



PELASTUSOPISTO



POLIISI

POLISIAMMATTIKORKEAKOULU

Lämpösäteilylaskenta riskienhallinnan tukena

Lyden Petri

04/2026

Opinnäytetyö / pelastusalan päällystötutkinto (AMK)

Tiivistelmä

JULKAISUN NIMI	Lämpösäteilylaskenta riskienhallinnan tukena
LAATIJA	Lyden Petri Mikael
JULKAISUAJANKOHTA	04/2026
AVAINSANAT	Lämpösäteily, riskienhallinta, pelastuslaki 9 §, lainalaisuusvaatimus, tasapuolisuus, harkintavalta
JULKISUUSASTE	Julkinen

TIIVISTELMÄ

Pelastuslain 9 §:n mukaan helposti syttyvää materiaalia tai muuta tavaraa ei saa säilyttää muun ohella rakennuksen välittömässä läheisyydessä niin, että siitä aiheutuu tulipalon syttymisen tai leviämisen vaara tai että tulipalon sammuttaminen vaikeutuu. Lain esityöt, oikeuskäytäntö tai muukaan merkittävä lähdeaineisto ei täsmennä, millaista tällainen materiaali tai tavara on tai milloin se on "välittömässä läheisyydessä". Perustuslain 2.3 §:n mukaan viranomaisen toiminnan, esimerkiksi korjausmääräysten, pitää perustua lakiin. Hallintolain 6 §:n mukaan hallinnon asiakkaita tulisi kohdella tasapuolisesti myös viranomaisen suhteellisen vapaaseen harkintaan jäävissä asioissa.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten paloteknistä säteilyteholaskentaa voidaan käyttää riskinarvioinnin tukemisena ratkaistaessa, milloin palava materiaali tai tavara on niin lähellä rakennusta tai muuta kohdetta, että sen voidaan argumentoida olevan lainvastaista. Työssä selvitettiin tarvittavia paloteknisiä laskentamalleja ja niiden tarvitsemia laskentatietoja. Valittuja laskentamalleja sovellettiin kolmeen CASE-esimerkkiin, jotka valittiin tarkastelemalla vuosina 2020–2024 Pirkanmaalla sattuneita rakennuksen ulkopuolella syttyneitä rakennuspaloja ja rakennuspaloaaroja. Opinnäytetyön pääasiallinen menetelmä oli kirjallisuuskatsaus palotekniseen kirjallisuuteen ja sen tarkoituksena oli tuottaa toiminnallinen laskentatyökalu työn produktina.

Sopiviksi paloteknisiksi laskentamalleiksi valittiin palotehon laskeminen pinnan lämpötilan ja palon massavirran perusteella. Tarkastelupisteeseen kohdistuvan lämpösäteilyn intensiteetin laskentamalleiksi valittiin pistemäisen säteilijän malli, tasopinnan malli ja eräät liekkipalon laskentamallit. Tarkasteltavat CASE-esimerkit olivat ajoneuvo, puuaineksen massa ja kaksi erilaista jäteastiaryhmää. Näille tarkasteltiin riittävät suojaetäisyydet suhteessa nopeaan pakenemisenomaiseen ohittamiseen ja alkusammuttamiseen sekä suojaetäisyys palava-aineiseen rakennuksen seinään.

Tästä opinnäytetyön raportista löytyvien CASE-esimerkkien ohella tuotettiin Excel-työkirja, joka laskee käyttäjän tekemillä valinnoilla palon lämpösäteilytehon ja sen aiheuttaman tarkastelupisteeseen kohdistuvan lämpösäteilyn intensiteetin.

SIVUJA 71

LIITE 1 Liitetaulukot tarvittaville paloteknisille laskentasuureille

LIITE 2 Excel-laskentataulukko työkalu erillisenä tiedostona

ABSTRACT

TITLE OF PROJECT	Thermal radiation calculations in risk management
AUTHOR	Lyden Petri Mikael
MONTH AND YEAR	04/2026
KEYWORDS	Thermal radiation, risk management, Rescue Act 9 §, legality principle, equality, discretion
CONFIDENTIALITY	Public

ABSTRACT

According to section 9 of the Rescue Act, flammable materials or other goods may not be stored in the immediate vicinity of a building so that it creates a risk of fire starting or spreading or that extinguishing a fire becomes difficult. The preparatory work for the Act, case law or other significant source materials do not specify what this kind of material or goods are or when they are “in the immediate vicinity”. According to section 2.3 of the Constitution the actions of authorities, for example correction orders, must be based on law. According to section 6 of the Administrative Procedure Act, administrative customers should be treated equally even in matters that are within the relatively free discretion of the authority.

The purpose of the thesis was to investigate how fire-technical radiation power calculations can be used to support risk assessments when assessing if flammable materials or goods are so close to a building or other object that it can be argued illegal. The thesis investigated the necessary fire-technical calculation models and the calculation data they require. The selected calculation models were applied to three CASE examples, which were selected by examining building fires and building fire hazards that occurred outside buildings in Pirkanmaa in 2020–2024. The main method of the thesis was a literature review of fire engineering literature, and its purpose was to produce a functional calculation tool as a product of the work.

The calculations based on surface temperature and fire mass flow were selected as suitable fire engineering calculation models for fire power. The calculation models for the thermal radiation intensity at the observation point were a point source model, a plane surface model and selected flame calculation models. The CASE examples examined were a vehicle, a mass of wood and two different waste container groups. For these, sufficient safety distances in relation to rapid escape-like overtaking and early fire suppression, and the safety distance to a combustible wall of a building, were examined.

In addition to the CASE examples found in this thesis report, an Excel workbook was produced that calculates the heat radiation power of a fire and the intensity of the heat radiation it causes at the observation point using the user's selections.

PAGES 71

ANNEX 1 Annex tables for the necessary calculation data
ANNEX 2 Excel workbook tool as a separate file

Sisällys

1 Johdanto	1
1.1 Tausta ja tarpeellisuus	1
1.2 Tavoite, tutkimuskysymykset ja rajaukset	3
1.3 Menetelmät.....	4
2 Oikeudellinen viitekehys ja hyvä hallinto	6
3 Lämpösäteilytehon laskeminen	8
3.1 Lämpöenergian siirtymisen perusteet	8
3.2 Lämpösäteilytehon lämpötilaperusteinen laskeminen	10
3.3 Lämpösäteilytehon massavirtaperusteinen laskeminen	12
3.4 Puun palaminen erikoistapauksena	16
3.4.1 Puukehikko	18
3.4.2 Kuormalavapino	20
3.5 Mitoituspalot lämpösäteilyn lähteenä	23
3.5.1 Kalorimetria	23
3.5.2 Valikoituja mitoituspaloja säteilyteholaskennan välineeksi.....	24
4 Kohdistuvan säteilyn intensiteetti	28
4.1 Pistemäinen säteilijä	28
4.2 Tasopintasäteilijä ja näkyvyyskerroin	30
4.3 Liekin aiheuttama lämpösäteily ja muita käytännön sovelluksia	32
4.3.1 Palava massa seinämäisenä säteilijänä	33
4.3.2 Liekkien aiheuttama lämpösäteily.....	35
4.4 Riskin arvioiminen	40
4.4.1 Riski omaisuudelle	40
4.4.2 Riski ihmiselle	41
5 Soveltaminen – CASE-esimerkit	45
5.1 Tietokantatarkastelu ja aineistoanalyysi.....	45
5.2 Case 1: Ajoneuvo	46
5.3 Case 2: Puuaineksen massa	49
5.4 Case 3: Jäteastiaryhmä	51
6 Työn toiminnallisen tuotoksen esittely	55
7 Loppusanat	56
7.1 Yhteenveto	56
7.2 Työn luotettavuus ja tarkkuus	58
7.3 Jatkotutkimuksen tarve	59
Lähteet.....	61
Liitteet	64

