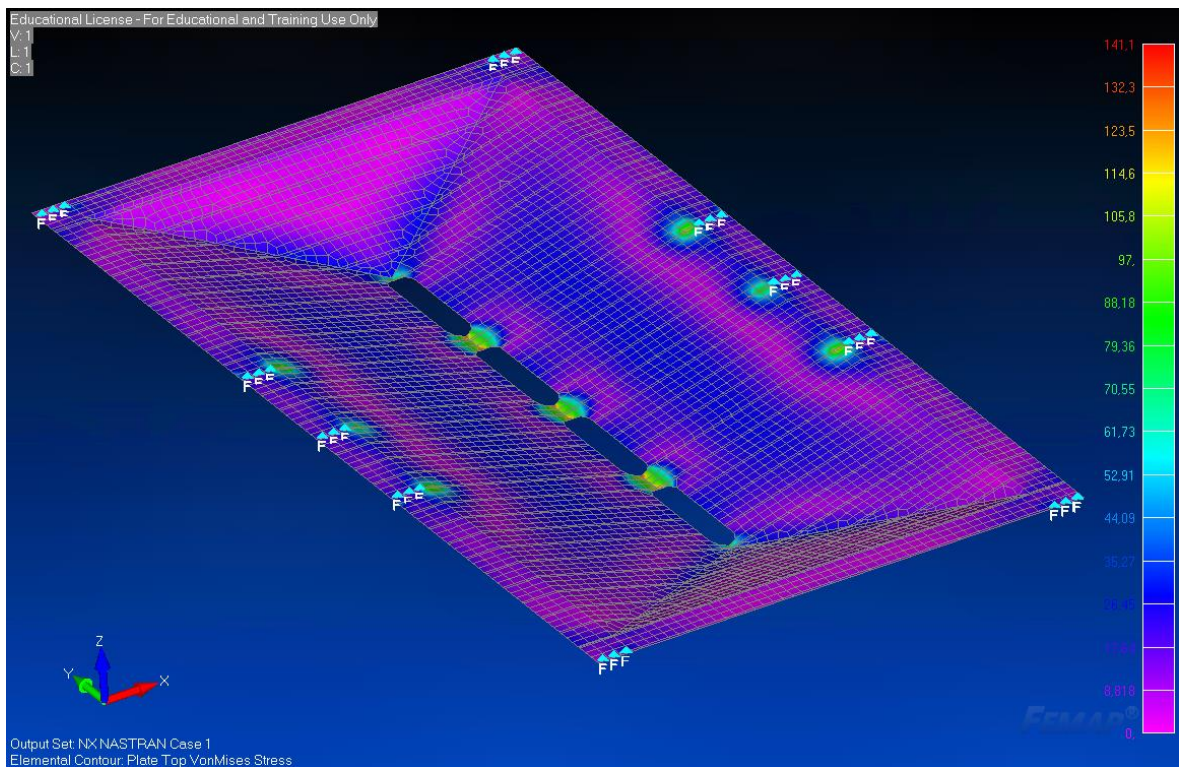
Kuvat 1 & 2. 285 N, ei kiinnityksiä sivulla, taipuma 1.805 mm jännitys: 140,9 MPa



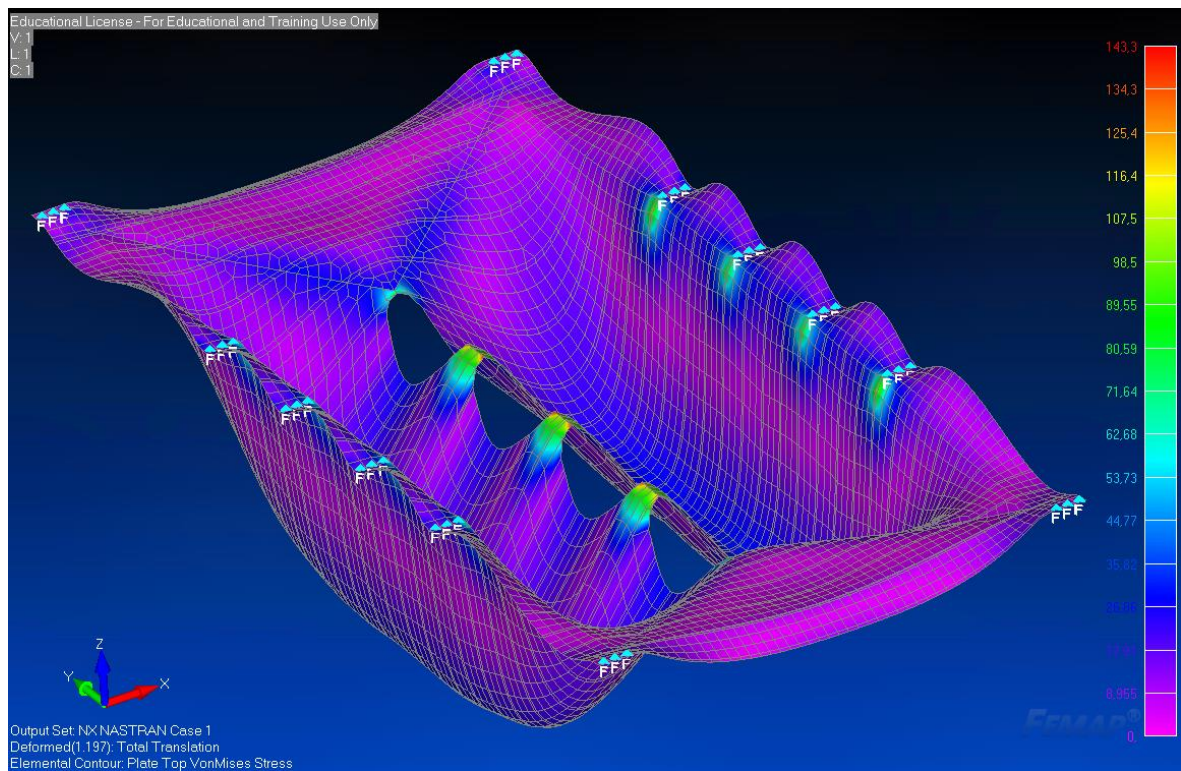
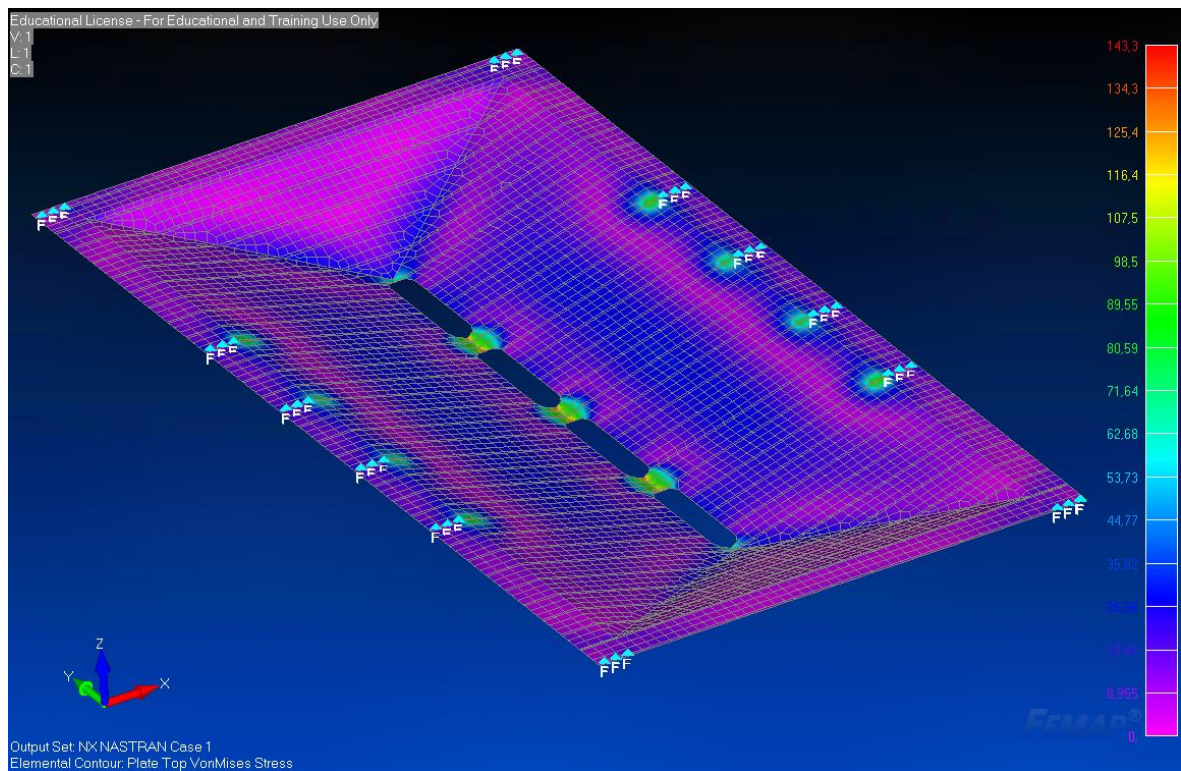
Kuvat 3 & 4. 840 N kuorma, 1 kiinnityskohta sivulla, suurin siirtymä 1,355 mm, maksimi-jännitys 140,4 MPa



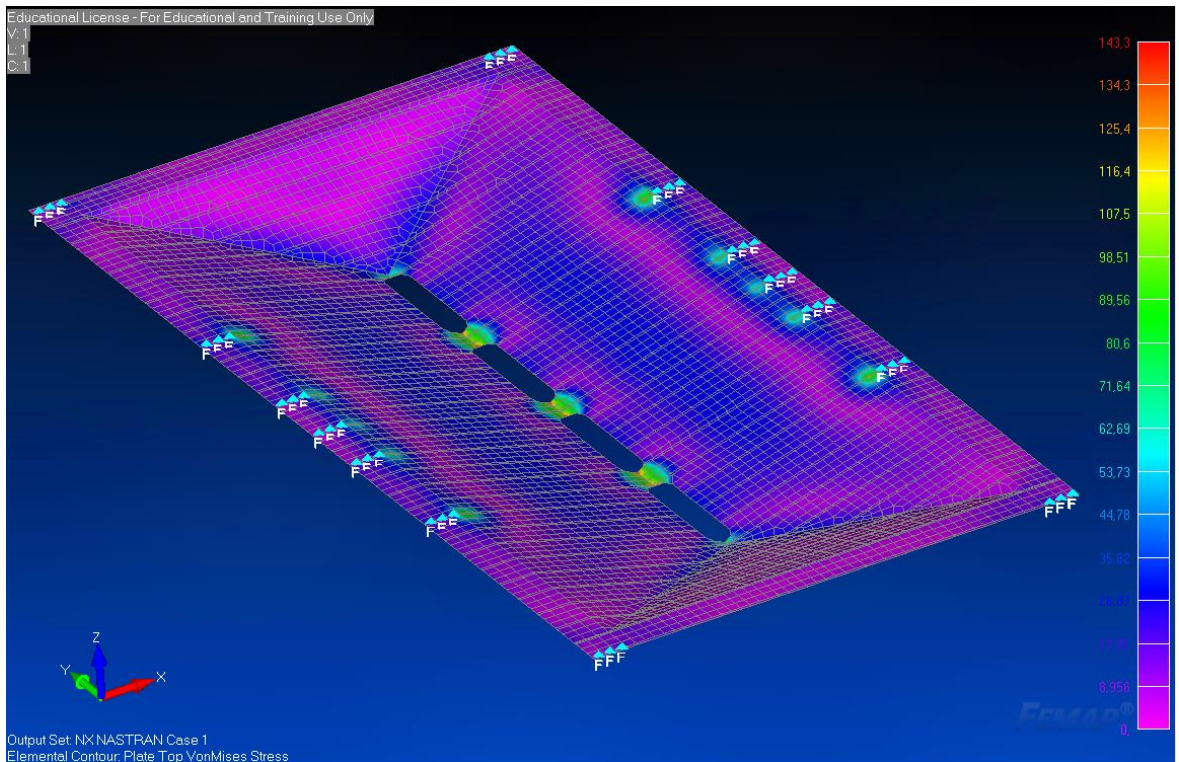
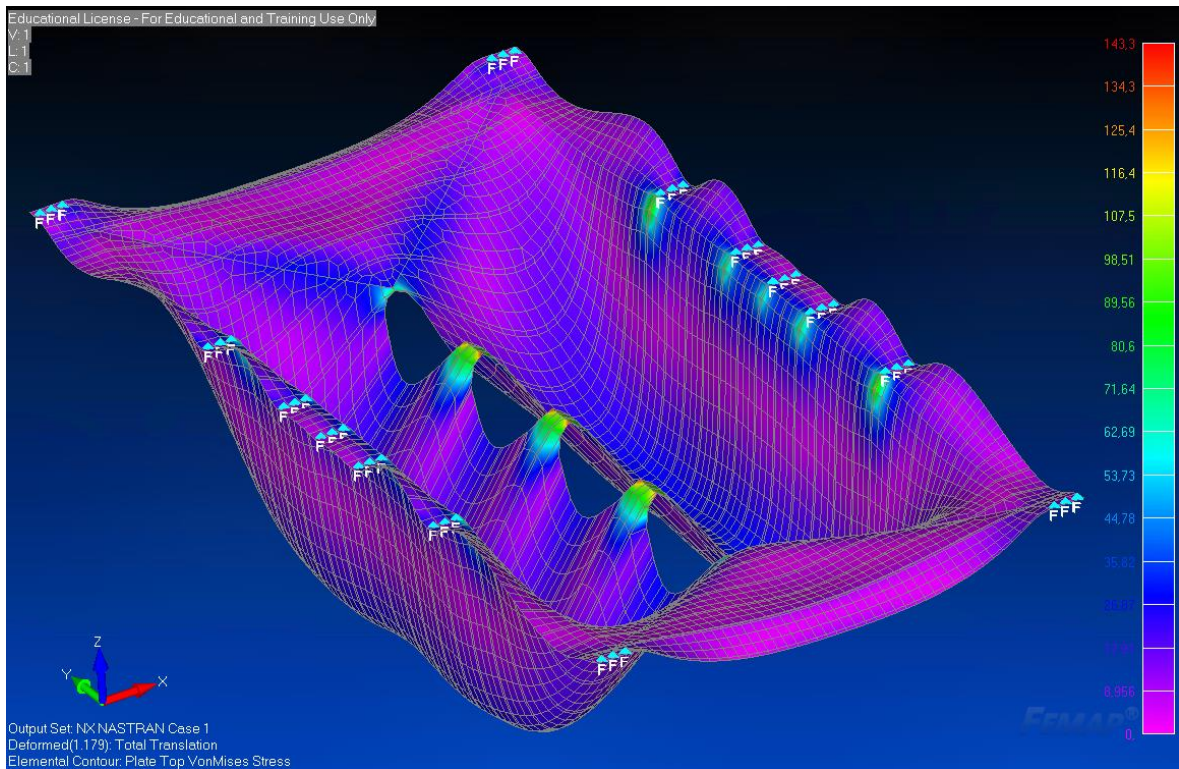
Kuvat 5 & 6. 1000 N kuorma, 2 kiinnityskohtaa sivulla, suurin siirtymä 1,271 mm, maksimijännitys 140 MPa



Kuvat 7 & 8. 1050 N kuorma, 3 kiinnityskohtaa sivulla, suurin siirtymä 1,212, maksimijännitys 141,1 MPa



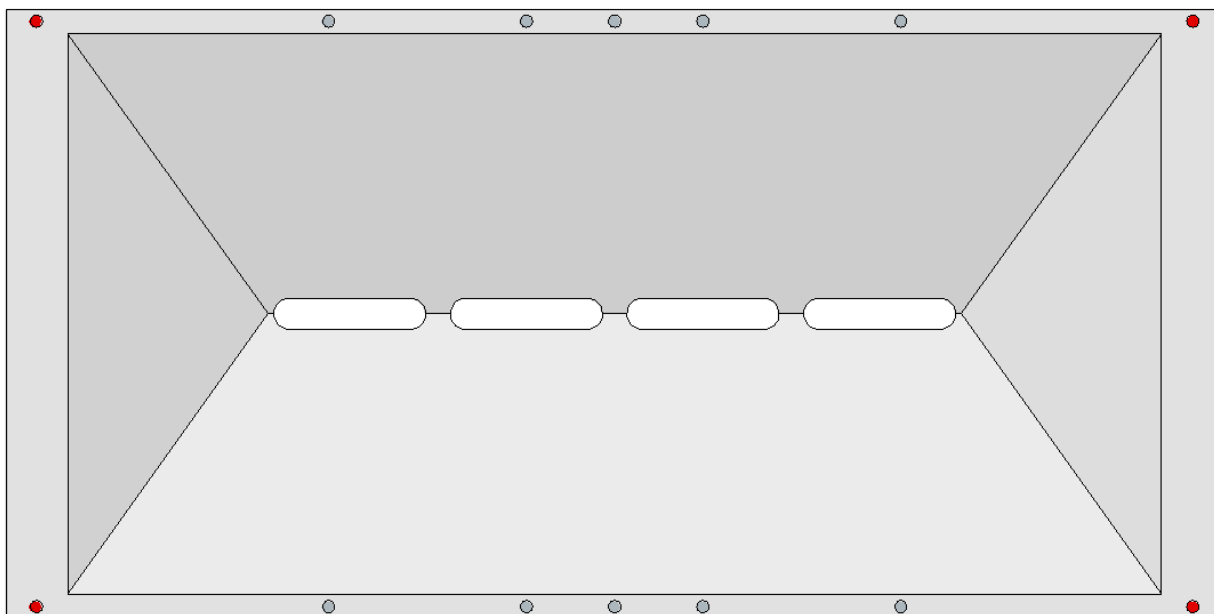
Kuvat 9 & 10. 1080 N kuorma, 4 kiinnityskohtaa sivulla, suurin siirtymä 1,197 mm, maksimijännitys 143 MPa