1 Johdanto

1.1 Tausta ja tarpeellisuus

Pelastuslain (379/2011) 1 §:n mukaan lain tavoitteina on muun ohella, että onnettomuuksia vähennetään ja onnettomuuden sattuessa onnettomuuden seurauksia ihmisille, omaisuudelle ja ympäristölle vähennetään. Lain 9.1 §:n mukaan rakennuksen omistajan, haltijan sekä toiminnanharjoittajan on osaltaan huolehdittava siitä, että rakennus, rakennelma ja sen ympäristö pidetään sellaisessa kunnossa, että tulipalon syttymisen, tahallisen sytyttämisen sekä leviämisen vaara on vähäinen. Lain 9.2 §:n mukaan helposti syttyvää materiaalia tai muuta tavaraa ei saa säilyttää muun ohella rakennuksen välittömässä läheisyydessä niin, että siitä aiheutuu tulipalon syttymisen tai leviämisen vaara tai että tulipalon sammuttaminen vaikeutuu.

Säännöksen valvomiseksi sen paremmin, kuin ohjaamiseksiakaan ei ole tarjolla merkittävästi yksityiskohtaisempaa tai käytännönläheisempää tietoa. Pelastuslain esitöiden (HE 257/2010 vp, s. 36) mukaan säännöksellä tarkoitetaan sitä, että ”Rakennuksesta ja sen ympäristöstä huolehtiminen edellyttää myös toimenpiteitä tahallisesti sytytettyjen palojen estämiseksi. Tärkeitä keinoja ovat [...] helposti syttyvien tavaroiden asianmukaisesta säilyttämisestä huolehtiminen. Helposti syttyvää tai tulipalon syttymisen tai leviämisen vaaraa aiheuttavaa tavaraa saa säilyttää vain siihen tarkoitetuissa paikoissa. Tämä tarkoittaa esimerkiksi [...] roskien ja muiden jätteiden säilyttämistä vain tarkoitukseen varatuissa paikoissa. Jäteastioiden, tavaravarastojen ja vastaavien sijoittamisessa on otettava huomioon paitsi tulipalon syttymisen estäminen, niin myös sen leviämisen rajoittaminen. Rakenteellisin ja muin keinoin on huolehdittava siitä, ettei esimerkiksi jätekatoksen palo pääse leviämään viereiseen rakennukseen”.

Pelastustoimen Valvonnan kumppanuusverkoston julkaisema *Pelastustoimen valvonnan aapinen* kiinnittää niin ikään huomiota lähinnä jäteastioihin ja viittaa Suomen pelastusalan keskusjärjestön (SPEK) oppaaseen *Pihan jäteastiat ja tuhopolttojen torjunta*. Oppaan 4. uusittu painos on julkaistu vuonna 2025. Opas ottaakin ansiokkaasti kantaa paitsi jäteastioihin, yleisesti ottaen eri levyisiin ja korkeisiin palavien materiaalien rakennelmiin ja varastokasoihin (SPEK 2025, 9–11) menemättä kuitenkaan sen syvemmälle tai tarkempaan argumentaatioon. Muuta merkittävää edes niin sanottua soft law -aineistoa ei aiheesta ole helppoa löytää.

Suhtautuminen erilaisten syttyvien ja palavien materiaalien ja esineiden säilyttämiseen rakennusten välittömässä läheisyydessä vaikuttaa lisäksi olevan paradoksaalista. Pelkästään vuonna 2025 uutisoitiin rakennusten seinustalla olevista halkopinoista ainakin kolmesti. Ensin toukokuussa Verkkouutiset (2025) kertoi Maaseudun Tulevaisuutta referoiden SPEK:n

vanhemman asiantuntijan suulla, että kaikki halkopinot ovat laittomia rakennuksen kuin rakennuksen seinustalla rakennuksen materiaalista riippumatta. Elokuussa Iltalehti (2025a) siteerasi sisäministeriön pelastusylitarkastajaa, joka esitti saman asian hieman lievemmin sanankään-
tein. Iltalehti (2025b) jatkoi aiheesta saman vuoden syyskuussa peilaten kansan tunteja sääntelystä, joka koettiin pikkutarkkana ja käytännöstä vieraantuneena.

Samaan aikaan yleisesti hyväksyttävänä pidetään esimerkiksi sitä, että asuinrakennusten avoimet autopaikat voivat sijaita kiinni rakennuksessa ja jopa sen ikkunan edustalla. Näin on siitä huolimatta, että tavallinen henkilöauto sisältää karkeasti saman palokuorman kuin kuutiometri polttopuuta ja se oletettavasti palaa kiihkeämmin lähettäen siksi enemmän lämpösäteilyä ja kuumia savukaasuja. Uudenaikaiset materiaalit ja käyttöesineet ovat tuoneet uudenlaisia riskejä. Yleisesti esille tulleita ovat esimerkiksi sähköiseen liikevoimatekniikkaan perustuvat laitteet, kuten sähköautot ja kevyemmät sähköiset liikkumisvälineet. Näiden akkujen palot ovat kiivaampia ja siten oletettavasti palodynaamisesti hankalampia kuin perinteiset materiaalit ja esineet.

Pelastusalan työkokemukseni kattaa yli 20 vuoden ajalta yli kymmenen vuotta operatiivisessa pelastustoiminnassa ja noin kymmenen vuotta valvonnan ja onnettomuuksien ehkäisyn parissa. Kokemukseni mukaan pelastusviranomaiset kohtaavat tämän epämääräisen sääntelyn esimerkiksi yhteydenottoina erilaisiin pelastuslaitosten neuvontapalveluihin. Valvonnan kannalta haasteita aiheuttaa tosielämän ilmiöiden laillisuuden tai laittomuuden rajanveto ja hallintolain (434/2003) 6 §:n velvoittama tasapuolisuus. Perustuslain (731/1999) 2.3 §:n mukaan julkisen vallan käytön on perustuttava lakiin. Viranomaisen ei voi vaatia sellaista, jota laissa ei sanota. Lainsäädännön ollessa pelastuslain 9 §:n tavalla avoimeen muotoon kirjoitettua, tulee viranomaisen soveltamiskäytännön perustua jonkinlaiseen järkevään argumentaatioon siitä, minkälainen tavaran säilyttäminen viranomaisen mielestä on tai ei ole lainvastaista.

Tästä syntyi opinnäytetyön tarpeellisuus ja tarkoitus. Pelastuslain 9 §:n keskiössä on palavan materiaalin syttymisen estämisen ohella palon leviämisen estäminen rakennuksen läheisyydessä oleviin suojeltaviin kohteisiin, nimenomaisesti rakennukseen itseensä. Yleisesti tunnettuja keinoja ovat esimerkiksi syttymiseltä ja sytyttämiseltä suojaaminen (lukitus, valaistus...), suojaavat etäisyydet ja palorasitusta kestävä rakenteet. Tämä opinnäytetyö syventyi kahteen viimeksi mainittuun paloteknisen laskennan keinoin. Opinnäytetyössä esitetään, millä keinoin voidaan käytännönläheisesti ja toiminnanharjoittajan ja pelastusviranomaisen käytettävissä olevin keinoin laskennallisesti arvioida ja argumentoida mahdollisen palavan kohteen ympäristöönsä ja siten myös suojattavaan kohteeseen lähettämää lämpösäteilyä. Lisäksi esitetään, minkälaisia lämpösäteilyrasituksia voidaan vielä pitää hyväksyttävänä erilaisille vastaanottaville kohteille. Työllä on ulottuvuus myös poistumisturvallisuuteen, sillä tarkasteltavana mahdollisesti uhattuna kohteena käsitellään myös ihmistä.

1.2 Tavoite, tutkimuskysymykset ja rajaukset

Edellisen luvun mukaisesti tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, minkälaisilla lähtötiedoilla ja laskentamalleilla paloteknisen laskennan keinoin rakennuksen lähellä säilytettävien esineiden ja tavaroiden palamisen aiheuttamaa riskiä rakennukselle voidaan tarkastella ja argumentoida. Käytettävien työkalujen tulisi olla riittävän yksinkertaisia ollakseen pelastuslaitoksen onnettomuuksien ehkäisytyön ja valvonnan viranhaltijoiden käytettävissä ja rakennusten omistajien, haltijoiden ja toiminnanharjoittajien ymmärrettävissä. Näistä lähtökohdista valitaan työn tutkimuskysymyksiksi ja niiden vastaamiseksi asetetuiksi tavoitteiksi seuraavat.

Työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten termodynaamista/paloteknistä laskentaa voidaan käyttää palavien materiaalien ja tavaroiden säilyttämisestä ympäristölle aiheutuvan riskin tarkasteluun?
2. Miten tällaista tietoa voidaan käyttää pelastusviranomaisen riskienhallinta- ja valvontatyön tukena?

Tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi opinnäytetyön tavoitteena on työn rajaukset huomioiden:

- selvittää tarvittava teoria ja laskentamallit
- selvittää tarkasteltavat materiaalit ja esineet laskennallisiksi lähtötiedoiksi
- selvittää näiden materiaalien ja esineiden tarvittavat ominaisuudet, kuten
 - emissiivisyys, lämpöarvo, massavirta ja muut tarvittavat ominaisuudet
 - niiden kyky vastaanottaa lämpösäteilyä merkittävästi vahingoittumatta tai syttymättä palamaan
- johtaa tällaisista palotapahtumista ympäristölle aiheuttaman uhkan suuruutta kuvaavaa tietoa ja tarkastelumalleja
- soveltaa edellä kuvattua tietoa todellista elämää peilaaviin CASE-esimerkkeihin

Lopputulokseksi tavoitellaan

- tavalliselle pelastustoimen onnettomuuksien ehkäisytyön viranhaltijalle sopivia yksinkertaisia laskentamalleja erilaisten palavien materiaalmäärien aiheuttamasta uhkasta suojattavalle kohteelle ja aineiden ominaisuustietoja laskentamallien aineistoksi.
- nopeasti käyttökelpoisia CASE-esimerkkejä, joihin verrata riittävän samanlaisia tapauksia

Työn rajaukseksi asetetaan tavanomaiseen asumiseen ja elämiseen sekä tavanomaiseen toiminnanharjoittamiseen liittyvät ilmiöt. Työssä ei oteta kantaa raskaaseen teollisuuteen tai raskaaseen varastointiin, tavalliselle arjelle vieraisiin vaarallisiin kemikaaleihin, ylikorkeisiin rakennuksiin, ylisuuriin pinta-aloihin tai muihin erikoistapauksiin.

Lämpöenergian siirtymismuodoksi rajataan lämmön siirtymisen säteilemällä. Kaikkien kolmen lämmön siirtymismuodon (säteileminen, johtuminen ja kuljettuminen) huomioon ottaminen teki työstä hyvin laajan. Lämpösäteilyn tiedetään olevan erityisesti ulkotilan tulipalossa hyvin merkittäviä lämmön siirtymismuoto.

Käytettävän paloteknisen laskennan suhteen rajauksena on tavanomainen matematiikka, jonka soveltaminen onnistuisi taulukkolaskentaohjelmien ja funktiolaskinten avulla ilman erityisohjelmistoja tai tavanomaisesta koti- ja toimistolaitteistosta poikkeavaa laskentatehoa.

Juridisen tarkastelun osalta pitäydytään kokemuseräisessä teleologiassa, mikä tarkoittaa säännösten tulkintaa niiden päämääristä käsin (palon leviämisen estäminen, sammuttamisen vaikeutuminen) ja kokemuseräisen tiedon käyttämistä lainmukaisen tai lainvastaisen tilanteen argumentoimiseksi.

1.3 Menetelmät

Tämä opinnäytetyö on ennen kaikkea toiminnallinen opinnäytetyö. Toiminnallinen opinnäytetyö tavoittelee ammatillisessa kentässä käytännön toiminnan ohjeistamista, opastamista, toiminnan järjestämistä ja järjeistämistä. Se voi olla esimerkiksi ammatilliseen käyttöön suunnattu ohje, ohjeistus tai opastus. Toiminnallisessa opinnäytetyössä yhdistyvät käytännön toteutus ja sen raportointi tutkimusviestinnän keinoin. Lähtökohdista on selvityksen tekeminen ja ihmistieteissä käytettävät tutkimusmenetelmät. (Vilkka ja Airaksinen 2004, 9–10.)

Toiminnallisessakin opinnäytetyössä tulee kyetä yhdistämään ammatillinen teoreettinen tieto ammatilliseen käytäntöön, pohtimaan alan teorioiden ja niistä nousevien käsitteiden avulla kriittisesti käytännön ratkaisuja ja kehittämään niiden avulla alan ammattikulttuuria (Vilkka ja Airaksinen, 2004, 41–42).

Näistä lähtökohdista valitaan työn menetelmät. Paloteknisen laskennan ollessa hyvin ”insinöörityydyttävä” ala löytyvät tarvittavat laskentamallit ja niiden taakse tarvittava tieto lähinnä alan oppikirjallisuudesta ja tutkimuksista. Käytännönläheisyyttä kohti päästään soveltamalla tätä tietoa oikeasti sattuneiden tapausten kaltaisiin esimerkkeihin. Tästä syystä CASE-esimerkkejä valittaessa tutkitaan pelastustoimen Pronto-tietokantatarkastelulla, minkälaisia esimerkkejä oikeasta elämästä on tarjolla. Alan ammattikulttuurin käytännönläheinen kehittäminen viimeistellään valituilla CASE-esimerkeillä ja työn tuotososuudella.

Kirjallisuuskatsaus muodostaa työn tietoteoreettisen pohjan. Tässä opinnäytetyössä tarkoitetaan kirjallisuuskatsauksella narratiivista tai kohdennettua katsausta, jossa katsaus toteutetaan kehittämistyön perustaksi (Vilkkä 2023, 130–131). Tässä tapauksessa katsauksen avulla valitaan sovellettavat palodynaamiset teoriat ja mallit, joita aiheen mukaisten palodynaamisten tapahtuminen laskennallisessa tarkastelussa voidaan soveltaa. Lisäksi kootaan tietoa arkielämässä vastaan tuleville materiaaleille ja esineille tyypillisiä paloteknisiä ominaisuuksia.