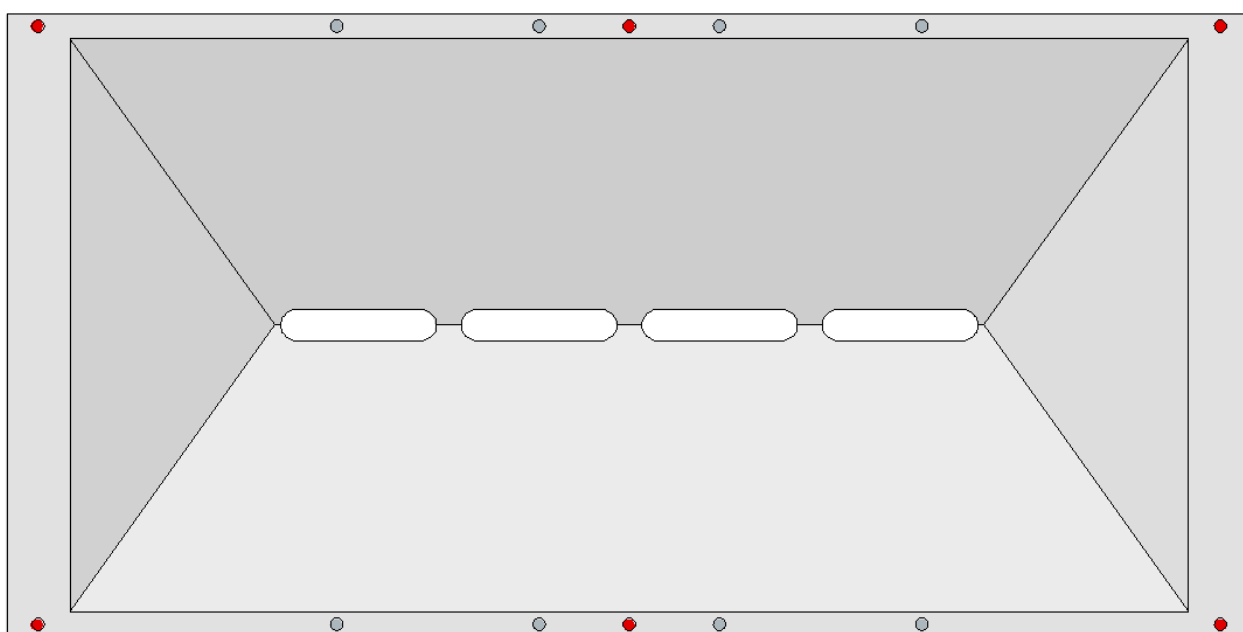
Kuvat 11 & 12. 1100 kuorma, 5 kiinnityskohtaa sivulla, suurin siirtymä 1,179 mm, maksimijännitys 143,3 MPa

Liite II Palonsuojakasettien kiinnityskohdat

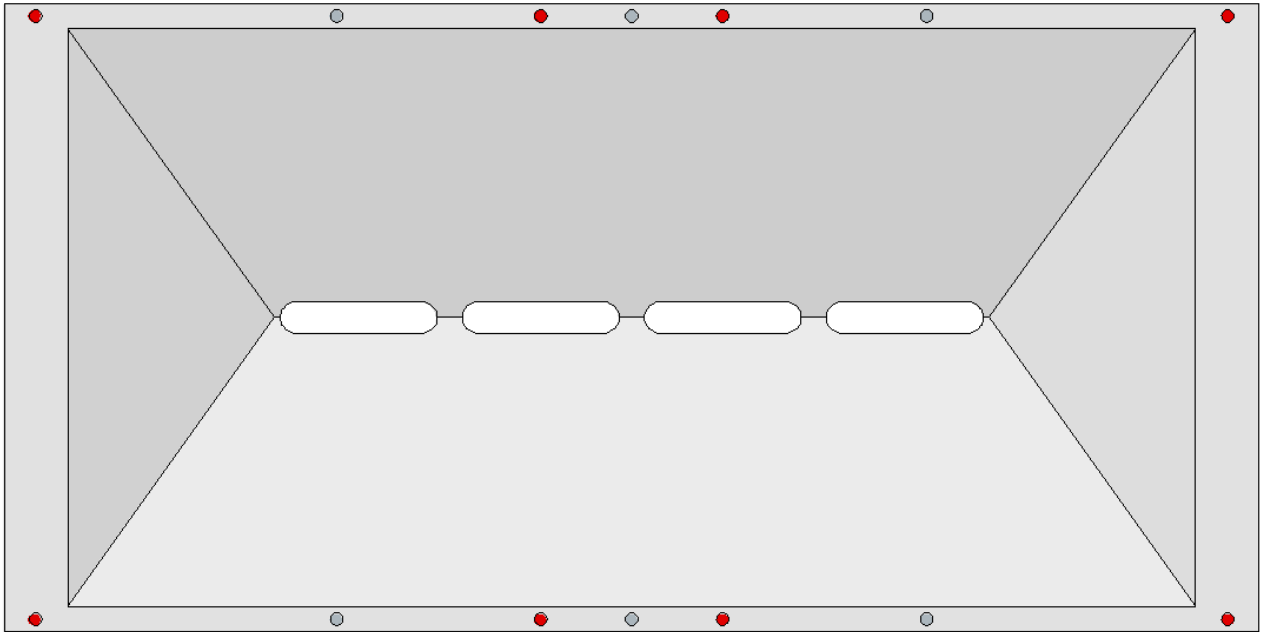
Kiinnityskohdat:



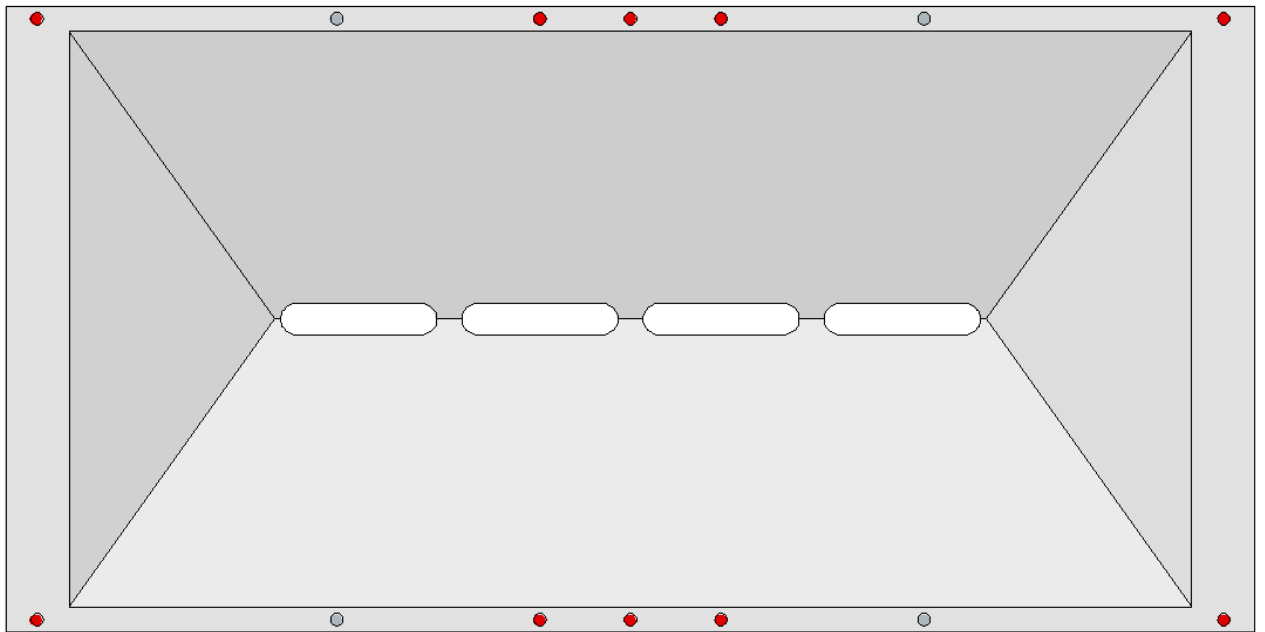
Kuva 1. tulee aina kiinnittää näistä, myös tunnetaan tapauksena 0 kiinnitystä



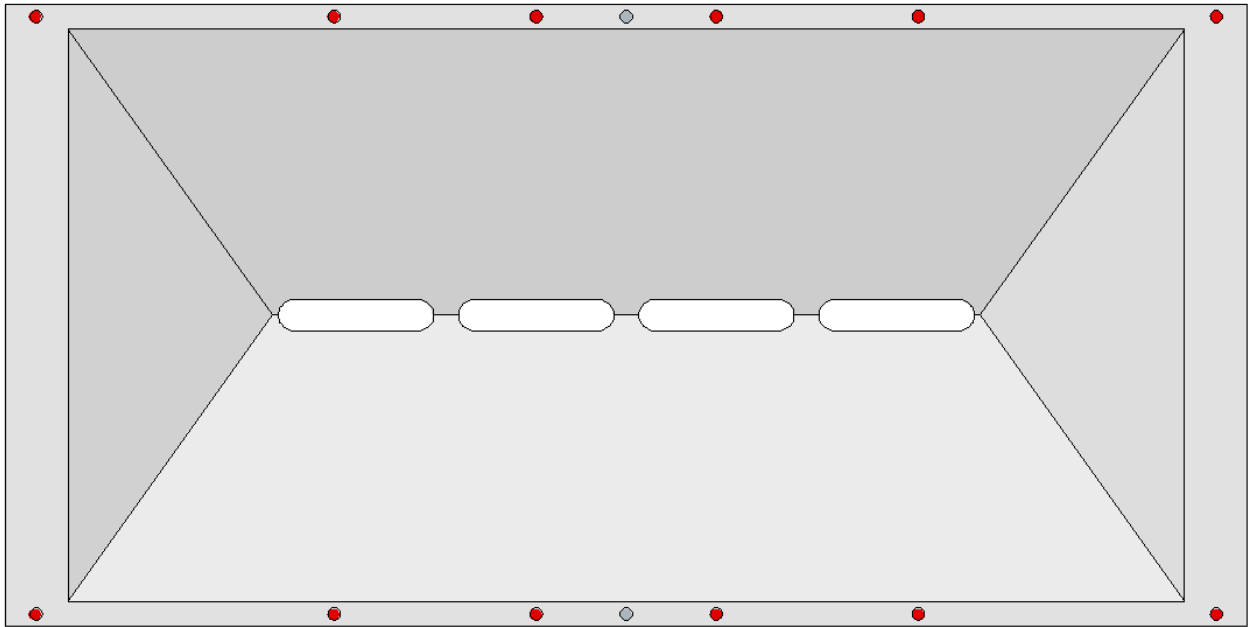
Kuva 2. 1 kiinnitys



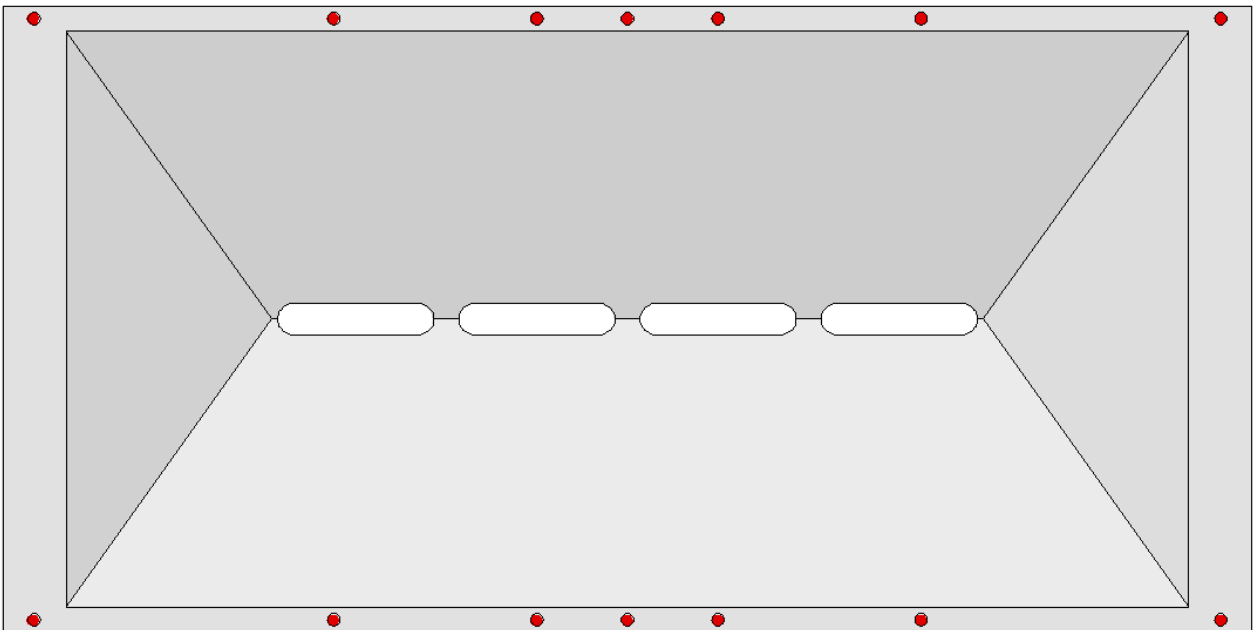
Kuva 3. 2 kiinnitystä



Kuva 4. 3 kiinnitystä



Kuva 5. 4 kiinnitystä



Kuva 6. 5 kiinnitystä

LIITE III Vesitestien raportti

Fintekra Oy

Pasu-projekti / Palokoe / Proto / 200254

Päivitetty 3.2.2017

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO.....	1
1 TAVOITE.....	3
2 METODIT.....	4
3 LAITTEISTO.....	5
4 TULOKSET.....	8
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	10

1 TAVOITE

Testin tavoitteena on selvittää miten neste tulee käyttäytymään testilaitteessa. Testattavina kohteina ovat testilaitteen lämmitysominaisuudet, palonsuojakasettien nesteenläpäisyominaisuudet sekä palonsuojakasetiston että liukaturvaritilän orientaation vaikutus siihen kaadettuun nestemassaan. Tavoitteena on selvittää mistä suunnasta kaadettuna palonsuojakasetistoon nähden neste leviäisi mahdollisimman tasaisesti, laminaarisesti sekä nopeasti.

2 METODIT

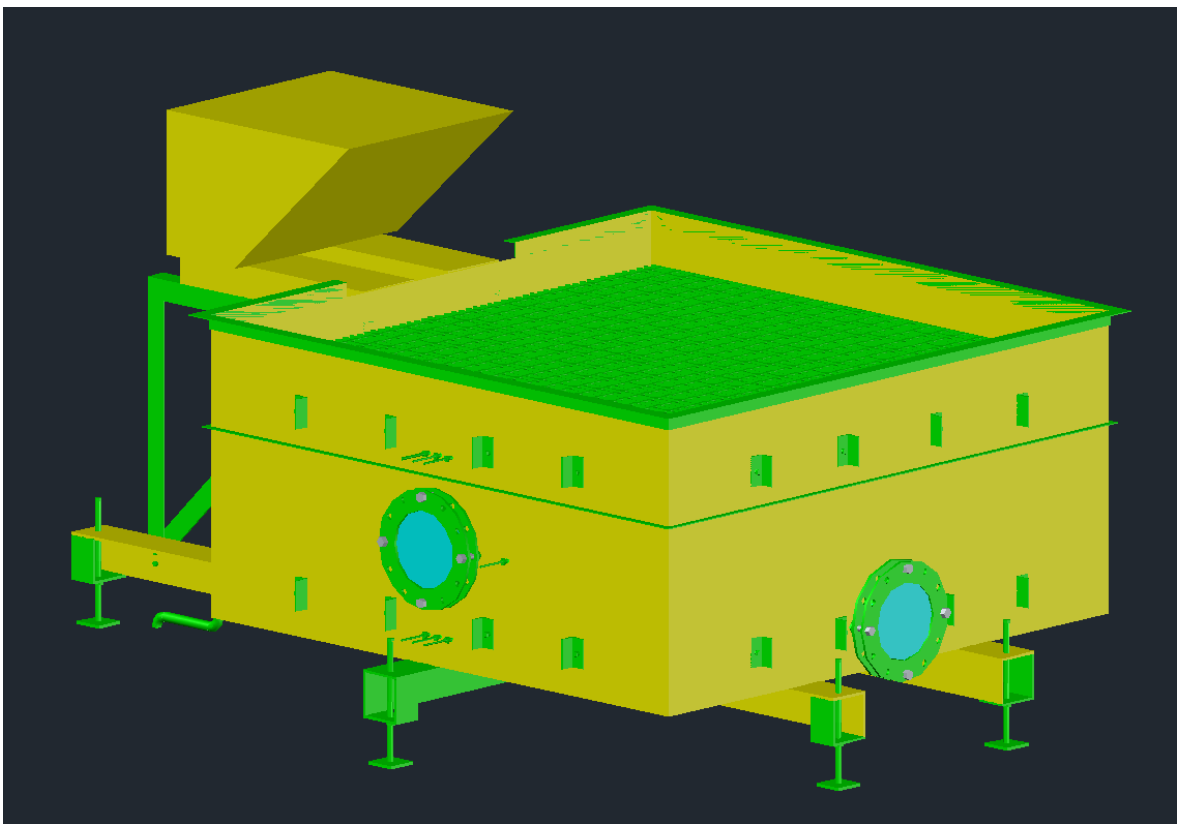
Lämmitysominaisuuksia tarkkaillessa ladataan testilaitteiston yläosassa olevaan 150 litran kippikonttiin varsinaisissa palokokeissa käytettävän öljymäärän verran vettä, joka lämmitetään 90 asteiseksi. Kun tiedetään määrän ja tehon pysyvän vakioina, ja että veden lämmittämiseen vaaditaan noin 2 kertaa sama teho kuin öljyn lämmittämiseen samaan lämpötilaan, voidaan kaavalla laskemalla saada öljyn lämmittämiseen kuluva aika.