Tietokantatarkastelua ja aineistoanalyysiä pelastustoimen Pronto-tietokannasta käytetään tyypittämään oikeasti sattuneita sellaisia tulipaloja, joissa rakennuksen ulkopuolella syttynyt materiaali tai esine vaurioitti tai uhkasi vaurioittaa rakennusta. Tästä tyypittelystä johdetaan työssä käsitellyt CASE-tapaukset. Pronto-tietokannasta haetaan vuosien 2020–2024 sellaiset onnettomuusselosteet, joilla ensisijainen tai toissijainen onnettomuustyyppi rakennuspalo tai rakennuspalovaara ja syttymiskohta oli rakennuksen ulkopuolella. Soveltuvien CASE-tapausten valinta voidaan nähdä kvantitatiivisena aineiston kuvailuna tai sisällönanalyysin kaltaisena tyypittelynä ja narratiivisina tuloksina (jälkimmäisestä esim. Tuomi ja Sarajärvi 2018, 103; Vilkkä 2025, 194 ja 200–201).

CASE-tapausten kautta teoria sidotaan käytäntöön. Aineistoanalyysistä tyypitetyt ja valitut CASE-tapaukset käsitellään kirjallisuuskatsauksessa tunnistettujen laskentamallien ja laskentatietojen kautta. CASE-tapaukset toimivat esimerkkeinä laskentamallien ja lähtötietojen käyttämiselle ja toimivat nopeasti sovellettavina analogisina esimerkkeinä riittävän samankaltaisille tapauksille esimerkiksi turvallisuusviestinnässä tai nopeita ratkaisuja vaativilla pelastustehtävillä.

Työn toiminnallisena tuotoksena tuotetaan Excel-työkirja, jossa eri laskentataulukot käyttävät tässä työssä esitettyjä laskentamalleja käyttäjän valitsemien laskentatiedoin. Oleelliset lähtötietotaulukot on koottu työkirjaan samanlaisina kuin ne ovat tämän työn liitteessä 1.

2 Oikeudellinen viitekehys ja hyvä hallinto

Kuten aiemmin on todettu, pelastuslain (379/2011) 9 § on kirjoitettu niin sanotusti avoimeen muotoon. Se ei anna tarkkoja säännöksiä esimerkiksi siitä, minkälaisen tavaran säilyttäminen, missä määrin ja millä etäisyydellä rakennuksesta on katsottava säännöksen tarkoittamalla tavalla lainvastaiseksi. Säännös ei myöskään sisällä asetuksenantovaltuutta. Ainakaan nyky-muodossaan säännöstä ei siis ole tarkennettu, eikä olla tarkentamassakaan valtioneuvoston tai ministeriön asetuksella, mikä yleisesti ottaen on avoimeen muotoon kirjoitetuille lain säännöksille tavallista.

Tällaiset avoimet säännökset jättävät viranomaiselle harkintavaltaa. Niemivuo ym. (2010, 120–121) viittaavat tunnettuihin oikeustieteilijöihin Veli Merikoskeen, Timo Konstariin ja Kaarle Makkoseen todetessaan, että nykyään hallintolain (434/2003) 6 §:ssä säännellyt hallinnon oikeusperiaatteet ovat jopa paljon vanhempia oikeusperiaatteita kuin nykyinen hallintolaki ja perustuslain (731/1999) 2.3 ja 6 §, josta ne nykyään johdetaan. Perustuslain 2.3 § säätelee niin sanottua hallinnon lainalaisuusvaatimusta ja 6 § yhdenvertaisuutta. Edellä viitatus Merikosken (1958, 1–2) mukaan

”Ajatuksena on se, että hallintoviranomaisten toiminta on tarkoitettu pääosin järjestettäväksi niin, että laki tai muu velvoittava ohje riittää osoittamaan sen, miten viranomaisen on tietyt tunnusmerkit täyttävässä yksittäistapauksessa meneteltävä, minkä päämäärien toteuttamiseksi, mitä sen on päätettävä ja tehtävä ja miten asia on ratkaistava.”

Merikoski jatkaa kuitenkin seuraavasti

”Elämän alituinen muuttuvuus ja vivahdusrikkaus ja niistä johtuva loputon erilaisten tilanteiden ja tapausten määrä sekä lainsäädännön jatkuva yksityiskohtaistuminen ja sääntelyalan laajentuminen pakottaa jättämään viranomaiselle vapaata harkintavaltaa.”

Sidotussa harkinnassa lainsäädäntö pyrkii suoraan ilmaisemaan tehtävän ratkaisun sisällön. Harkinnanvaraa jää kuitenkin muun muassa lainsäädännön tulkinnanvaraisuuden vuoksi. Vapaassa harkinnassa sen sijaan viranomaisen on tiettyjen rajojen sisällä vapaa harkitsemaan sopivan ratkaisun. Täysin vapaata harkintaa ei tällöinkään ole, sillä sitä ohjaavat erityisesti hallintolain 6 §:n sääntelemät hallinnon oikeusperiaatteet ja perus- ja ihmisoikeudet. (Husa ja Pohjolainen, 2014, 231.)

Viranomaisen harkinnan sitominen täysin lainsäätäjän tahdonilmaisulla on se tarkoitus, että viranomaisen ei itse tekisi poliittisia ja moraalisia valintoja lainsäätäjän asemasta. Harkintavalta kuitenkin tarjoaa joustavuutta ja sopeutuvuutta ja mahdollisuuksia saavuttaa tavoiteltuja päämääriä ja sovittelua intressejä. Lisäksi se nopeuttaa hallintoviranomaisen reagointia

olosuhteiden muutoksiin ja helpottaa kannanottamista vaikeisiin kysymyksiin vajailla tiedoilla. Pohdittavaksi jäävät vain harkintavallan rajat. (Länsineva 1998, 263–265.)

Lain esitöiden mukaan hallintolain 6 §:n oikeusperiaatteilla tarkoitetaan muun ohella sitä, että ratkaisutoiminnan tulisi olla johdonmukaista siten, että harkinnan kohteena olevia tosiseikkoja arvioidaan samankaltaisissa tapauksissa samoin perustein. Säännönmukaisesta käytännöstä poikkeamisen olisi perustuttava tapauksen erityislaatuun (tasapuolisuusperiaate). Suhteellisuusperiaatteella puolestaan on tärkeä merkitys erityisesti sellaisissa tapauksissa, joissa viranomaisen joutuu harkitsemaan hallinnon asiakkaan kannalta epäedullisia oikeudellisia seuraamuksia. Tällaisia esiintyy usein erityyppisessä valvontatoiminnassa. Suhteellisuusperiaatteen mukaisesti toimen on myös oltava tarpeellinen ja välttämätön asetetun tavoitteen saavuttamiseksi. (HE 72/2002 vp, 59–60.)

Pelastusviranomaisella on siis laaja harkintavalta esimerkiksi sen suhteen, minkälainen tavaran säilyttäminen rakennuksen välittömässä läheisyydessä on sillä tavoin tulipalon syttymisen tai leviämisen kannalta vaarallista tai pelastustoimintaa vaarantavaa, että se tulee katsoa pelastuslain 9 §:n vastaiseksi. Pelastusviranomaisen on kuitenkin kyettävä perustelemaan ratkaisunsa niin, että se on oikeassa suhteessa sillä tavoiteltuihin päämääriin. Lisäksi riittävän samankaltaiset tapaukset tulisi ratkaista samalla tavalla niin yksittäisen pelastuslaitoksen viranhaltijoiden välillä kuin kaikkien Suomen pelastuslaitosten kesken.