Testeissä käytettävä nestemäärä on 125 litraa, jotta testilaitteiston altaaseen saataisiin 30 mm syvyinen kerros nestettä. Tämä tekee testistä rinnastettavan reikäpellille tehtyyn testiin sekä takaa nestekerroksen levittyvän koko altaan pohjan alalle vaikka testilaitte ei olisi täysin vaakatasossa tai jos hitsauksesta johtuen altaan pohja ei olisi täysin suora.

Nesteen käyttäytymistä kaadon aikana tutkittaessa suoritetaan testi aitoa koetilannetta vastaavalla määrällä vettä. Kaadosta aiheutuvia roiskeita, nestemassan käyttäytymistä, sekä massan läpäisy nopeutta tutkitaan useammalla nestemäärällä sekä lämpötilalla. Ensimmäiset testit tehdään palonsuojakasetiston ollessa yläpositiossa ja nestemäärän ollessa hieman varsinaisissa palokokeissa käytettävää nestemäärää pienempi. Tämä nestemäärän vähentäminen tehtiin turvallisuuden tähden, sillä emme tiedäneet miten yli 100 litraa yhtäkkiä kaadettua nestettä tulisi käyttäytymään palonsuojarakenteeseen kaadettaessa.

3 LAITTEISTO

Testauksessa käytetään kuvan 1 & 2 mukaista testilaitteistoa. Laitteisto koostuu pääasiassa 150 litran kippikontista, siihen liitetystä lämmityselementeistä sekä niiden ohjausyksiköstä sekä tiiviistä altaasta, jossa on altaan alan täyttävä palonsuojarakenne. Palonsuojarakenne koostuu tässä tapauksessa palonsuojakaseteista, liukaturvaritilöistä sekä niitä tukevasta rakenteesta.



Kuva 1. Testilaitteisto



Kuva 2. Testilaitteisto

Kippikontti on sijoitettu altaan yläosaan ja siitä on tarkoitus kaataa testeissä käytetty neste altaan päällä olevan palonsuojarakenteen läpi. Kippikonttiin on kiinnitetty 4 x 2 kW uppo-
vastusta, termostaatti sekä vastusten toimintaa säätelevä yksikkö.

Altaaseen on tehty kahdelle sivulle aukko näkölasille, jotta tapahtumaa voisi ulkopuoleltakin reaaliajassa tarkkailla, sekä kenties saada testistä materiaalia videolle. Altaan yhdellä sivulla on lisäksi 7 paikkaa testeissä käytettäville yhteille: 2 paikkaa paineantureille, 2 paikkaa happiantureille sekä 3 paikkaa lämpötila-antureille. Altaaseen on lisäksi sen jokaiselle sivulle hitsattu kahteen tasoon muttereita sekä vahvikkeita, jotta palonsuojarakenne voitaisiin sijoittaa kahteen eri tasoon. Altaan pohjasta lähtee palloventtiilillä varustettu ulostulo, jota kautta voidaan allas tyhjentää kulloisessakin testissä käytetystä nesteestä.

Koko asetelmaa tukemassa on säätöjaloilla varustettu L-palkeista rakennettu tukiranka, jotta testilaitte voitaisiin mahdollisimman suoraan kulloisellakin testialustalla saada.

Vesitesteissä esiin tulleista seikoista johtuen testilaitteeseen tehtiin muutamia muutoksia. Kippikontin etureunaan hitsattiin teräslevyjä, uppovastuksista sekä niiden yhteistä tullutta massaa tasapainottamaan, ja automaattikaadon jouhevuutta varmistamaan. Teräslevyt myös varmistivat kippikontin jäävän ala-asentoon kaadon jälkeen. Testilaitteen takaosaan jouduttiin tekemään 200 mm korotus teräslevystä kuvan 3 mukaisesti, jotta kippikontin kaataessa 125 litraa nestettä palonsuojarakenteeseen ei yhtään nestettä pääsisi takaa tulvimaan testilaitteesta ulos.



Kuva 3. Testilaitteeseen lisätty suojalevy.

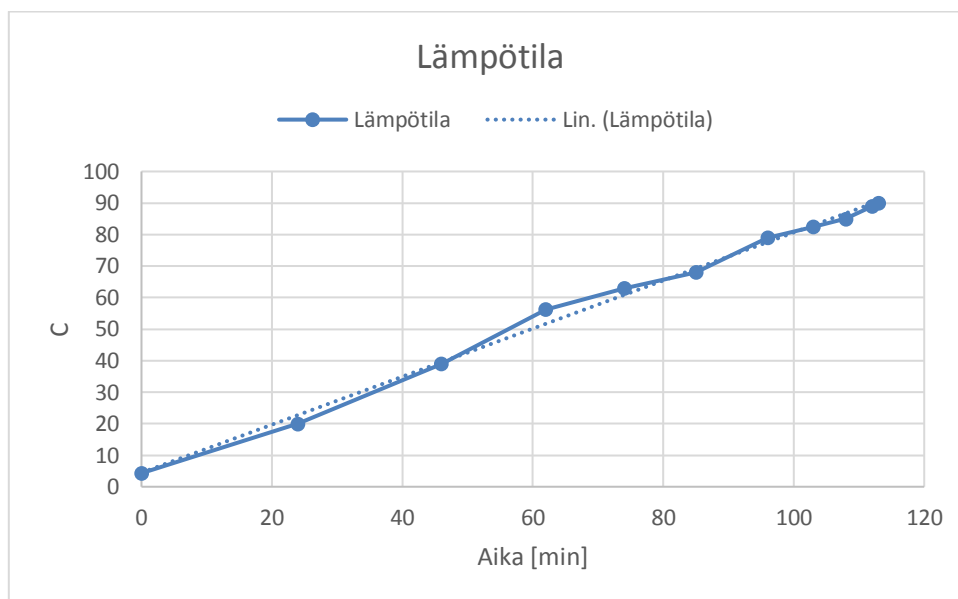
3 TULOKSET

3.1 Lämmitys

Lämmityskoe toteutettiin laittamalla kippikonttiin 125 litraa 4,3 C asteista vettä ja asettamalla kontin päälle vanerinen kansi. Vettä lämmitettiin neljällä 2 kW uppovastuksella.

Veden lämpötilaa tarkkailtiin lämpöpistooliin asetettavalla anturilla.

Veden lämpötila nousi kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Veden lämpötila ajan funktiona.

Kun tiedettiin aika, teho sekä tehontarve, jolla 125 litraa vettä saatiin lämmitettyä 90 asteeseen voitiin kaavalla 1:

$$n = E/Q/h \quad (1)$$

laskea testilaitteen hyötysuhde, jota voidaan käyttää öljyn lämmitykseen menevän jana laskennassa kun tiedetään öljyn lämmittämiseen menevän puolet energiasta kuin samalla määrällä vettä. (Meyer 2015)

Öljyn lämmitykseen menevä aika saatiin kaavalla 2:

$$h = (E * 0,5) / Q/n \quad (2)$$

ja oli arvoltaan 56 min.

3.2 Kaato

Testeissä kävi ilmi palonsuojarakenteeseen kaadetun vesimassan leviävän tasaisesti koko kasetistolle kun turvaritilän kantoteräket olivat palonsuojakasettien suuntaisesti. 125 litran vesimassa läpäisi palonsuojarakenteen noin 4 sekunnissa. Vesimassan kohdistuessa pääasiassa 2 neliön alalle tulisi empiiristen tutkimuksien mukaan palonsuojarakenteen läpäisykyvyksi hieman yli 900 litraa minuutissa / m².

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Testilaitteeseen asennetut korotetut laidat sekä kippikontin etuosaan lisätty massa pitivät huolen, että testissä käytetty neste purkautuu kippikontista nopeasti sekä levittyy roiskumatta palonsuojarakenteelle. Näin ollen testilaitte imitoi riittävällä tarkkuudella tilannetta, jossa suuri määrä palavaa nestettä vapautuu kerralla esim. suurjännitemuuntajan jäähdytysjärjestelmän paisuntasäiliön yhteen repeäminen.

LIITE IV Koottu palokokeiden raportti

Fintekra Oy

Pasu-projekti / Palokoe / Proto / 200254

Päivitetty 3.5.2017

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO.....	1
1 TAVOITE.....	2
2 METODIT.....	3
3 LAITTEISTO.....	4
4 TULOKSET.....	5
5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	6

LIITTEET

LIITE I: Tehtäväluettelo

LIITE II: Tarvikelista

LIITE III: Palotapahtuman kuvat

1 TAVOITE

Testin tavoitteena on selvittää alustavasti palonsuojarakenteen toiminta palavan nesteen kanssa sekä saada arvoja sen palontukahduttaville ominaisuuksille. Tavoitteena selvittää missä ajassa palonsuojarakenne sammuttaa nestepalon ja kuinka lämpimäksi rakenne silloin pääsee.

Tavoitteena tutkia kuinka kauan kestää, jotta näkyvät liekit katoavat palonsuojarakenteen päältä sekä miten pitkään kasetiston alapuolisen palon tukahtumisessa kestää. Kasetiston alapuolisen palon katsotaan sammuneen, kun näkyvät liekit ovat kadonneet, palokaasujen lämpötila alkaa laskea sekä kasetiston alapuolisen tilan happipitoisuus lähtee nousuun. Rakenteen lämpötila ei saa nousta muuntajaöljyn itsesyttymispisteeseen asti.

2 METODIT

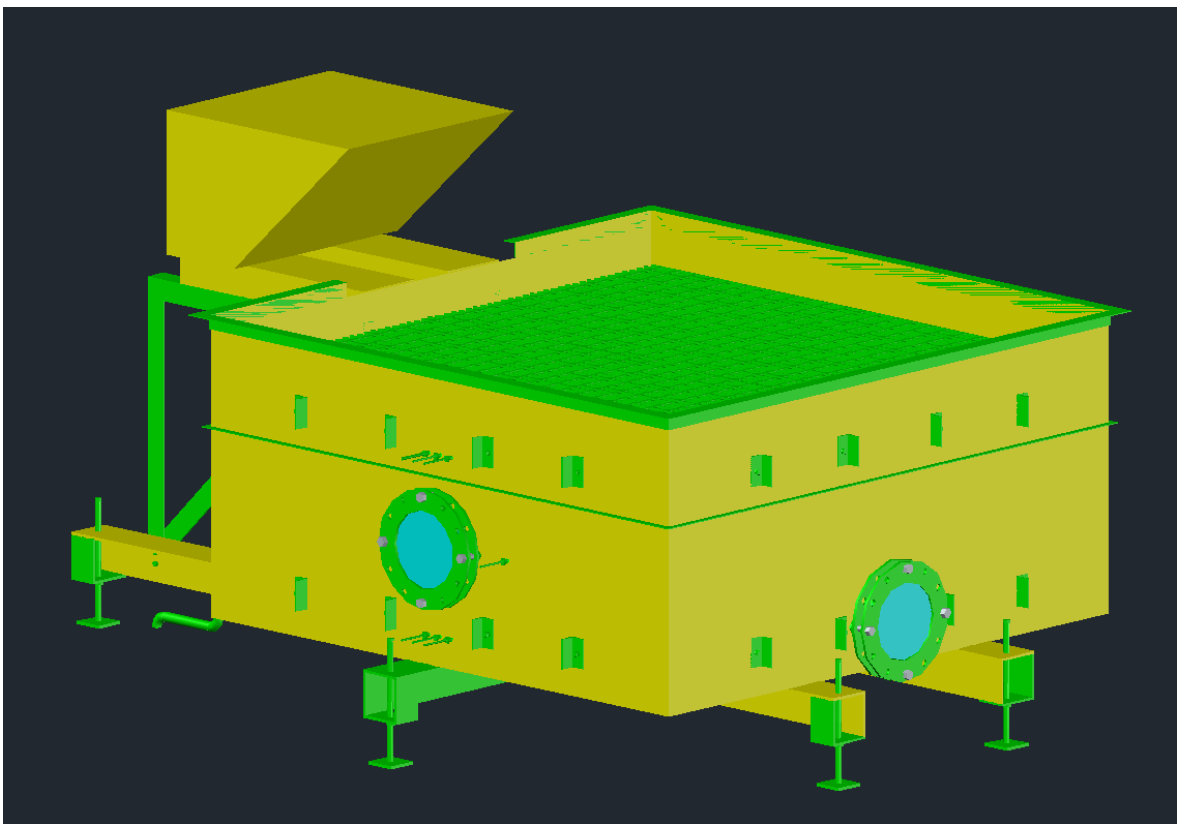
Testilaitteiston yläosassa olevaan kippikonttiin pumpataan 120 litraa muuntajaöljyä, joka lämmitetään 90 C asteeseen. Tämän jälkeen öljy sytytetään kaasupolttimella palamaan noin 2 minuutiksi ennen kaatamista. Testilaitteeseen tehdään vähintään kaksi kaatoa per testi, jotta voidaan varmistua tulosten toistettavuudesta.

Kokeessa tullaan tekemään kolmentyyppisiä testejä. Ensimmäisessä palonsuojarakenne on yläpositiossa ja simuloidaan yhteen repeämistä ja sieltä pursuavan öljyn syttymistä suurjännitemuuntajaympäristössä. Toisessa testissä palonsuojarakenne lasketaan alapositioonsa, jotta voidaan simuloida siirrettävissä valuma-altaissa tapahtuvaa nestepaloa. Kolmannessa testissä palonsuojarakenne nostetaan taas yläpositioon ja altaaseen lisätään siemenvesi, jotta voidaan simuloida vesitetyn valuma-altaan vaikutusta nestepaloon.

Testien välillä allas valutetaan öljystä ja vaurioituneet palonsuojakasetit vaihdetaan tuoreisiin.

3 LAITTEISTO

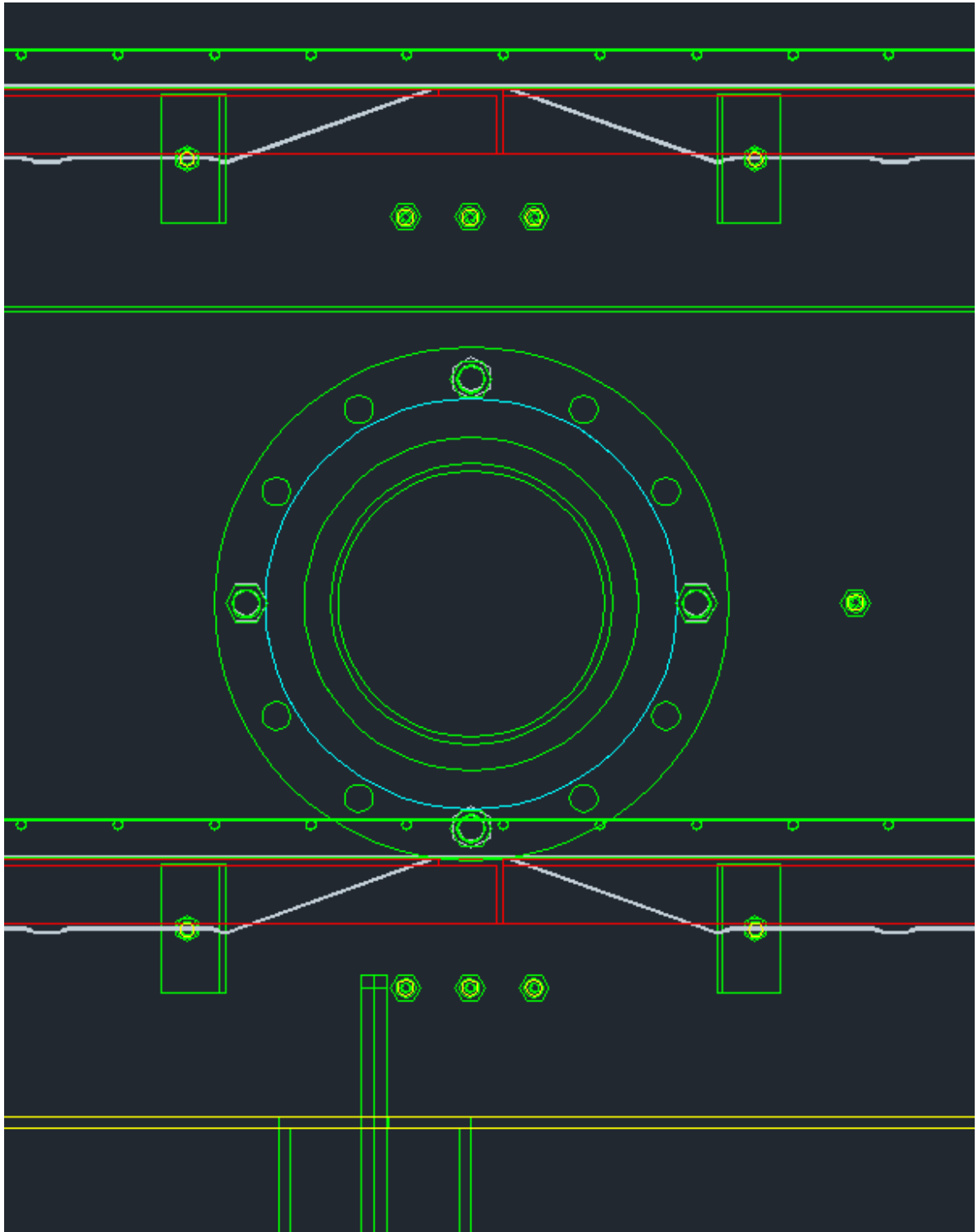
Testauksessa käytetään kuvan 1 mukaista testilaitteistoa. Laitteisto koostuu pääasiassa 150 litran kippikontista, siihen liitetystä lämmityselementeistä sekä niiden ohjausyksiköstä sekä tiiviistä altaasta, jossa on altaan alan täyttävä palonsuojarakenne. Palonsuojarakenne koostuu tässä tapauksessa palansuojakaseteista, liukaturvaritiloista sekä niitä tukevasta rakenteesta.