Edellä on siis selvitetty ensiksi, että pelastuslain 9 §:n soveltamista parantavaa, tarkentavaa ja yhdenmukaistavaa säännöstöä ei ole olemassa. Toiseksi on esitetty, että sen soveltamisratkaisujen tarkastelunkestävälle argumentoinnille on sekä tosiasiallinen että oikeudellinen tarve. Seuraavaksi tarkastellaan opinnäytetyön vastausta tähän ongelmaan.

3 Lämpösäteilytehon laskeminen

3.1 Lämpöenergian siirtymisen perusteet

Lämpöenergia siirtyy kappaleesta tai aineesta toiseen kolmella tavalla: johtumalla (*conduction*), kuljettumalla (*convection*) ja säteilemällä (*radiation*). Johtuminen tapahtuu aineen (kaasun, nesteen tai kiinteän aineen) sisällä tai kahden aineen rajapinnassa suoraan molekyylien lämpöliikkeen välittyessä viereisiin molekyyliin tai esimerkiksi eräiden puhtaiden kiinteiden metallien tapauksessa vapaiden elektronien välityksellä. Kuljettuminen tapahtuu siten, että lämpöenergia siirtyy aineen pinnasta sen vieressä olevaan virtaavaan aineeseen (*fluid*).

Yleensä tämä virtaava aine on neste tai kaasu, mutta eräissä tapauksissa kiinteätkin aineet voivat kuljettaa lämpöenergiaa. (Welty ym. 2001, 201–208; Mills 2014, 7–12.)

Säteileminen poikkeaa näistä kahdesta sikäli, että lämpöenergian siirtyminen pois lämpimästä aineesta ei vaadi mitään välittäjää. Itse asiassa lämpösäteilyn siirtyminen on tehokkainta tyhjiössä. Mikä tahansa väliaine, ilma mukaan lukien, haittaa energian siirtymistä säteilemällä pinnalta toiselle. Lisäksi johtumalla ja kuljettumalla siirtyvän energian määrä on riippuvainen käytännössä vain lämpötilaeroista, kun taas säteilemällä siirtyvän energian määrälle on ominaista se, että myös absoluuttisen lämpötilan tason lisääntyminen voimistaa lämpösäteilyä, vaikka lämpötilaero pysyisi samana. Lämpösäteilyllä on tutumman näkyvän valon tavoin aaltoliikkeen ja hiukkasten liikkeen ominaisuuksia, ja se kulkee valonnopeutta. (Welty ym. 2001, 379.)

Kansanomaisesti lämpösäteilyä pidetään vain näkyvän valon aallonpituuden yläpuolella olevaa infrapunasäteilyä. Lämpösäteilyn aallonpituus on kuitenkin Welyn (2001, 380) mukaan alueella 0,1–100 μm , eli reilusti alle ja yli näkyvän valon aallonpituusalueen ulottuen osin näkyvän valon aallonpituutta alemmaksi ultravioletin alueelle ja sieltä läpi koko näkyvän valon aallonpituusalueen 0,38–0,076 μm ja sen yli infrapuna-alueelle.

Kaikki aine lähettää (emittoi) jatkuvasti lämpösäteilyä. Osuessaan vastaanottavaan pintaan osa lämpösäteilyä heijastuu (*reflection*). Kyseessä on hajoava (*diffuse*) heijastuminen, mikä tarkoittaa sitä, että suurin osa materiaaleista heijastaa lämpösäteilyä kaikkiin suuntiin riippumatta säteilyn tulokulmasta. Osa lämpösäteilyä imeytyy tai absorboituu (*absorption*) aineeseen nostaan sen lämpötilaa. Teoriassa lämpösäteily voi myös kulkea aineen läpi samaan tapaan, kuin näkyvä valo läpäisee lasin, mutta suurelle osalle lämpösäteilyä suurin osa kiinteistä aineista on ”läpinäkymätöntä” (*opaque*), minkä voi havaita esimerkiksi lämpökameran kyvyttömyytenä nähdä lasin läpi. Ideaalinen musta pinta absorboi kaiken lämpösäteilyn eikä heijasta lainkaan siihen tulevaa lämpösäteilyä, kun taas ideaalinen valkoinen pinta heijastaa kaiken siihen kohdistuvan lämpösäteilyn. Todellisuudessa kaikki aineet ovat ”harmaita”, eli niillä on

emissiivisyys-/absorptiokerroin, josta tarkemmin alaluvussaluvussa 3.2. (Welty 2001, 380–381; Mills 2014, 452.)

Lämpösäteilyn emittoituminen pinnalta on periaatteessa suuntariippuvaista. Tehokkainta se on kohtisuoraan pois päin pinnasta (0 astetta tai radiaania) ja heikointa kulman kasvaessa siitä (esim. Welty 2001, 389; Mills 2014, 495498), mutta kuten SFPE (2016, 107–108) sen esittää, käytännön insinöörisovelluksissa tämä voidaan yleensä jättää huomiotta.

Verrattain alhaisissa pintalämpötiloissa (< ~150–200 °C) kuljettuminen on merkittävässä roolissa, jos säteilevä pinta on fluidin (yleensä ilman) ympäröimä. Lämpötilan noustessa karkeasti yli 400 °C säteilyn merkitys alkaa korostua. Noin 550 °C paikkeilla säteily aiheuttaa himmeän punaisen hehkun, jonka muuttuminen lämpötilan noustessa antaa viitteitä pinnan lämpötilasta taulukon 1 mukaisesti. (Drysdale 2011, 59; SFPE 2016, 53.) On kuitenkin huomattava, että edellä sanottu pätee lähinnä kuumiin pintoihin. Tulipalossa kuljettuminen säilyttää merkittävän roolinsa siksi, että tulipalo vapauttaa suuren joukon kuumia kaasuja, jotka kuljettavat lämpöenergiaa pois palosta. Kuten myöhemmin todetaan, avoimen tilan tulipalossa säteilemällä siirtyvä osuus on verrattain pieni osa tulipalon kokonaispalotehosta.

Tämän työn rajauksen vuoksi tarkastellaan kuitenkin lähemmin vain säteilemistä, vaikka erityisesti myös kuljettumisen tarkasteleminen onkin tarpeen tulipalon aiheuttaman kokonaisriskin arvioimiseksi.