Kuva 1. Testilaitteisto

Kippikontti on sijoitettu altaan yläosaan ja siitä on tarkoitus kaataa testeissä käytetty neste altaan päällä olevan palonsuojarakenteen läpi. Kippikonttiin on kiinnitetty 4 x 2.0 kW uppo-
vastusta, termostaatti sekä vastusten toimintaa säätelevä yksikkö.

Altaaseen on tehty kahdelle sivulle aukko näkölasille, jotta tapahtumaa voisi ulkopuoleltakin reaaliajassa tarkkailla, sekä saada testistä materiaalia videolle. Altaan yhdellä sivulla on lisäksi 7 paikkaa testeissä käytettäville yhteille: 2 paikkaa paineantureille, 2 paikkaa happiantureille sekä 3 paikkaa lämpötila-antureille kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2. Yhteiden sijoittelu.

Yhteitä varten on tehty 8 x 1 x 700 mm putkista, ½ tuuman nipoista sekä ½ tuuman hatuista rakennelma, jota pitkin anturit voidaan viedä palotilaan. Yhteiden paikat saadaan umpinai-silla hatuilla ilmatiiviiksi niiden ollessa pois käytöstä.

Altaaseen on lisäksi sen jokaiselle sivulle hitsattu kahteen tasoon muttereita sekä vahvikkeita, jotta palonsuojarakenne voitaisiin sijoittaa kahteen eri tasoon. Altaan pohjasta lähtee palloventtiilillä varustettu ulostulo, jota kautta voidaan allas tyhjentää kulloisessakin testissä käytetystä nesteestä.

Koko asetelmaa tukemassa on säätöjaloilla varustettu L-palkeista rakennettu tukiranka, jotta testilaite voitaisiin mahdollisimman suoraan kulloisellakin testialustalla saada.

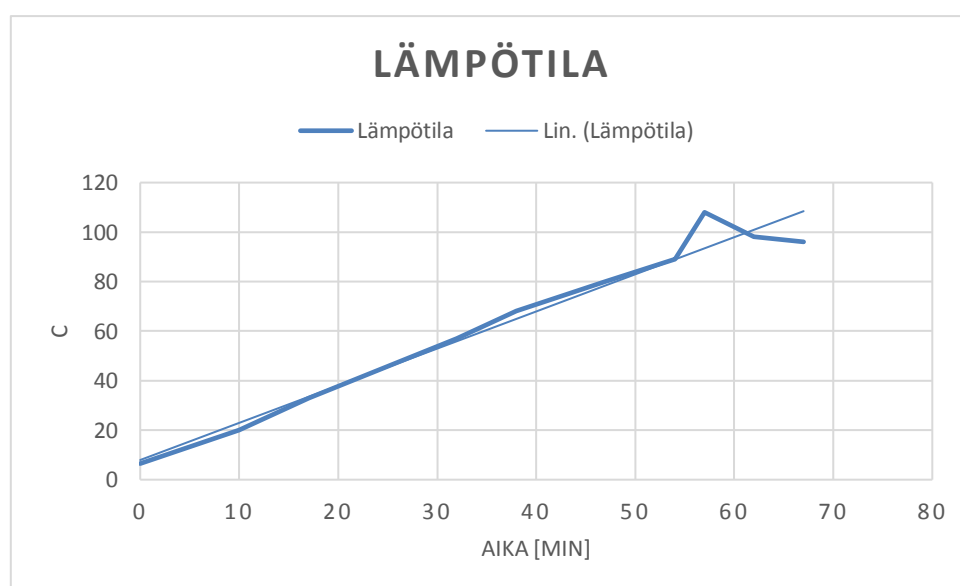
4 TULOKSET

4.1 Pelastusopisto

Pelastusopistolla tehtiin kaikkiaan 9 testiä, jossa palavaa muuntajaöljyä kaadettiin palonsuojarakenteen päälle. Testeissä 1-5 oli palonsuojarakenne yläpositiossa, testissä 6 oli altaassa siemenvesi ja testeissä 7-9 oli palonsuojarakenne alapositiossa.

Yleinen tulos oli, että kaadon jälkeen palava öljy levisi koko palonsuojarakenteen alalle sekä sen alapuoliseen tilaan, ja sammui kun oli valunut palonsuojarakenteen läpi ja kuluttanut kaiken hapen palonsuojarakenteen alapuolisesta tilasta. Tähän kului aikaa noin 6-3 sekuntia. Välittömästi testin jälkeen mitattuna oli palonsuojakasetin lämpötila suurimmillaan noin 64 astetta

Ensimmäisen testin yhteydessä otettiin kippikontin sekä öljyn lämmöstä arvoja kunnes öljy saatiin yli 90 asteiseksi. Öljyn lämpötilan mittaamista hankaloitti lämmityksen ajaksi kippikontin päälle asetettu metallikansi. Tämän vuoksi otettiin lämpötila kippikontin kyljestä ja sen lämmentyä riittävästi otettiin kansi pois, jolloin päästiin mittaamaan lämpötila itse öljystä. Kansi pois otettaessa havaittiin, että lähestyttäessä 90 asteen aluetta on öljyn ja kippikontin lämpötilaero noin yli 10 astetta. Tämä näkyy piikkinä lämpötilakäyrässä kuvassa 3.



Kuva 3. Öljyn lämpötila ajan funktiona.

Palotapahtuma eteni liitteessä III esitetyn kuvasarjan mukaisesti. Kuvista on selvästi erotettavissa nestepalon eri vaiheet sen reagoidessa palonsuojarakenteen kanssa.

Seuraavassa kappaleessa on esitetty testien kulku. Kuvauksissa on kerrottu olennaisia testiin vaikuttavia seikkoja öljyn lämpötilasta ja esipolttoajasta öljyn laatuun sekä testilaitteiston puhtauteen.

Esipolttoaika on mitattu kippikontin alan peittävästä palosta kaatoon saakka.

Testilaitteen altaan sekä palonsuojarakenteen lämpötilan on oletettu kaikissa testeissä olevan sama (noin 6-13 sään mukaan), sillä testien välillä kului aina noin tunti, jona aikana testilaitte ehti viiletä ympäröivän ilmaston lämpötilaan.

Käytettäessä palotestissä 120 litraa öljyä per koe oli lopullinen öljyhävikki koetta kohden noin 5-15 litraa. Testeissä kului öljyä ensinnäkin palamiseen sekä roiskeisiin, mutta myös altaaseen sekä kasetteihin jäi ohut kerros. Testeissä hävinnyt öljymäärä riippui siis erittäin suuresti palotapahtuman rajuudesta sekä kestosta, mutta myös siitä oliko käytössä oleva allas sekä palonsuojarakenteen öljystä puhdistettu vai ei.

Testi 1.

- Testin laatu: palonsuojarakenteen yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 96 °C
- Altaan kunto: puhdas, kuiva
- Esipolttoaika: 1.40 min
- Palon käyttäytyminen: suuret liekit, tulipallo, nopea huippuvaiheen saavutus
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 6,5 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti, kippikontin maalit jäivät palamaan ja näin hämärsivät.

Testi 2.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: kerran käytetty
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 88 °C
- Altaan kunto: valutettu
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: nopea leviäminen ja leimahdus, matalammat liekit
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 3 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Testi 3.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: 2 kertaa käytetty
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 96 °C
- Altaan kunto: valutettu
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: palo eteni aaltona nesteen mukana ja hävisi heti kun neste läpäisi palonsuojarakenteen, matalat liekit.
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 3 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Testi 4.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 93 °C
- Altaan kunto: valutettu

- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: palo eteni aaltona nesteen mukana ja hävisi heti kun neste läpäisi palonsuojarakenteen, matalat liekit.
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 3 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Testi 5.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 89 °C
- Altaan kunto: valutettu, vedetty lastalla, öljyt poltettu
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: palo levisi nopeasti nesteen mukana koko palonsuojarakenteen alalle, leimahdus ja korkeat liekit, hävisi nopeasti
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 3 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Testi 6.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: kyllä, 10 mm 13 °C
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: kerran käytetty
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 90 °C
- Altaan kunto: valutettu
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: palo eteni aaltona nesteen mukana ja hävisi heti kun neste läpäisi palonsuojarakenteen, matalat liekit.
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 3 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Testi 7.

- Testin laatu: palonsuojarakenne alapositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 90 °C
- Altaan kunto: valutettu, lastalla vedetty
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: palo eteni aaltona nesteen mukana ja hävisi heti kun neste läpäisi palonsuojarakenteen, matalat liekit.
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 4 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Testi 8.

- Testin laatu: palonsuojarakenne alapositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: kerran käytetty
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 89 °C
- Altaan kunto: valutettu
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: palo eteni aaltona nesteen mukana ja hävisi heti kun neste läpäisi palonsuojarakenteen, matalat liekit.
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 3 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Testi 9.

- Testin laatu: palonsuojarakenne alapositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: 2 kertaa käytetty
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 90 °C

- Altaan kunto: valutettu
- Esipolttoaika: 4 min
- Palon käyttäytyminen: palo levisi aaltona nesteen mukana ja pian sen jälkeen kun neste läpäisi palonsuojarakenteen, matalat liekit.
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 3 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti

Äsken avatut tulokset on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Pelastusopistolla tehtyjen testien tulokset ja niihin vaikuttaneet tekijät

Testi	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Palonsuojarakenteen positio	ylä	ylä	ylä	ylä	ylä	ylä	ala	ala	ala
Siemenvesi	ei	ei	ei	ei	ei	kyllä	ei	ei	ei
Altaan kunto	X,Y,Z	X	X	X	X,Y,Z	X	X,Y	X	X
Öljymäärä [l]	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Öljyn lämpö [°C]	96	88	96	93	89	90	90	89	90
Öljyn laatu	0	1	2	0	0	1	0	1	2
Esipolttoaika [min:s]	1:40	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	4:00
Yläpuolisen palon sammumisaika [s]	6,5	3	3	3	3	3	4	3	4

Selitykset: X = valutettu, Y = lastalla vedetty, Z = Öljyt poltettu kaasupolttimella

0 = käyttämätön öljy, 1 = kerran käytetty jne.

4.2 VTT

VTT:llä tehtiin kaikkiaan 4 palokoetta: 2 kappaletta palonsuojakasettien ollessa yläpositiossa 800 mm korkeudella pohjasta ja 2 kappaletta palonsuojakasettien ollessa 200 mm korkeudella pohjasta. 800 mm korkeudella simuloidaan suurjännitemuuntajien valuma-altaita ja 200 mm korkeudella liikuteltavia valuma-altaita.

Yleinen tulos oli, että kaadon jälkeen palava öljy levisi koko palonsuojarakenteen alalle sekä sen alapuoliseen tilaan, ja sammui kun oli valunut palonsuojarakenteen läpi ja kuluttanut kaiken hapen palonsuojarakenteen alapuolisesta tilasta. Tähän kului aikaa noin 6-3 sekuntia.

Seuraavassa kappaleessa on esitetty testien kulku. Kuvauksissa on kerrottu olennaisia testiin vaikuttavia seikkoja öljyn lämpötilasta ja esipolttoajasta öljyn laatuun sekä testilaitteiston puhtauteen.

Esipolttoaika on mitattu kippikontin alan peittävästä palosta kaatoon saakka.

Testilaitteen altaan sekä palonsuojarakenteen lämpötilan on oletettu kaikissa testeissä olevan sama (noin 20 °C), sillä testien välillä kului aina noin tunti, jona aikana testilaitte ehti viiletä ympäröivän ilmaston lämpötilaan.

Käytettäessä palotestissä 120 litraa öljyä per koe oli lopullinen öljyhävikki koetta kohden noin 5-15 litraa. Testeissä kului öljyä ensinnäkin palamiseen sekä roiskeisiin, mutta myös altaaseen sekä kasetteihin jäi ohut kerros. Testeissä hävinnyt öljymäärä riippui siis erittäin suuresti palotapahtuman rajuudesta sekä kestosta, mutta myös siitä oliko käytössä oleva allas sekä palonsuojarakenteen öljystä puhdistettu vai ei.

Testi 1.

- Testin laatu: palonsuojarakenteen yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 90 °C
- Altaan kunto: puhdas, kuiva
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: suuret liekit, tulipallo, nopea huippuvaiheen saavutus
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 6,5 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti, kippikontin maalit, antureiden yhteet sekä kameran suojalevy jäivät palamaan ja näin hämäsivät.

Testi 2.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 90 °C
- Altaan kunto: puhdas, kuiva
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: suuret liekit, tulipallo, nopea huippuvaiheen saavutus
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 6,5 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti, kippikontin maalit, antureiden yhteet sekä kameran suoja levy jäivät palamaan ja näin hämäsivät. Tämä näkyy lämpötiläkäyrissä

Testi 3.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 96 °C
- Altaan kunto: puhdas, kuiva
- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: suuret liekit, tulipallo, nopea huippuvaiheen saavutus
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 6,5 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti, kippikontin maalit jäivät palamaan ja näin hämäsivät.

Testi 4.

- Testin laatu: palonsuojarakenne yläpositiossa
- Siemenvesi: ei
- Öljyn määrä: 120 litraa
- Öljyn laatu: tuore
- Öljyn lämpötila esipolton alussa: 96 °C
- Altaan kunto: puhdas, kuiva

- Esipolttoaika: 2 min
- Palon käyttäytyminen: suuret liekit, tulipallo, nopea huippuvaiheen saavutus
- Aika, jona näkyvät liekit katosivat palonsuojarakenteen päältä: 6,5 s
- Tulos: palo sammui hallitusti ja nopeasti, kippikontin maalit jäivät palamaan ja näin hämäsivät.

Taulukkoon 2 on koottu VTT:llä toteutettujen testien kulku ja erinäiset testien tuloksiin vaikuttaneet tekijät.

Taulukko 2. VTT:llä tehtyjen testien kulku ja niihin vaikuttaneet tekijät

Testi	1	2	3	4
Palonsuojarakenteen positio	ylä	ylä	ala	ala
Siemenvesi	ei	ei	ei	ei
Altaan kunto	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z
Öljymäärä [l]	120	120	120	120
Öljyn lämpö [°C]	90	90	90	90
Öljyn laatu	0	0	0	0
Esipolttoaika [min:s]	2:00	2:00	2:00	2:00
Yläpuolisen palon sammumisaika [s]	6,5	6,0	3	3

Selitykset: X = valutettu, Y = lastalla vedetty, Z = painepesurilla ja aineella pesty

0 = käyttämätön öljy, 1 = kerran käytetty jne.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Palonsuojarakenne sammutti sen päälle kaadetun palavan öljyn 6-3 sekunnissa palonsuojarakenteen päältä. Paloreaktio oli paljon rajumpi tapauksissa, joissa öljy oli edellisten testien jälkeen siivottu kunnolla pois, sekä tapauksissa, joissa palonsuojarakenteen päälle kaadettu öljy oli ohjearvoa kuumempaa. Hävikki oli myös paljon suurempaa tapauksissa, joissa testilaitte oli siivottu mahdollisimman öljyttömäksi.

Ensimmäisen testin pitkään paloaikaan sekä muita suurempaan liekkiin vaikuttivat luultavasti palonsuojarakenteessa sekä testilaitteessa yhä oleva varastorasvan määrä. Palava öljy sytytti varastorasvan, joka omalta osaltaan toi reaktioon lisää palokuormaa, mutta myös hyvin luultavasti kiihdytti reaktiota öljynkin palamisen osalta. Nämä molemmat seikat, sekä öljystä vapaa palonsuojarakenteen alapuolinen tila johtivat seuraavia palokokeita voimakkaampaan paloreaktioon sekä siten myös suurempaan liekkiin ja pidempään paloaikaan.

Edellisistä testeistä testilaitteistoon jäänyt öljy luultavasti kaasuuntui hieman, ja osaltaan vähensi palonsuojarakenteen alapuolisen tilan kokonaishappipitoisuutta, joka vaikutti paloreaktioon heikentävästi. Rajumpi reaktio tuntui myös tulevan tapauksissa, joissa öljy oli lämmin tai lämmitettiin ohjearvoa kuumemmaksi 96 °C asteeseen. Suurempi nesteeseen sitoutunut energia voimisti paloreaktiota, näin ollen tehden liekeistä sekä leimahduksesta pitkäkestoisempia sekä suurempia. Palon kokonaispituuteen kuitenkin vaikutti eniten palonsuojarakenteen alapuolisen tilan happipitoisuus.

LIITE III

Palotapahtuma tiivistettynä kuviin 1-14.



Kuva 1.



Kuva 2.



Kuva 3.



Kuva 4.



Kuva 5.



Kuva 6.



Kuva 7.



Kuva 8.



Kuva 9.



Kuva 10.



Kuva 11.



Kuva 12.



Kuva 13.



Kuva 14.