Taulukko 1: Pinnan lämpötilan ilmeneminen näkyvän valon aallonpituudella (Drysdale 2011, 59)

Lämpötila (°C)	Ilmiö
550	Ensimmäinen näkyvä punainen hehku
700	Himmeä punainen
900	Kirsikanpunainen
1100	Oranssi
1400	Valkoinen

3.2 Lämpösäteilytehon lämpötilaperusteinen laskeminen

Yksinkertaisin fysikaalinen perusmalli lämpösäteilytehon laskemiselle on niin sanottu mustan tai harmaan kappaleen pinnan lähettämä lämpösäteily, joka on eksponentiaalisesti riippuvainen säteilevän pinnan lämpötilasta. Esimerkiksi Drysdale (2011, 60–62), Wickström (2016, 6) ja Raikko ym. (2002, 102) esittelevät saman yhtälön, jota kutsutaan tässä työssä Stefan-Boltzmannin kaavaksi siinä olevan tutkijoiden Stefan ja Boltzmann mukaan nimetyn vakion mukaisesti. Säteilevän pinnan pinta-alaan sidottu lämpösäteilyteho lasketaan kaavalla

$$\dot{Q} = \sigma T^4$$

jossa

- \dot{Q} on pinnan pinta-alaan sidottu lämpösäteilyteho (kW/m²)
- σ (*sigma*) on Stefan-Boltzmann-vakio $5,67 \cdot 10^{-11}$ kW/m²K⁴
- T on pinnan absoluuttinen lämpötila, eli lämpötila Kelvin-asteikolla

Tämä kaava on niin sanottu mustan pinnan säteilyteho. Musta pinta on fysikaalinen teoreettinen pinta, jonka emissiivisyys on yksi. Tämä tarkoittaa sitä, että musta pinta lähettää (emittoi) kaiken edellä mainitulla kaavalla lasketun lämpösäteilytehon ulkopuolelleen. Kuten edellä on todettu, todellisuudessa mikään oikeasti olemassa oleva pinta ei ole emissiivisyydeltään täydellinen yksi (tai täysin nolla), vaan (nollaa suurempi) ja alle yksi. Tästä syystä todellisen, ”harmaan”, pinnan lähettämää lämpösäteilytehoa korjataan emissiivisyyden mukaan kertoimella ϵ (*epsilon*). Tämän työn laajuudessa ei syvennyttä emissiivisyyskertoimen määrittämiseen. Sen sijaan tässä työssä ja käytännön paloteknisessä laskennassa käytetään eri lähteistä saatavia taulukoituja arvoja. Eri materiaalien emissiivisyysarvoja on koottu liitteeseen 1 liitetaulukoon 1. Harmaaksi pinnaksi korjattuna kaava on siis muotoa

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma T^4$$

Tavanomaisella matemaattisella osaamisella on helppo todeta kaavan eri tekijöiden vaikutuksen suuruus lopputulokseen. Stefan-Boltzmann-vakio pysyy aina samana. Emissiivisyys nol-lan ja yhden välillä vaihtelevana kertoimena tuottaa eri materiaalien välille hyvin merkittävän eron. Kuitenkin, vaikka emissiivisyydellä on taipumus muuttua lämpötilan kohotessa, on ero ainakin 1000 K asti sellainen, että ainekohtaisen lopputuloksen suuruusluokka ei kovin oleellisesti muutu.

Lämpötila puolestaan korotetaan neljanteen potenssiin. Esimerkiksi lämpötilan kaksinkertais-tuminen nostaa lämpösäteilytehon 16-kertaiseksi ja nelinkertaistuminen 256-kertaiseksi. Tämä

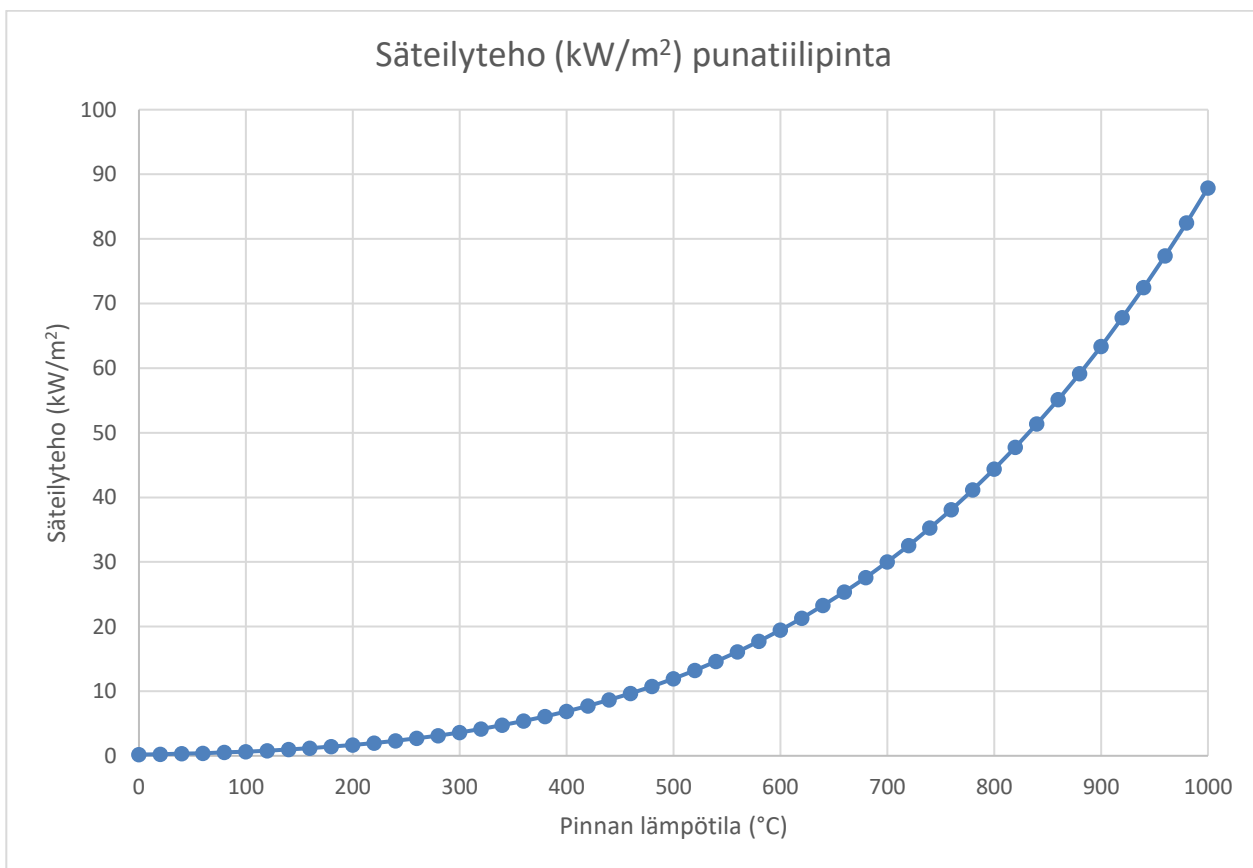
voidaankin pitää lämpösäteilytehon riskinarvioinnin yhtenä keskeisenä ”nyrkkisääntömäisenä” totuutena. Pinnan lämpötilan kasvaminen kasvattaa sen lähettämää lämpösäteilytehoa jyrkässä eksponentiaalisessa suhteessa. Lämpötilan vähäininkin alentaminen pienentää riskiä merkittävästi.

Esimerkin vuoksi lasketaan 600 °C (873,15 K) lämpötilaan kuumennetun punatiilipinnan lähettämä lämpösäteilyteho. Otaksutaan pinnan emissiivisyydeksi liitetaulukon 1 mukaisesti 0,59.

$$\epsilon \sigma T^4 = 0,59 \cdot 5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4 \cdot 873,15^4 \text{ K} \approx \mathbf{19,44 \text{ kW/m}^2}$$

On huomattava, että jos lämpötila nostetaan 800 °C:een, nousee lämpösäteilyteho arvoon ~44,37 kW/m², siis yli kaksinkertaiseksi.

Kuvaaja 1 havainnollistaa edellisen esimerkin mukaisen punatiilipinnan lähettämän lämpösäteilytehon eksponentiaalista muutosta pinnan lämpötilan funktiona.



Kuvaaja 1: Lämpösäteilytehon lämpötilasta riippuvainen eksponentiaalinen luonne

Wickström (2016, 46) kääntää kaavan myös toiseen suuntaan. Jos tiettyyn pintaan kohdistuu tietty suuruinen lämpösäteilyteho, voidaan pinnan saavuttama lämpötila T (°K) laskea kaavalla

$$T = \left(\frac{\dot{q}}{\varepsilon \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

missä \dot{q} (kW/m²) tarkoittaa esimerkiksi sitä vastaan ottavaan pintaan kohdistuvaa osaa säteilylähteen kokonaissäteilytehosta \dot{Q} . Tähän kohdistuvan lämpösäteilyn intensiteettiin vaikuttavat lähettävän ja vastaanottavan pinnan geometrinen asema ja etäisyys toisiinsa nähden. Asiaa tarkastellaan jäljempänä.

Edellistä esimerkkiä mukailien lasketaan tietyllä etäisyydellä säteilijästä olevan graniittipinnan ($\varepsilon = 0,44$) saavuttama lämpötila, kun siihen kohdistuu pintojen välisen etäisyyden vuoksi arvoon 10,00 kW/m² laskenut lämpösäteilyintensiteetti.

$$(\dot{q} / (\varepsilon \sigma))^{1/4} = (10,00 \text{ kW/m}^2 / (0,44 \cdot 5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4))^{1/4} \approx \mathbf{795,68 \text{ }^\circ\text{K} = 522,53 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Tämä lämpötilan nousu on todennäköisesti lähinnä teoreettinen maksimi muun ohella sen vuoksi, että lämpöenergia johtuu aineessa edelleen pintaa syvemmälle ja leviää mahdollisesti laajemmalle vähemmän lämpörasitusta vastaanottavalle alueelle. Tämä hidastanee pintalämpötilan nousemista ja pinnan reagointia lämpösäteilyyn. Käytännönläheisessä paloteknisessä riskienarvioinnissa katson sen kuitenkin voivan edustaa ”pahinta skenaariota”, jonka mukaan riskiä tulee tarkastella.

3.3 Lämpösäteilytehon massavirtaperusteinen laskeminen

Babrauskas esittää SFPE:n käsikirjassa oleellisimman tulipalon määrällisen kuvaajan termillä *heat release rate* (SFPE 2016, 799). Sanakirjat suomentavat sen lämmönvapautumisnopeudeksi, lämmönluovutusnopeudeksi tai palotehoksi, joista viimeistä käytän tästä eteenpäin. Paloteho on edellisessä alaluvussa käsitellyn säteilevän pinnan lämpötilan ohella toinen tässä työssä käsiteltävä keskeinen tapa selvittää palavan kohteen lähettämän lämpösäteilyn kokonaistehoa. Babrauskasin mukaan (SFPE 2016, 799) palotehon laskeminen on teoriassa mahdollista yksinkertaisesti kertomalla aineen lämpöarvo (aineen sen palamisen myötä tapahtuva energianvapautuminen Δh_c , yleensä kJ/g tai MJ/kg) aineen massavirralla (MLR eli *mass loss rate*, kg·s), eli sillä nopeudella, jolla aineen massa sen palaessa vähenee. Näin kaava saa muodon

$$HRR = \Delta H_c MLR$$

Babrauskas (SFPE 2016, 799) toteaa, että kaava ei kuitenkaan ole tarkka, sillä testit ovat osoittaneet, että massavirta ei (ainakaan kiinteillä aineilla) ole vakio läpi palotehon, minkä vuoksi käytännössä paloteho erilaisille materiaalierille ja esineille usein mitataan suoraan koekellisesti.

Muun muassa Drysdale (2011, 13) esittää saman laskentamallin jalostettuna muotoon

$$\dot{Q} = \dot{m} X A_f \Delta H_c$$

jossa

- X (*khii*) on palamistehokkuuskerroin (käsitellään alempana)
- \dot{m} on palavan aineen massavirta pinta-alayksikköä kohden
- A_f on palavan materiaalin pinta-ala
- Δh_c (*delta-h_c*) on lämpöarvo, kuten Babrauskasin lämpöarvo edellä

Eri laisten kaikissa faaseissa olevien aineiden lämpöarvoja on kirjallisuudessa taulukoitu runsaasti. Eri lähteistä saatavilla olevia aineiden lämpöarvoja on esitetty liitteessä 1 liitetaulukossa 2.

Palamistehokkuuskerroin X on merkittävä tekijä yhtälössä. Palamistehokkuuskerroin ottaa huomioon ensinnä sen, että lähes minkään aineen palaminen ei ole täydellistä, toisin sanoen kaikki aine ei muutu häviöttömästi lämpöenergiaksi. Lisäksi aineen palaessa lämpöenergiaa siirtyy siitä ympäristöön kolmella tavalla, *johtumalla* (*conduction*), *kuljettumalla* (*convection*) ja *säteilemällä* (*radiation*). Yleisesti ottaen johtuminen näyttelee hyvin pientä osaa. Kuljettumalla ja säteilemällä siirtyvän lämmön osuudet riippuvat polttoaineen palamisominaisuuksista. Hyvin näkyvällä liekillä palavat polttoaineet säteilevät merkittävästi, koska liekin näkyvä osuus koostuu hehkuvista nokipartikkeleista (esimerkiksi useat tavalliset hiilivetytypohjaiset nesteet). Näkyvämmällä liekillä palavilla (esimerkiksi useat alkoholit) tai voimakkaasti savua tuottavilla polttoaineilla (useat kiinteät aineet) lämpöenergian siirtyminen painottuu enemmän kuljettumiseen. Yleisesti ottaen voidaan kirjoittaa

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}$$

ja edelleen

$$X_{tot} = X_{cond} + X_{conv} + X_{rad}$$

millä tarkoitetaan sitä, että palotapahtumassa aineesta siirtyvä kokonaisenergiämäärä (kokonaispaloteho) on näiden kolmen siirtymistavan summa, mitä vastaa eri siirtymistapojen tehokkuuskertoimien summa (yhteensä yksi). Tehokkuuskerroin ei myöskään ole vakio tietylle polttoaineelle. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että palavan alueen koon kasvaessa säteilytehon osuus pienenee kuljettumisen osuuden kasvaessa. (Quintiere 2017, 89–91; Drysdale 2011, 13 ja 183.)

Tässä työssä jatkossa tehokkuuskertoimella X tarkoitetaan kerrointa, jolla kokonaispalotehosta erotetaan säteilemällä siirtyvä osuus (yllä X_{rad}). Liitteessä 1 liitetaulukossa 3 on suuntaa antavia X :n (X_{rad}) arvoja eri polttoaineille.