LIITE V Pelastusopiston testiraportti

2017

FINTEKRA LIEKKILOUKKU RAPORTTI



PELASTUSOPISTO

Tuomas Kuikka PEO Suunnittelija

Marko Hassinen PEO Tutkija

Pelastusopisto

6.7.2017

SISÄLLYS

Johdanto	2
Palavan nesteen palomekaniikka	3
Liekkiloukun toimintaperiaate.....	4
Poltettavien tuotteiden tiedot.....	5
Asiakkaan perustiedot.....	5
Riskianalyysi.....	6
Toimenpiteet riskien vähentämiseksi.....	6
Varusteet ja kalusto.....	7
Dokumentointi.....	8
Testausasetelma.....	9
Tulokset	11
Johtopäätökset	12
Liitteet.....	13
Koeasetelma suunnitelma.....	13

JOHDANTO

Asiakirjan tarkoituksena on varmistaa turvallinen polttotapahtuma sekä minimoida tapaturma riskit polton aikana sekä toimia raporttina poltto tapahtumasta.

Sammutuskokeella tutkitaan ja testataan Fintekran liekkiloukkutuotetta ja tuotteen toimivuutta, sekä sammutusmekaniikkaa. Kokeiden tarkoituksena on siis tuottaa asiakkaalle tietoa tuotteen toimivuudesta ja sammutusmekaniikasta.

Fintekran liekkiloukku tuotteella on tarkoitus korvata suurjännitemuuntamo asemilla käytettävien valuma-allas vallitilojen palosuojaus. Liekkiloukku tuotteella voidaan myös suojata sekä siirrettäviä valuma-altaita sekä palavan nesteen varastoja..

Polttokokeessa käytettävät öljyt ovat pääasiallisesti hiilivety pohjaisia muuntamo öljyjä.

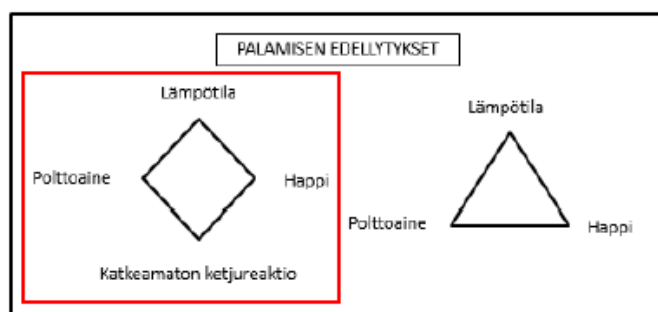
Koesarjan tarkoituksena on simuloida tilannetta, jossa muuntamon jäähdyttämiseen tarkoitettu öljysäiliö repeytyy ja syttyy palamaan.

Polttosuunnitelmaan kuuluu myös riskiarvio, jonka perusteella määritetään keinot joilla epäsuotuisia tapahtumia pyritään vähentämään. Riskiarvio löytyy tämän asiakirjan kohdasta riskiarvio.

Lopullinen riskiarvio tehdään ennen polttoa.

PALAVAN NESTEEN PALOMEKANIikka

Palavan nesteen palamismekaniikka perustuu liekehtivän palon perusedellytyksiin:



Kuva 1 Liekehtivän palon ja hehkupalon perusedellytykset

Palavan nesteen paloon vaikuttavia asioita

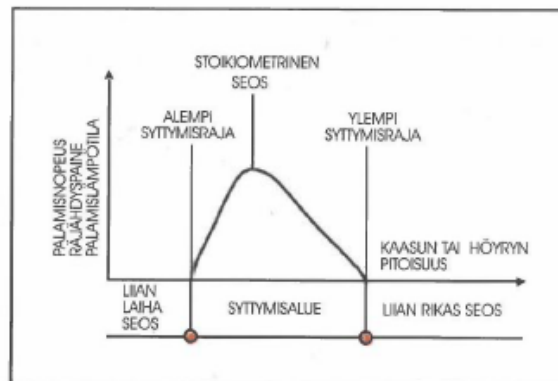
- Leimahduslämpötila
- Syttymislämpötila
- Syttymisrajoihin

Palavan nesteen palossa, palava neste on kuumentunut niin että, siitä höyrystyy palamiskelpoisia tuotteita (kaasuja) niin että palavan nesteen pintalämpötila on suurempi kuin palavan nesteen leimahduslämpötila.

Leimahduslämpötila on alin lämpötila, jossa palavasta nesteestä erottuu riittävästi kaasua, joka muodostaa pinnan lähellä seoksen joka leimahtaa sytyttimen vaikutuksesta, mutta ei jatka paloa syttymislähteen poistuttua

Syttymislämpötila on alin lämpötila, jossa syttyminen tapahtuu.

Syttymisrajat määrittelevät alemman ja ylemmän syttymisrajan, syttyminen tapahtuu syttymisalueella. Syttymisrajat ilmoitetaan syttyvän aineen määränä ilmassa tilavuusprosentteina tai grammoina litrassa.



Kuva 2 Syttymisrajat

Palavan nesteen paloteho

$$P = m * q$$

jossa:

- P= paloteho (w)
- m=palamisnopeus (kg/s)
- q= aineen alempi lämpötila

LIEKKILOUKUN TOIMINTAPERIAATE

Liekkiloukun sammutusperiaate perustuu palamisen edellytyksien (hapen) poistamiseen. Liekkiloukun toimintaperiaatteena on siis luoda tilanne jossa palava neste ajetaan tilaan, jossa aukko tekijä on riittävän pieni eli palo ajetaan tilaan jossa ei saa riittävästi happea. Happipitoisuus tilassa tippuu alle liekkipalon tarvitseman pitoisuuden. Happi poistuu tilasta palamisen seurauksena ja liekkipalo sammuu. Lisäksi palonsuojarakenteen pyrkii sammuttamaan palon ennen kuin se lämmittää rakenteen palavan nesteen itsesyttymislämpötilaan asti.

Höyrystyvä öljy muodostaa tilaan rikkaan seoksen, joka on syttymisrajojen yläpuolella.

POLTETTAVIEN TUOTTEIDEN TIEDOT

Asiakkaan perustiedot

Asiakas: Fintekra

Pertti Väisänen / Mikko Myllymäki

Kauppakatu 52

FIN-78200 VARKAUS

Tel. +358 44 3131830

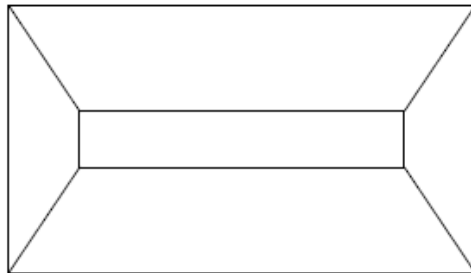
Testin ajankohta: 8.-10.5.2017

Toteutuspaikka: Pelastusopiston harjoitusalue, Korvaharju

Tuote: Muuntajaöljy Shell Diala oil B ja Palosuojakasetti

Taulukko 1 Muuntaja öljyn ominaisuudet

FYSIKAALISET JA KEMIALLISET OMINAISUUDET		
Yleiset tiedot		
		kellertävä öljymäinen neste.
Terveysten, turvallisuuden ja ympäristön kannalta tärkeät tiedot		
	Suhteellinen tiheys	884 kg/m ³ (15 °C)
	Vesiliukoisuus	Liukenematon
	Leimahduspiste	156 °C
	Viskositeetti	11,9 cSt (40 °C).
Räjähdysominaisuudet		
	Alempi räjähdyraja	0,6 til-%
	Ylempi räjähdyraja	6,5 til-%



Kuva 3 Palosuojakasetti havainnekuva

RISKINANALYYSI

Taulukko 2 Riskianalyysi

Tunnistetut riskit	Todennäköisyys (T) 1-5	Seuraukset (S) 1-5	Riskiluku (TxS=R)
Savukaasujen myrkyllisyys	2	4	8
Ympäristövahinko	1	2	2
Tulipalo ympäristöön	1	2	2
Palovammat	2	5	10
Savua ympäristöön	5	1	5

Toimenpiteet riskien vähentämiseksi

Polttokoe suoritetaan prosessiviemäroidyllä alueella.

Polttokokeeseen osallistuvat suojaavat itsensä suojaustasolle paloasu ja paineilmalaitte tai paloasu ja suodatin naamari. Polttokokeeseen osallistujat sijoittuvat tuulen yläpuolelle, välittömän vaara-alueen ulkopuolelle n: 20 m polttopaikasta.

Sammutusajoneuvo sijoitetaan tuulen yläpuolelle 20 – 40m polttopaikasta, josta selvitetään työjohtoselvitys ja vaahtokalusto selvitys, jolla voidaan sammuttaa tarvittaessa palavia heitteitä tai laimentaa mahdollisesti myrkyllisiä savukaasuja.

Paineilmalaitteille ja suodatinnaamareille tehdään toimintatarkastus ennen polttokokeen aloittamista, vieraiden pukeutuminen ja varusteet tarkastetaan ennen polton alkamista.

Paikan päällä on ensiapu valmius.

Ympäristövahinko on epätodennäköinen koska alue on prosessiviemäroity.

VARUSTEET JA KALUSTO

Henkilökohtaiset suojaimet:

- Väliasu
- Paloasu
- Turvajalkineet
- Suojahuppu
- Kypärä
- Paineilmalaite tai suodatinnaamari
- Sammutuskäsine tai suojakäsine

Sammutusauto:

- ZR 601
- ZR 31

Tilat:

- Konttikenttä

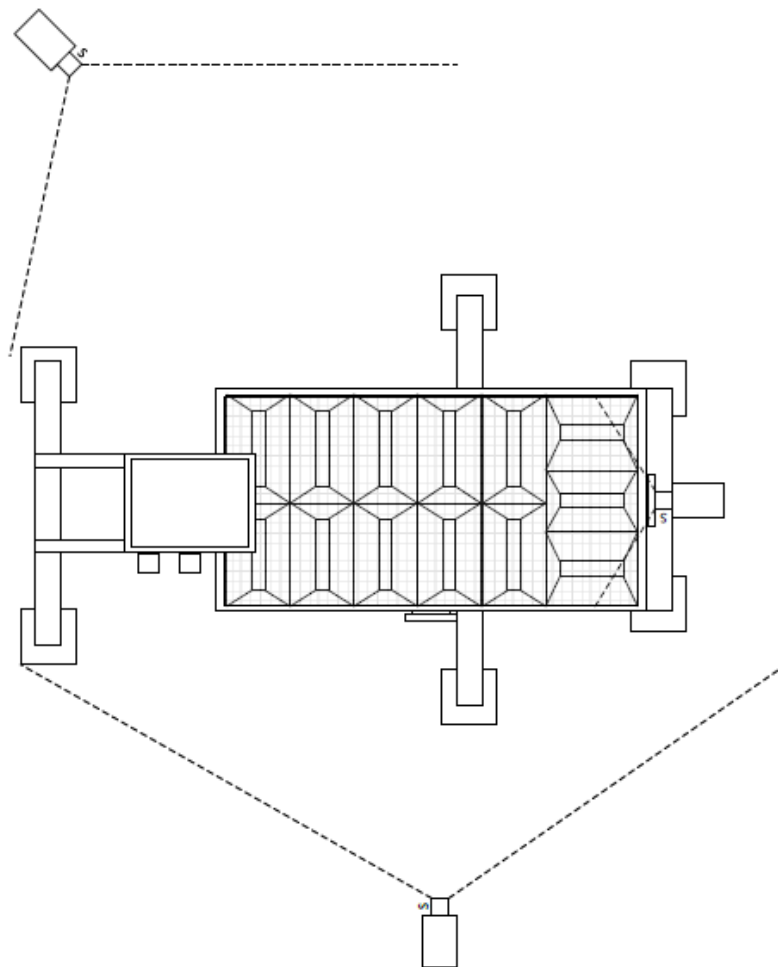
Kuvauskalusto:

- GoPro 1
- GoPro 2
- Lämpökamera
- Digivideokamera
- Järjestelmäkamera
- Jalustat

DOKUMENTOINTI

Poltto dokumentoidaan videolle ja valokuvin myöhempää analysointia varten.

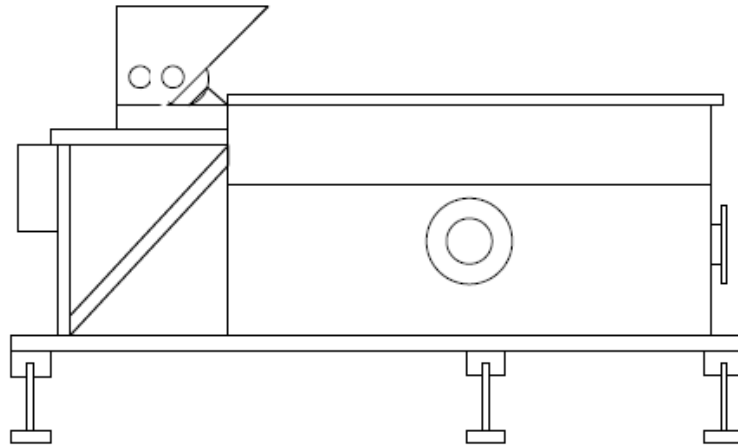
Savukaasujen ja lämpötilojen osalta ei suoriteta mittauksia Pelastusopiston toimesta.



Kuva 4 Kamera aseointi

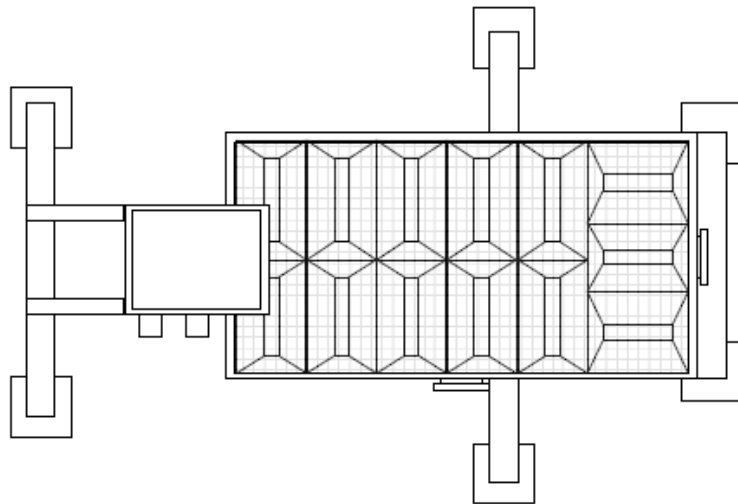
TESTAUSASETELMA

Tuotetestausta varten rakennettiin erillinen koeasetelma joka koostui erillisistä komponenteista:



Kuva 5 Koeasetelma sivulta

Muuntamon alla olevaa suoja allasta kuvaamaan rakennettiin metallinen allas, johon asennettiin palosuoja kasetti ja jonka päälle asennettiin ritilä, kuvamaan työtasoa.



Kuva 6 Koeasetelma sivulta

Kippilava kuvasi muuntajaa, jonka tilavuus on noin 150 litraa. Kippilava täytettiin muuntamo öljyllä, n.120 litraa, Shell Diala oil B. Muuntaja öljy esilämmitettiin kippikonttiin asennetuilla vastuksilla, noin 90 asteiseksi, joka vastaa öljyn lämpötilaa muuntamon lauhduttimessa. Lisäksi konttiin asennettiin termostaatti, joka säädetty edellä mainittuun asetukseen.

Syttymislähdettä kuvamaan käytettiin nestekaasuliekkiä, jolla esilämmitetty öljy sytytettiin palamaan. Esipalo aika oli noin 2 minuuttia.

Esipalo ajan päätyttyä kippikontissa ollut palava muuntaja kaadettiin altaaseen johon oli rakennettuna palosuojakasetti ratkaisu.



Kuva 7 Koeasetelma, hetki ennen sammutuskoetta

TULOKSET

Sammutuskokeita tehtiin 10 kappaletta, joista yhdeksän toteutettiin samalla tavalla. Öljy valui nopeasti liekkiloukun/palonsuojarakenteen läpi valuma-altaaseen.

Viimeisen kokeen esipaloaika kaksinkertaistettiin. Tällä sammutuskokeella tutkittiin onko esipaloajalla merkitystä sammutuskokeen onnistumiseen.

Taulukko 3 Tulokset taulukoituna

<i>Sammutuskokeen nro</i>	<i>esipaloaika</i>	<i>tulos</i>	<i>huomioita</i>	<i>muuta</i>
1	n. 2 min	sammui	asetus 1	
2	n. 2 min	sammui	asetus 1	
3	n. 2 min	sammui	asetus 1	
4	n. 2 min	sammui	asetus 1	
5	n. 2 min	sammui	asetus 1	
6	n. 2 min	sammui	asetus 1	
7	n. 2 min	sammui	asetus 1	
8	n. 2 min	sammui	asetus 2	
9	n. 2 min	sammui	asetus 2	
10	n. 4 min	sammui	asetus 2	

JOHTOPÄÄTÖKSET

Sammutuskokeet liekkiloukulla onnistuivat odotetusti ja palavan nesteen palot sammuiivat jokaisessa kokeessa.

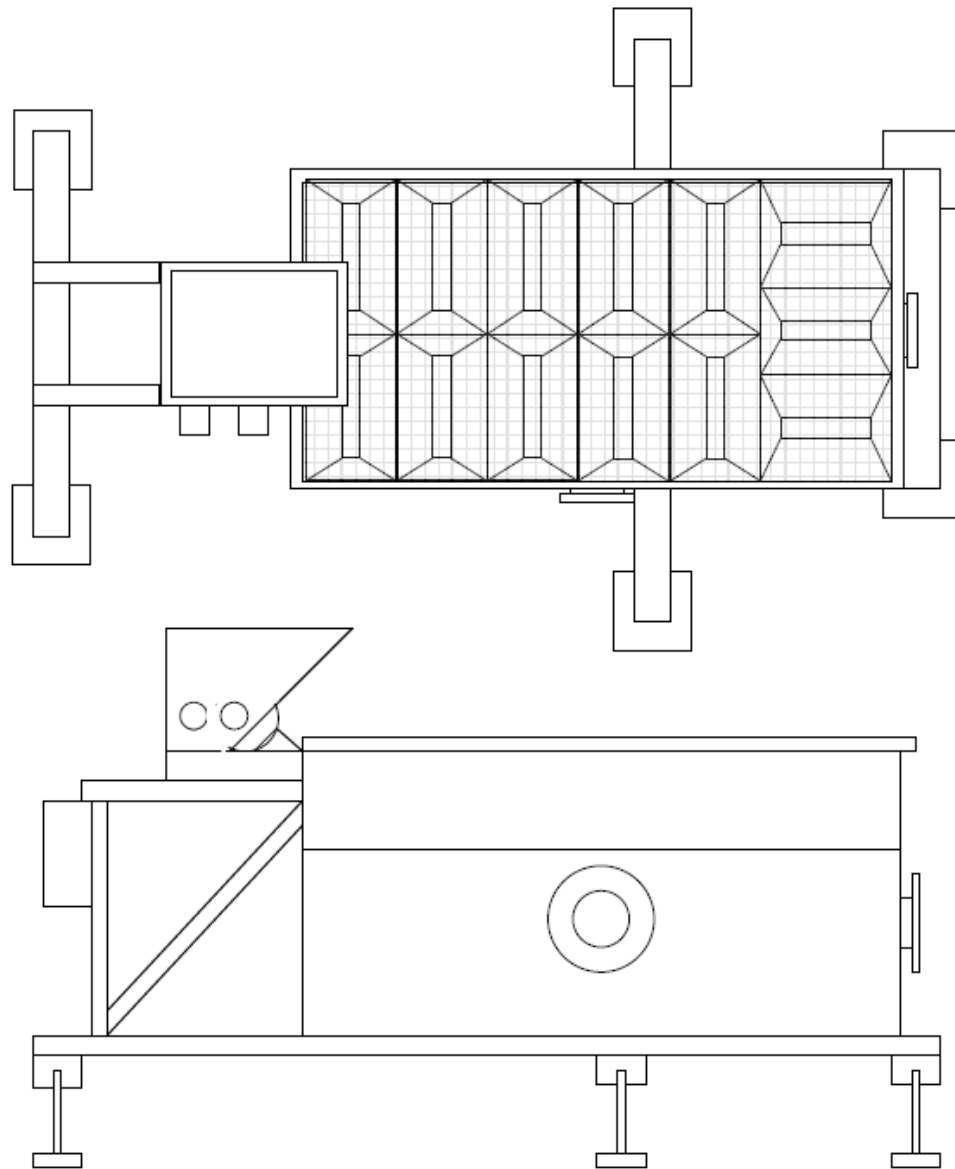
Liekkiloukku toimi odotetusti kyseisellä asetelmalla, jossa aukkokotekijä oli rajoitettu sopivasti. Palava neste valui nopeasti loukun altaaseen jossa palo sammui hapen puutteeseen.

Tuote toimi odotetusti tämän kokoisessa altaassa. Suunniteltaessa kyseenomaista tuotetta käytettäväksi muuntamo suojauksessa, tulee mitoituksessa ottaa huomioon altaan kokonaistilavuus ja mahdollinen osastointi sopiviin osiin siten että happirajoitteisuus jää mitoituksen mukaiseksi.

Suunnittelussa kannattaa ottaa huomioon myös räjähdyskelpoiset seokset ja se ettei niitä pääse syntymään.

LIITTEET:

Koeasetelma suunnitelma



Esipaloaika n 2 minuuttia

Kuva 1 Liekehtivän palon ja hehkupalon perusedellytykset	3
Kuva 2 Syttymisrajat	4
Kuva 3 Palosuojakasetti havainnekuva.....	5
Kuva 4 Kamera asemointi	8
Kuva 5 Koeasetelma sivulta	9
Kuva 6 Koeasetelma sivulta	9
Kuva 7 Koeasetelma, hetki ennen sammutuskoetta	10

LIITE VI VTT:n testausselostus

TESTAUSSELOSTUS

VTT-S-3916-17

6.10.2017

Tämä raportti korvaa 30.6.2017 päivätyn samannumeroisen raportin.

Erikoistesti, Öljyn sammumisen määrittäminen
Liekkiloukku - palonsuojarakennetta käytettäessä

Tilaaja: Fintekra Oy

Tilaaja	Fintekra Oy Pertti Väisänen Kauppakatu 52 78200 Varkaus 0400 467426 pertti.vaisanen@fintekra.fi
Tilaus	Mikko Myllymäki 22.3.2017
Yhteyshenkilö	VTT Expert Services Oy Tuotepäällikkö Kimmo Kaukanen PL 1001, 02044 VTT Puh: 020 722 4859 kimmo.kaukanen@vtt.fi

	Erikoisesti, Öljyn sammumisen määrittäminen Liekkiloukku - Palonsuojarakennetta käytettäessä
Tehtävä	Tilatun työn tavoitteena oli kokeellisesti varmentaa Liekkiloukku - palonsuojarakenteen toimivuus. Kokeiden avulla testattiin, sammuko palava öljy, kun se kaadetaan huoltotason alla olevan palonsuojakasetin läpi altaaseen. VTT Expert Services Oy, instrumentoi ja suoritti kokeet. Kokeita suoritettiin tilauksen mukaisesti neljä kappaletta.
Koekappale	<p>Koekappaleena oli Fintekra Oy:n valmistama Liekkiloukku - palonsuojarakenne. Palonsuojarakenne koostuu kulku- ja huoltotasona toimivasta ritilästä ja sen alle tulevista palonsuojakasetista. Palonsuojakasetti asennetaan aina osaksi huoltotasoa, kävelyritilän alle. Palonsuojakasetin alla on öljykammio. Tästä syystä asiakas toimitti kokeita varten kokonaisuuden, johon kuului öljykammio, 8 palonsuojakasettia ja huoltotaso. Kokonaisuutta joka koostuu palonsuojakasetista ja huoltotasosta (ritilä) kutsutaan tässä palonsuojarakenteeksi.</p> <p>Testatun Liekkiloukku - palonsuojarakenteen (koekappaleen) rakenne on esitetty liitteessä 1. Valokuvia kokeesta ja testatusta koekappaleesta on esitetty liitteessä 2. Koejärjestely koekappaleineen tuotiin kokonaisuutena VTT Expert Services Oy:n Espoon toimipisteessä sijaitsevaan sammutushalliin. Asiakas vastasi koekappaleen kuljetuksesta ja asennuksesta.</p> <p>Kahdessa kokeessa (Koe 1 ja Koe 2) Liekkiloukku - palonsuojarakenne oli asennettu altaan yläosaan (öljykammion korkeus 800 mm) ja kahdessa kokeessa (Koe 3 ja Koe 4) Liekkiloukku - palonsuojarakenne oli asennettu altaan alaosaan (öljykammion korkeus 200 mm). <i>Öljykammion</i> 800 mm korkeus simuloi suurjännitemuuntajien valuma-altaita ja 200 mm korkeus siirrettäviä valuma-altaita.</p>

Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muualla muualla mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Kuva 1. Liekkiloukku - palonsuojarakenne asennettuna altaan yläosaan



Kuva 2 Liekkiloukku - palonsuojarakenne asennettuna altaan ala-osaan



Toimintaperiaate ja sovelluskohteet

Tuotteen toimintaperiaate on nestepalojen sammuttaminen rakenteellisesti. Palon sammuminen tapahtuu tukahtumalla hapenpuutteeseen, kun palava öljy valuu palosuojakasettien alapuolella olevaan öljykammioon. Asiakas on nimennyt tuotteen käyttökohteiksi mm. suurjännitemuuntajien / öljyjäähdytteisten muuntajien valuma-altaat, siirrettävät palavien aineiden valuma-altaat ja palavien nesteiden siirron ja varastoinnin.

Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muuossa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Koemenetelmä	Koekappaleelle suoritettiin erikoiskoesarja, jonka toteutus on kuvattu tässä raportissa. Erikoisesti tehtiin VTT Expert Services Oy:n ja asiakkaan yhdessä sopimalla menetelmällä.
Koejärjestely	Koesarja suoritettiin VTT Expert Services Oy:n Espoon toimipisteessä sijaitsevassa sammutushallissa, jonka tilavuus on noin 6500 m ³ , ja lattia pinta-ala noin 13 m x 27 m. Halli on varustettu savunpoistojärjestelmällä ja jäteveden puhdistusaltaalla. Öljykammio 2040 mm (l) x 2040 mm (s) x 1005 mm (k) asennettiin keskelle hallia ja säädettiin vaakatasoon käyttäen sen omia jalkoja. Palonsuojarakenne nostettiin altaan päälle (8 palonsuojakasettia ja sen päällä oleva hoitotaso). Öljykammion kyljessä oli kiinni kippikontti, joka täytettiin öljyllä (120 l). Kokeessa käytettiin muuntaja öljyä Shell Diala Oil B (745910). Kippikontissa oli vaijerijärjestelmä, josta vetämällä kontin sisältö (öljy) saatiin kipattua palonsuojarakenteen (palonsuojakasetin ja hoitotason) päälle.
Mittaukset	Kokeessa mitattiin palonsuojakasettien pintalämpötiloja, kaasun lämpötilaa huoltotason päällä ja öljykammiossa, paine-eroa (öljykammion ja hallin välillä) ja öljykammion happipitoisuutta. Mittapisteet on esitetty liitteessä 3.
Kokeen suoritus	Ennen koetta kippikontissa oleva öljy lämmitettiin neljän sähkövastuksen avulla noin 90 °C lämpötilaan. Tämä lämpötila vastaa arviolta suurjännitemuuntajien öljyn käyttölämpötilaa. Kun öljy oli esilämmitetty, se sytytettiin palamaan kippikontissa käyttäen kaasupoltinta. Öljy sai palaa vapaasti 2 minuutin ajan (esipaloaika). Esipaloajan merkitys kokeessa on lämmittää öljy, jolloin se on vaikeampi sammuttaa. Esipaloajan jälkeen palava öljy kaadettiin palonsuojarakenteen päälle. Palava öljy vahui hoitotason (ritilätaso) läpi ja palonsuojakasettien läpi öljykammioon.
Kriteeri	Asiakkaan määrittämä toimintaperiaate tuotteelle on, että kun palava öljy vahui palonsuojakasetin läpi altaaseen, se sammuu altaassa. Kriteerinä kokeessa pidettiin öljyn sammumista öljyaltaassa. Sammumista havainnointiin visuaalisesti ja mittauksin.
Koepäivä	7.6.2017
Koetulokset	Koetulokset on esitetty taulukossa 1.

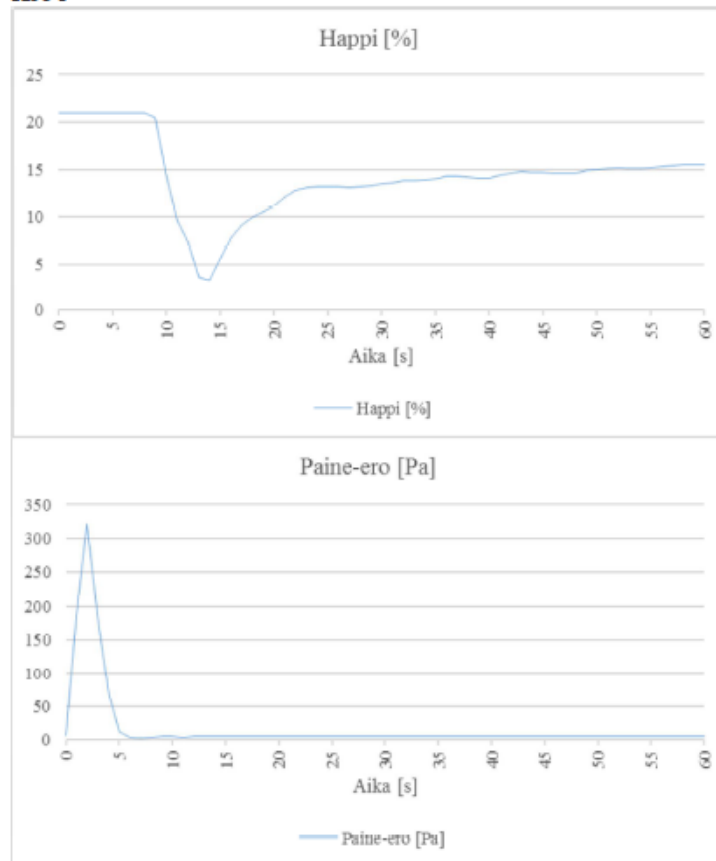
Taulukko 1. Koetulokset

Koe	Öljykammioon valuneen öljyn sammuminen (kyllä / ei)	Huomio
1	Kyllä	
2	Kyllä	Pieni määrä öljyä jäi palamaan termoelementtilangan asennus uraan palonsuojakasetin päällä. Tämä katsotaan koejärjestelyn aiheuttamaksi, eikä näinollen vaikuta testitulokseen.
3	Kyllä	
4	Kyllä	

Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

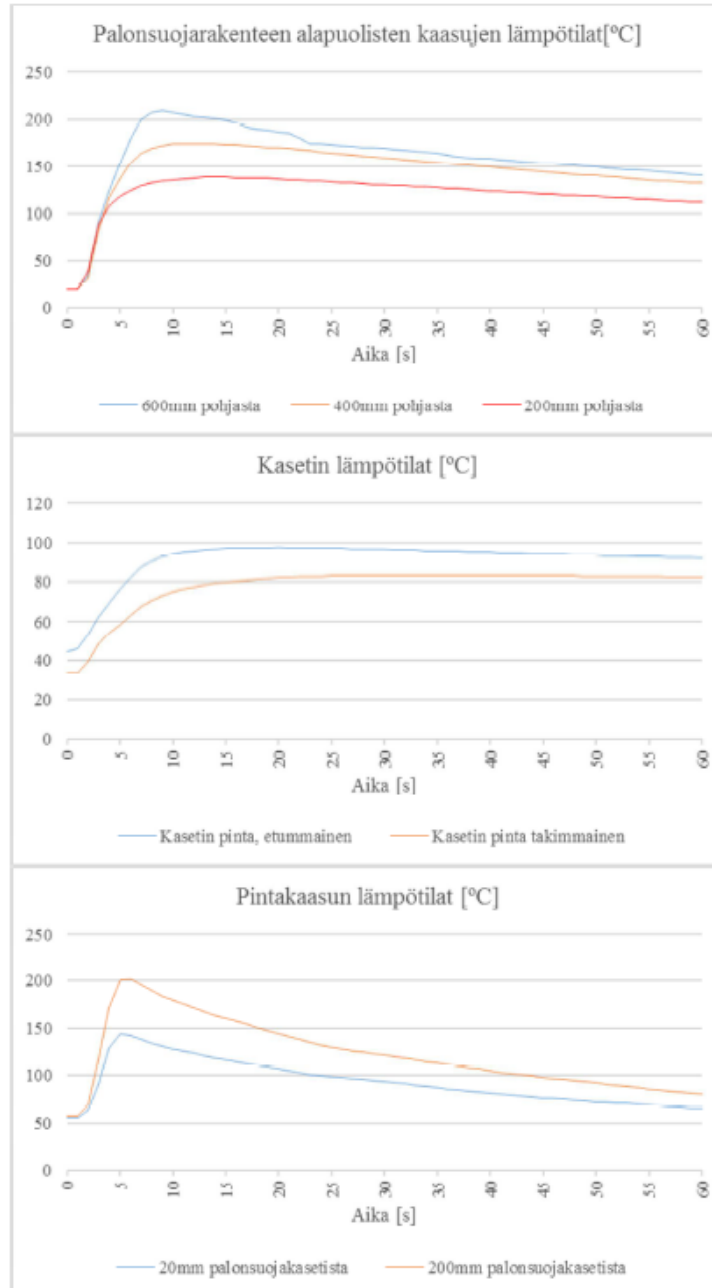
Seuraavassa on esitetty mittaustulokset

Koe 1



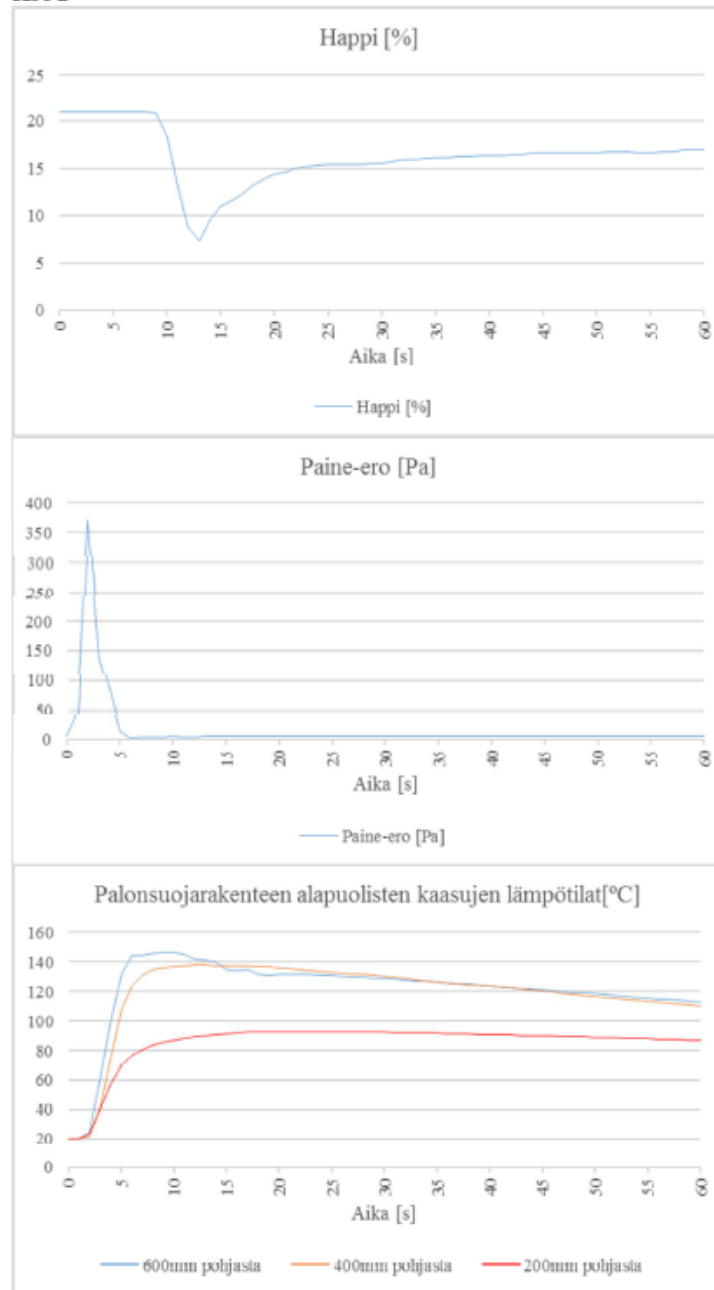
Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

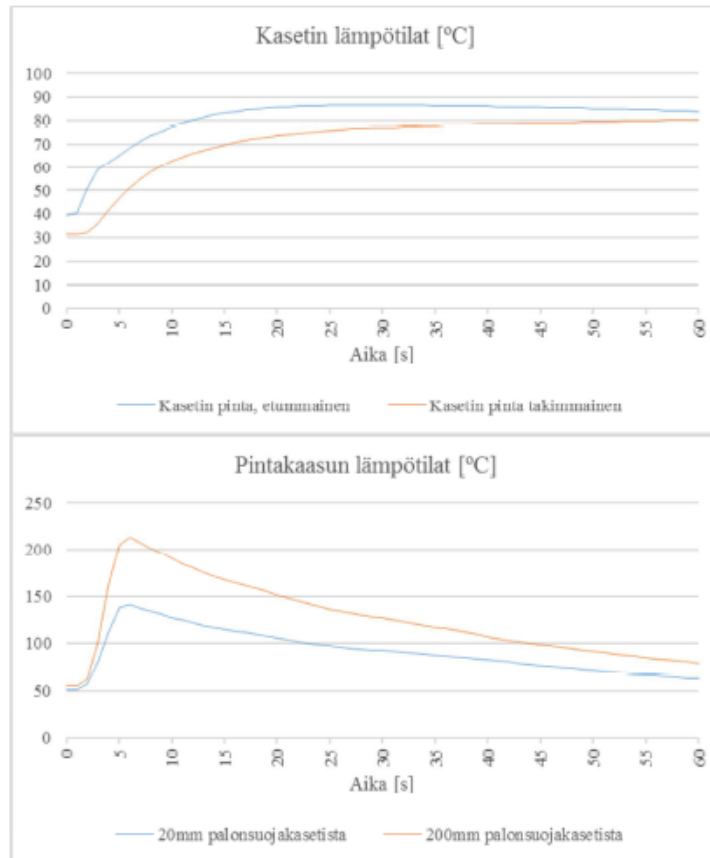


Testitulokset pätevät ainoastaan testatulle näytteelle.

Koe 2



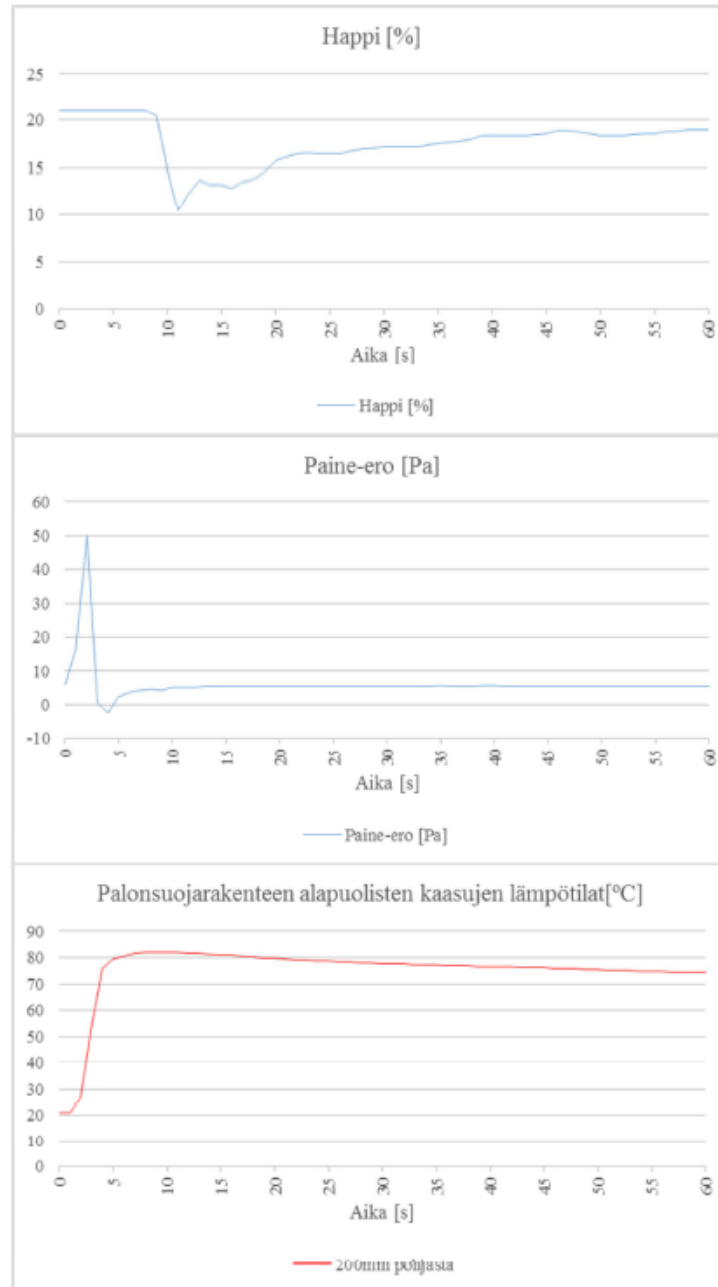
Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.



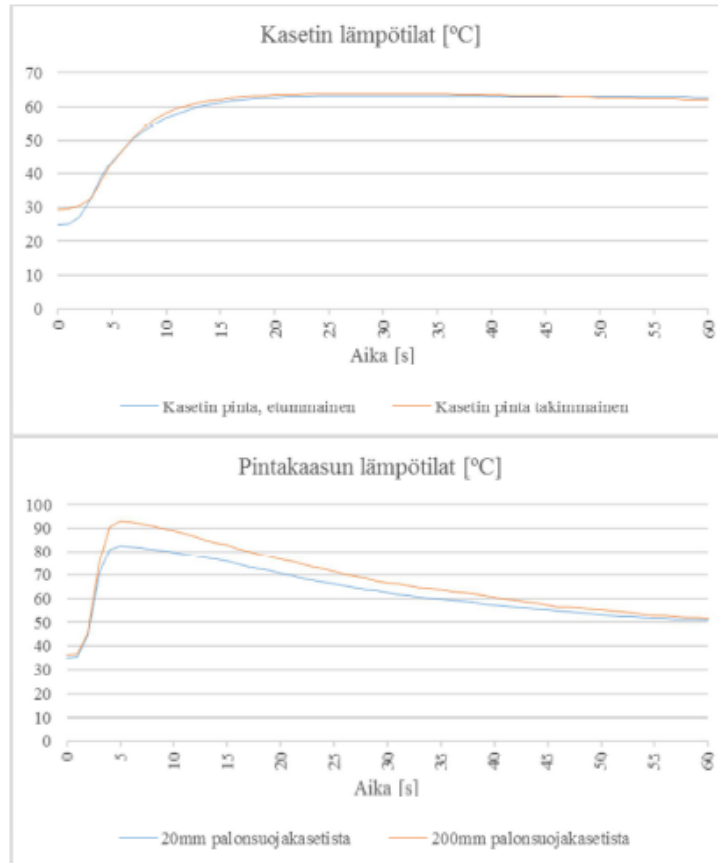
Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT Expert Services Oy:itä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Koe 3



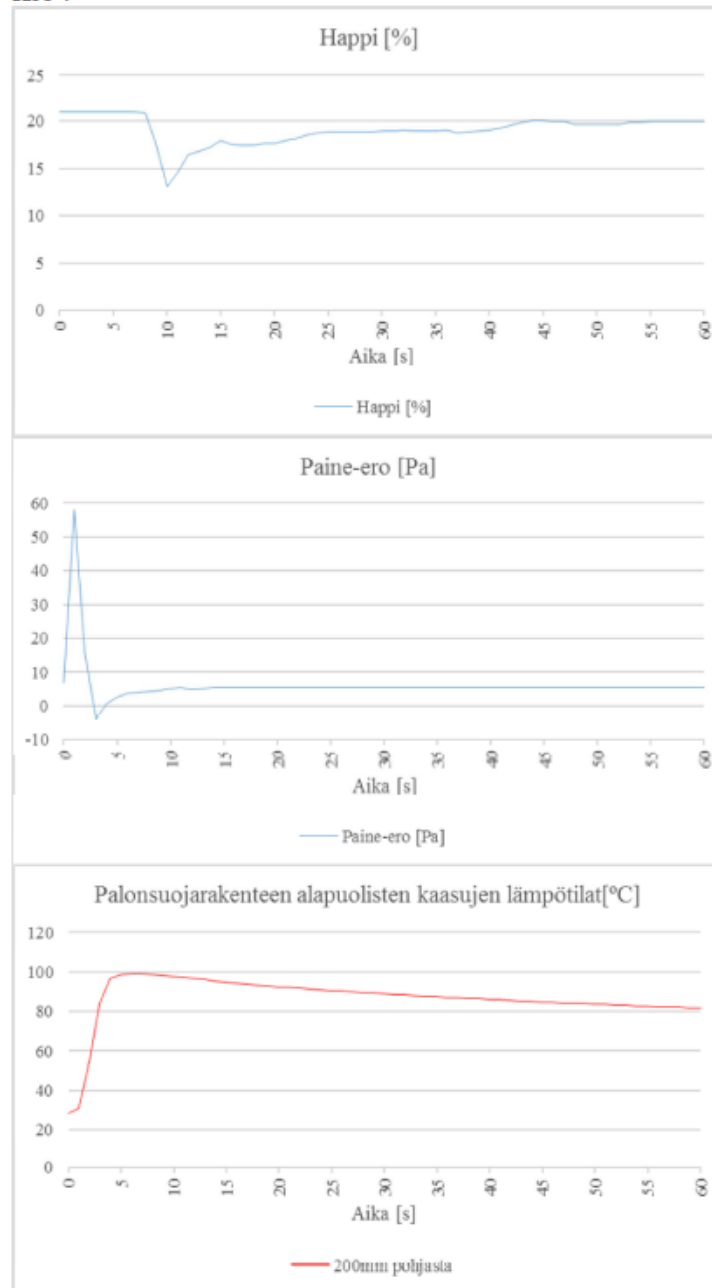
Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.



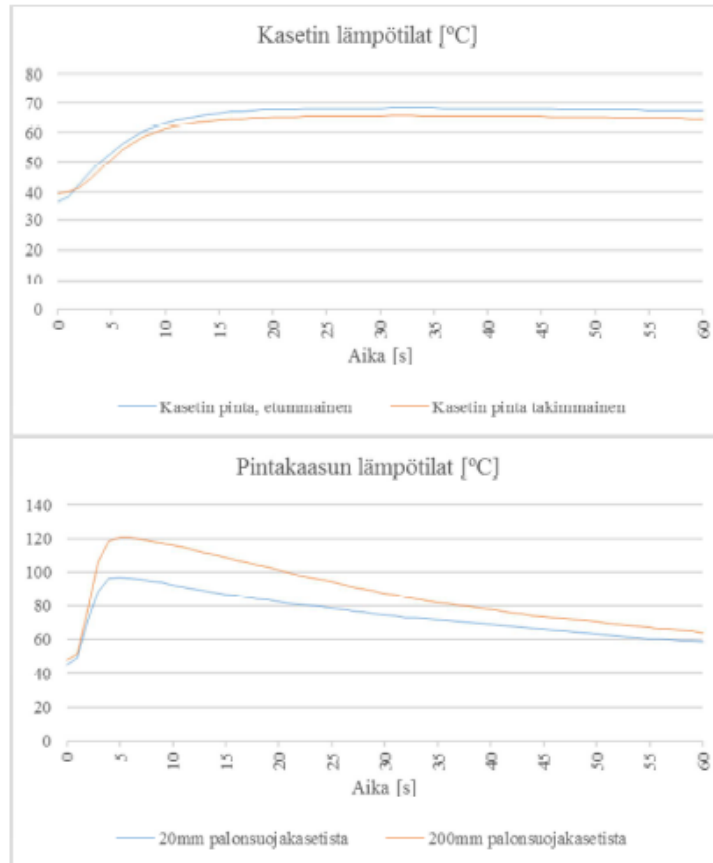
Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Koe 4



Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.



Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Yhteenveto Saatujen testitulosten ja havaintojen perusteella, voidaan todeta, että testatun kaltaisissa olosuhteissa palava öljy sammuu öljykammiossa, kun se kaadetaan (ritilätason ja) palonsuojakasetin läpi öljykammioon. Kokeessa 2 pieni määrä öljyä jäi palamaan termoelementti-langan asennus uraan. Öljykammioon valunut öljy sammui kaikissa kokeissa.

Espoo, 6.10.2017, VTT Expert Services Oy



Kimmo Kaukanen
Tuotepäällikkö

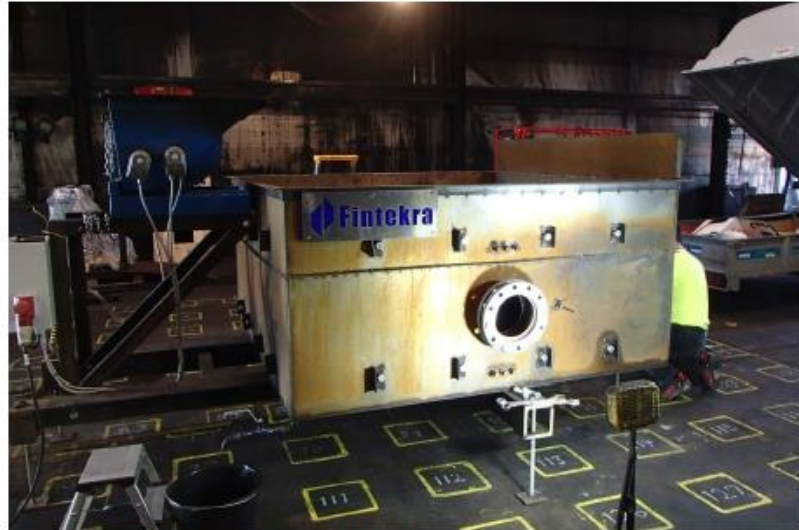
Liitteet Liite 1. Asiakkaan toimittamat tuotetiedot, Koekappaleen rakennekuva
Liite 2. Valokuvat testatusta koekappaleesta ja kokeista
Liite 3. Mittapisteiden sijainnit

Jakelu Asiakas Alkuperäinen
VTT arkisto Alkuperäin

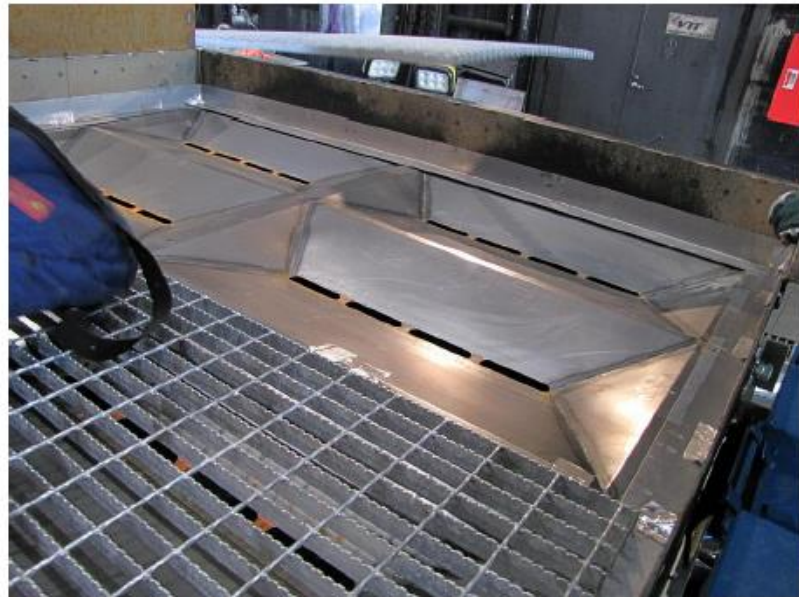
Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT Expert Services Oy:itä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Liite 2 Valokuvat



Kuva 1. Yleiskuva testatusta kokoonpanosta



Kuva 2. Liekkiloukku - palonsuojarakenne (ritilä asennettu jo toiselle puolikkaalle)

Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.



Kuva 3. Liekkiloukku - palonsuojakrakenne asennettuna öljykammion päälle.



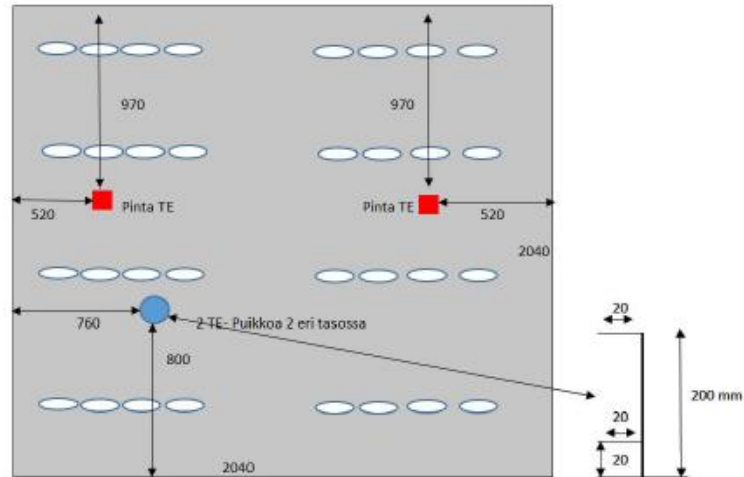
Kuva 4. Koevaihe. Öljyn esilämmityksen jälkeen se sytytettiin. Esipalooaika oli 2 minuuttia.

Testitulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Liite 3 Mittapisteeet

Pintalämpötilan mittapisteeet palonsuojakasetin pinnassa (punaiset)
Kaasulämpötilan mittapisteeet 20 mm ja 200 mm korkeudella huoltotason pinnasta (sininen)



Öljykammion korkeuden ollessa 800 mm (koe 1 ja 2), kammiosta mitattiin happi, paine-ero ja lämpötila öljykammion yläosassa (kuva vasemmalla). Mittaukset siirrettiin öljykammion alaosaan, kun öljykammion korkeudeksi muutettiin 200 mm (koe 3 ja 4). Tämä on esitetty oikeapuoleisessa kuvassa.



Testitulokset pätevät ainoastaan testatulle näytteelle.

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT Expert Services Oy:itä saadun kirjallisen luvan perusteella.

LIITE VII Teräsrakenteiden lämpötilan laskuri

```
clc
clear all
close all
%Teräsrakenteiden palotekninen mitoitus s. 46 & 38 & 39
Ta=20; %teräksen lämpötila alussa C
Tn=1; %lämpötilanmuutoksen alkuarvo C
y=7850; %tilavuuspaino kg/m3
F=1; %pinta-alan suhde pituusyksikköön
E=0.7; %emissioluku
V=0.001; % teräksen tilavuus metrillä m3/m

ak=25; %lämmönsiirtoluvun konvektio-osa

Tt=21; %teräksen muuttunut lämpötila C
t=0; %aika s
hold on
while Tt < 350

    tmin=t/60; %minuutit
    dt=t/60/60; %tunnit
    % Tp=600;
    % Tp=800;
    Tp=20+1080*(1-0.325*exp(-0.167*tmin)-0.675*exp(-2.5*tmin)); %Hii-
    lietyjen palamisen aikasidonnainen kaava
    Tt=Ta+Tn; %Teräksen lämpötila
    c=0.46+0.33*10^(-3)*Tt; %ominaislämpö
    as=((5.77*E)/(Tp-Tt))*(((Tp+273)/(100)).^4-((Tt+273)/(100)).^4);
    %as = lämmönsiirtymisluvun säteilyosa
    a=ak+as; %lämmönsiirtymisluku
    Tn=(a/(y*c))*(F/V)*(Tp-Tt)*dt; %teräksen lämpötilan muutos

    t=t+0.1;
    plot(t,Tp,'*b');
    title('Palonsuojakasetin lämpötilan suhde paloaikaan')
    xlabel('aika [s]')
    ylabel('lämpötila [C]')
end
```

LIITE VIII Koottu palolasku

```
clc
clear all
close all

%Tila
A = 4; %pinta-ala m2
V = 0.8*A; %tilavuus m3
Ao = 0.024*A; %Aukon koko pinta-alasta m2
D=sqrt((A*4)/pi); %vastaava palon halkaisija (pinta-alasta) m
Do = sqrt((Ao*4)/pi); %vastaava ympyrän halkaisija (aukon pinta-alasta) m
C = 0.6; %Aukon vaikutusluku
T = 20; %alkulämpö C
T2=20;
g=9.82; %putoamiskiihtyvyyys m/s2
Yoa=21; %happiprosentti ilmassa
Yoe=3; %tukahtumisen happiprosentti
t=0.1;

%Teräs
Ta=20; %teräksen lämpötila alussa
Tn=1; %lämpötilanmuutoksen alkuarvo
y=7850; %tilavuuspaino
F=1; %pinta-alan suhde pituusyksikköön
Em=0.7; %emissioluku
Vt=0.001; % teräksen tilavuus metrillä 0.006 jos koko rakenne
ak=25; %lämmönsiirtoluvun konvektio-osa
    %tulipalon lämpötila hetkellä t
Tt=21; %teräksen muuttunut lämpötila

%Palokaasut
cp= 1.25; %kJ/kg K palokaasun ominaislämpökapasiteetti
rhog = 1.20; %palokaasujen tiheys kg/m3
rhoa = 1.2466; %ilmantiheys kg/m3

%Polttoaine
rhof=760; %polttoaineen tiheys kg/m3
mmabs=0.039; %polttoaineen absoluuttinen maksimimassavirtaus palossa
kg/m2s
Hc=46.4; %Höyryjen alempi palamislämpö MJ/kg
kb=0.7; %ainevakio m^-1
x=0.7; % palamistehokkuusluku
O=3.37; %polttoaineen vaatima happimäärä kg/kg
dHo=Hc/O; %energia happikiloa kohden MJ/kg
dHa=dHo*(Yoa/100); %energia ilmakiloa kohden MJ/kg
dHav=dHa*rhoa; %energia ilmakeuutiota kohden MJ/m3

m=rhog*V; %palokaasujen massa kg

k=0.0232; %hiilimonoksidin lämmönjohtavuus w/mK
n=14.3; %palokaasujen suhde polttoaineeseen kg/kg
R=8314; %J/kg mol K
M=0.044; %kg/mol hiilidioksidin moolimassa

aa=0.19; %nopean palon alpha kW/s2
%Mittauspiste
Z=0.8; %m mittauspisteen korkeus
```

```

%Laskut
while t<=6;
%   for t = 0:0.1:100
       drho =rhoa-rhog; %tiheydenmuutos
       hk=sqrt((k*cp*rhog)/t); %hk-luku kaasujen lämpötilanlaskua varten
       mm = mmabs*(1-exp(-kb*D)); %todellinen polttoaineen massavirta
kg/m2s
       mmg =mm*n; %savukaasujen massavirta
       Q = mm*Hc*x*A; %palotapahtuman HRR MW %parempi kaava Q:lle, aika-
sidonnainen
       %   Q=aa*t.^2; %paloteho ajan mukaan
       Qk=Q*1000; %Paloteho kilowatteina
       ZQ=Z/((Qk)^(2/5)); %palotehon suhde mittauspisteen korkeuteen
       if ZQ<0.08
           n=0.5;
       elseif ZQ>0.2
           n=-0.333;
       else
           n=0;
       end

       if ZQ<0.08
           K=6.8;
       elseif ZQ>0.2
           K=1.1;
       else
           K=1.9;
       end

       dTg = (Q/(m*cp))*t; %palokaasujen lämmönmuutos C, ei toimi välttämättä
       kaasuille
       dTg2=Q/(mm*cp*hk*A); %palokaasujen laskukaava, mm pitää vaihtaa
       palokaasujen massavirtaan
       T4=20+1080*(1-0.325*exp(-0.167*t)-0.675*exp(-2.5*t)); %hiilivety-
       jen palokaava
       T3=((K/3.9865)^2)*ZQ^(2*n-1)*293; %McCaffery lämpötila C
%       T = dTg+T; %muuttunut kaasun lämpö C
%       T2= dTg2+T2;
       e=(rhoa-rhog)/(rhoa+rhog);
%       e1=-2*(T-Ta)/(T+Ta);
       dp = (((Qk/(cp*(dTg2+273)*Ao))^2)/(2*rhog))/1000; %paineenmuutos
kpa %parempi kaava paineelle
       dpcri = 0.2427*(1+e/2)*exp(1.1072*e)*(4*g*drho*Do); %kriittinen
       painearvo pa
       dpcri2=1.0954*g*drho*Ao^0.5*(1-drho/(2*rhoa))*exp(-
       1.1072*drho/rhoa);
       dpcri3=1.0954*Ao^0.5*(1-0.5*(dTg2/T));
       dpcri4=0.2427*(1+e/2)*exp(1.1072*e)*dp; %kpa
       te=(Yoa-Yoe)*(dHo*rhog*V)/(Q*1000); %palon loppuunpalamisaika ha-
       pesta riippuen

       %Muuttunut kaasun tiheys
%       rhog=(M*dp)/(R*dTg2)
       rhog=352.8/(dTg2+273); %352.8/T kelvineinä!

       %teräksen lämpötila
       dt=t/60/60; %aikamuutoksen muunnos sekunneista tunteihin

```

```

ct=0.46+0.33*10^(-3)*Tt; %ominaislämpö
as=((5.77*Em)/(dTg2-Tt))*(((dTg2+273)/(100)).^4-
((Tt+273)/(100)).^4);
%as = lämmönsiirtymisluvun säteilyosa
a=ak+as; %lämmönsiirtymisluku
Tn=(a/(y*ct))*(F/Vt)*(dTg2-Tt)*dt; %teräksen lämpötilan muutos
Tt=Tt+Tn; %Teräksen lämpötila ennen Ta+Tn

Tm=Tt-Ta; %Teräksen kokonais lämpötilan muutos

ts=dHav/Q;
plot(t,dTg2,'*b')
plot(t,Tt,'*r')
title('Palonsuojakasetin ja palokaasujen lämpötilan suhde paloai-
kaan')
xlabel('aika [s]')
ylabel('lämpötila [C]')

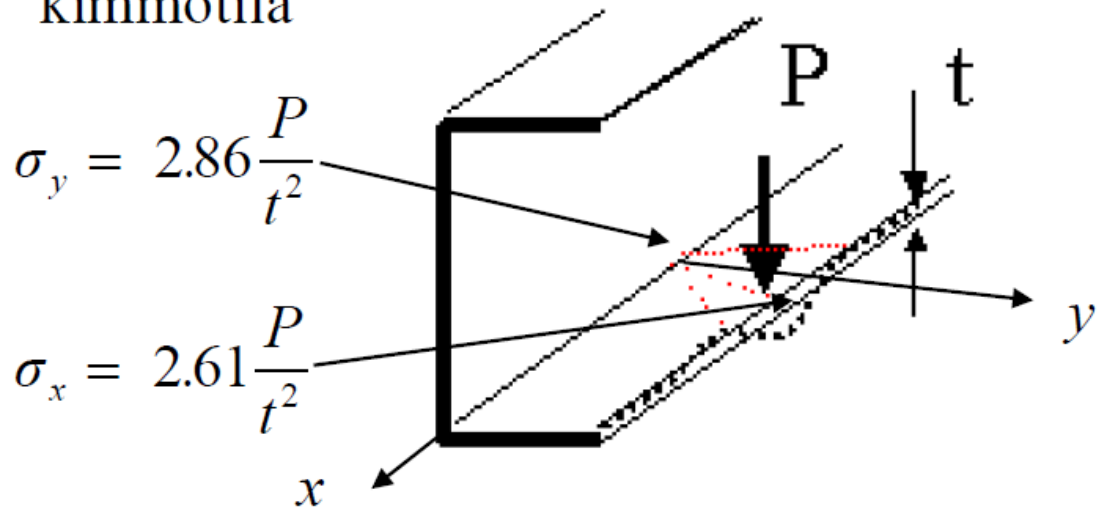
t=t+0.1;
hold on
end
legend('Palonsuojakasetin lämpötila','Palokaasujen lämpötila')

```

LIITE IX 120-IPE palkin laipan kimminen sekä plastinen ratkaisu

Kimminen ratkaisu:

kimmotila



Materiaali S355 $\rightarrow f_y = 355$ MPa

Varmuuskerroin $\gamma_{M0} = 2.5$

Rakenne IPE 120 \rightarrow Laipan paksuus $t = 6.3$ mm

Suurin laipan kestävä pistekuormitus kimmotilassa $P = ?$

$$\sigma = f_y / \gamma_{M0}$$

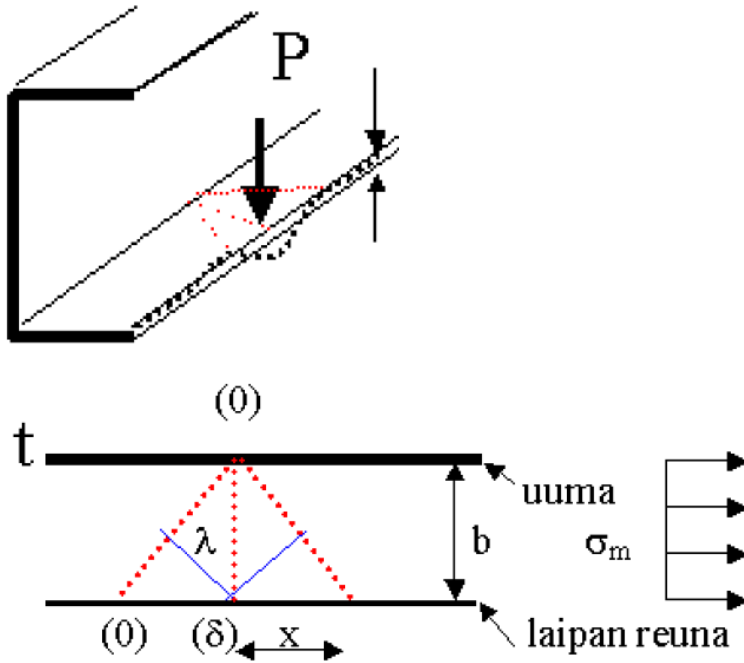
$$\sigma_y = 2.86 \frac{P}{t^2}$$

$$\frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2.86P}{t^2}$$

$$P = \frac{f_y t^2}{2.86 \gamma_{M0}}$$

$P = 1970$ N

Plastinen ratkaisu:



$$\sigma_m = 0$$

$$W_o = \gamma P \sigma$$

$$W_{in} = W_o$$

$$P = \frac{f_y t^2}{2\gamma_{M0}} \left[1 - \frac{\sigma_m^2}{f_y^2} \right] \left[\frac{2b}{x} + \frac{x}{b} \right]$$

$$\frac{d\Pi}{dx} = \left[-\frac{2b}{x^2} + \frac{1}{b} \right] = 0 \rightarrow x = \sqrt{2b}$$

$$P = \sqrt{2} f_y t^2 \left[1 - \frac{\sigma_m^2}{f_y^2} \right] \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

$$P = 7970 \text{ N}$$

Liite X HAZOP-analyysi

Tilanne	Mitä aiheutuu	Mistä aiheutuu	Ratkaisu
Räjähdys	Äkillinen paineenmuutos rakenteen alapuolisessa tilassa saattaa vaurioittaa rakenteita.	Optimaalisen kaasuseoksen syttymisestä.	Räjähdyshuikut, alapuolisen tilan kaasukoostumuksen valvonta, valvonta, suojaus ja etukäteisvarmistukset tulitöissä Käytännössä mahdollon tilanne
Ylikuormitus	Rakenne pettää ja menettää palonsuojausominaisuutensa	Ylimääräistä kuormaa rakenteella	Ennen täyden hyötykuorman lisäystä on lumikuorma poistettava
Palokuormitus	Rakenteiden kantokyvyn aleneminen	Rakenteiden kohonneesta lämpötilasta palotapahtumassa	Rakenteet tulee mitoittaa kestäämään paloa tietyn aikaa, palo tulee sammuttaa ennen kriittisen lämpötilan saavuttamista
Tukkeutuneet aukot	Nesteen- / roskan läpäisy estynyt, palava neste tai vesi voi jäädä palonsuojarakenteen päälle luoden vaaratilanteen palon tai jään muodossa.	Palonsuojakasetin aukot ovat tukossa	Palonsuojakasetin tarkastaminen ajoittain, puhdistus, palonsuojakasetti on muutoitlu jään voimat väistäväksi
Palo tulitöistä	Palavan aineen syttyminen	Tulitöissä syntyneestä kipinästä	valvonta, suojaus ja etukäteisvarmistukset tulitöissä
Palon jatkuminen hiiltymisestä	Jo sammunut palo sytty jälleen	Palonsuojarakenteen alapuoliseen tilaan jääneestä hiiltymisestä materiaalista. Kaasuseoksen muututtua jälleen tarpeeksi hapekkaaksi voi kytevä materiaali sytyttää palon uudestaan	Palonsuojarakenteen alta on poistettava kaikki hiiltynvä materiaali.
Sinkkipinnan vaurioituminen	Rakenteiden sinkkipintojen vaurio voi vaikuttaa korroosionkestokykyyn	Tulitöistä syntyneistä kipinöistä, Iskusta	Rakenne on suojattava tulitöiden ajaksi, iskuista syntyneet raot on sinkkattava umpeen.
Isku	Palonsuojakasetti voi vaurioitua kovan iskun seurauksena jolloin sen ominaisuudet katoavat tai vähenevät merkittävästi	Tarpeeksi kovasta iskusta palonsuojarakenteeseen	Palonsuojakasetti on sijoitettu ritilärakenteen alle, joka ottaa vastaan iskuja.