Lämpösäteilytehon massavirtaperusteinen laskeminen alkaa siis palamisen massavirran selvittämisellä. Syttymislähteen (tai vain kuumenemisen) seurauksena syttyneen palavan nesteen tai kiinteän aineen palaminen on eräänlainen takaisinkytkentäreaktio, jossa palamisen aloittanut aine tuottaa tietyn palotehon omaavan liekehtivän palamisen. Tästä palotehosta osa vaaditaan takaisin aineeseen itseensä, jotta lisää ainetta lämpenee höyrystymis-/kaasuuntumislämpötilaan ja läpäisee faasimuunnoksen tai pyrolyysin, joka tuottaa lisää palokelpoisia höyryjä/kaasuja. Tässä mekanismissa tekijöinä ovat muun ohella palavan aineen palofysikaaliset ja -kemialliset ominaisuudet, palavan aine-erän pinta-ala ja orientaatio. Näiden huomioimiseksi laskentamalleissa käytetään usein erilaisia kokeellisesti todettuja muuttujia. (esim. Drysdale 2011, 182–192 ja 199–209; Quintiere 2017, 167–179.)

Tämän opinnäytetyön käytännöllisyyden vuoksi pysymme laskentamalleissa, joiden laskenta-perusteiksi tarvitaan helposti saatavilla olevia taulukkoarvoja. Erityisesti palavien nesteiden allaspaloille sopii Drysdalen (2011, 186) ja SFPE:n (2016, 863–865) esittämä Zabetakis-Burgess-malli, jossa aineen massavirran laskemiseksi tietyssä palotilanteessa otetaan palavan aineen teoreettinen maksimimassavirta (\dot{m}''_{∞}), jota manipuloidaan edellä olevia muuttujia huomioivalla kertoimella $1 - e^{-\kappa\beta D}$, jossa ainekohtainen vakio $\kappa\beta$ huomioi takaisinkytkentään vaadittavia muuttujia, liekin kokoa ja vastaavia tekijöitä. Koko kaava on muotoa

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-\kappa\beta D})$$

jossa

- \dot{m}'' on toteutuva massavirta ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
- \dot{m}''_{∞} on teoreettinen maksimimassavirta ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, taulukkoarvo)
- e on luonnollisen logaritmin kantaluku, eli Neperin luku ($\sim 2,71828$)
- $\kappa\beta$ (*kappa-beta*) on taulukkoarvo
- D on paloalueen halkaisija (m)

Taulukkoarvoja \dot{m}''_{∞} ja $\kappa\beta$ on saatavissa runsaasti kirjallisuudesta, ja niitä on koottu liitteeseen 1 liitetaulukkoon 4.

Erityisesti kiinteillä aineilla voimme soveltaa Drysdalen (2011, 12–13 ja 199–201) esittelemää tapaa, joka itse asiassa on periaatteessa soveltuva sekä nesteille että kiinteille aineille. Tässä

esitettyä tapaa voi siis käyttää vaihtoehtoisena tapana myös nestemäisten aineiden palamisen palotehon laskennassa ylempänä esitetylle Zabetakis-Burgess-mallille. Tässä mallissa laskennan perustana käytetään taulukkoarvoina annettuja Tewardsonin ja Pionin ”syttyvyysparametreja” (flammability parameters) (Drysdale 2011, 200), joita käytetään laskenta-arvoina kaavalle

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}''_F - \dot{Q}''_L}{L_v}$$

jossa

- \dot{m}'' on aineen toteutuva massavirta ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
- \dot{Q}''_F on palamisliekkien aineeseen kohdistama paloteho (kW/m^2 , taulukkoarvo)
- \dot{Q}''_L on tehohäviö, jonka palava aine menettää säteilemällä (kW/m^2 , taulukkoarvo)
- L_v on palavan aineen kuumentamiseen ja faasimuunnokseen/pyrolyysiin tarvittava energiamäärä (kJ/g , taulukkoarvo) ("Heat of gassification" (Quintiere 2017, 168), "heat required to produce volatiles" (Drysdale 2011, 13))

Taulukkoarvoja \dot{Q}''_F , \dot{Q}''_L ja L_v on saatavissa kirjallisuudesta, ja niitä on koottu liitteeseen 1 liitetaulukkoon 5.

Koska meillä nyt on kaikki tarvittava tieto palotehon laskemiseksi massavirtaperusteisesti, havainnollistetaan asiaa esimerkkien kautta.

Esimerkki 1:

Lasketaan halkaisijaltaan (D) 2 m heptaanialtaan palon paloteho. Heptaanin teoreettinen maksimimassavirta (\dot{m}''_∞) on $0,101 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$. $\kappa\beta$ -vakio on 1,1. Heptaanin lämpöarvo (ΔH_c) on $44,4 \text{ MJ}/\text{kg}$. Vain säteilyn huomioon ottavaksi palamistehokkuudeksi (X) valitaan 0,316.

Lasketaan ensin heptaanin toteutuva massavirta

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_\infty (1 - e^{-\kappa\beta D}) = 0,101 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (1 - e^{-1,1 \cdot 2}) \approx 0,0898 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$$

Lasketaan heptaanialtaan pinta-ala halkaisijan perusteella.

$$A_f = \pi (D/2)^2 = \pi \cdot (2 \text{ m} / 2)^2 \approx 3,14 \text{ m}^2$$

Lasketaan palotehon säteilevä osuus.

$$\dot{m}'' \times A_f \Delta H_c = 0,0898 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,316 \cdot 3,14 \text{ m}^2 \cdot 44,4 \text{ MJ}/\text{kg} \approx \mathbf{3,96 \text{ MW}}$$

Esimerkki 2:

Lasketaan polyuretaanivaahtopatjan paloteho. Patjan leveys on 0,8 m ja pituus 2,0 m. Patjan oletetaan makaavan maassa tavanomaisessa asennossa ja palavan vain päältä. Palamisliekkien aineeseen kohdistama paloteho \dot{Q}''_F on 51,2 kW/m² ja palamisen ylläpitoon tarvittava energiamäärä on L_v 1,22 kJ/g. Tehonmenetys pinnan säteilyn kautta \dot{Q}''_L on 24,3 kW/m². Lämpöarvo on 23,9 MJ/kg eli 23,9 kJ/g. Otaksutaan vain säteilytehon huomioon ottavaksi palamistehokkuudeksi synteettisille polymeereille karkeasti keskimääräinen 0,3.

Lasketaan ensin polyuretaanivaahtopalon massavirta.

$$\dot{m}'' = (\dot{Q}''_F - \dot{Q}''_L) / L_v = (51,2 \text{ kW/m}^2 - 24,3 \text{ kW/m}^2) / 1,22 \text{ kJ/g} \approx 22 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$$

Lasketaan patjan pinta-ala.

$$A_f = 0,8 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ m} = 1,6 \text{ m}^2$$

Lasketaan palamisen säteilyteho.

$$\dot{m}'' \times A_f \Delta H_c = 22 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 0,3 \cdot 1,6 \text{ m}^2 \cdot 23,9 \text{ kJ/g} \approx \mathbf{252 \text{ kW}}$$

Merkille pantavaa on se, että jos Tewarson-Pion-mallissa $\dot{Q}''_F < \dot{Q}''_L$, muuttuu massavirran arvo negatiiviseksi. Näin on esimerkiksi polykarbonaatin kohdalla (51,9 < 74,1). Polykarbonaatti onkin useiden julkisten lähteiden mukaan ns. itsestään sammuva, eli sen oma paloteho olosuhteissa, joissa ristiinsäteilyä ympärillä olevista kuumista kohteista ei tapahdu, ei riitä palon ylläpitämiseen. Aineita, jotka siis ainakaan avoimeen tilaan suuntautuvina pintoina eivät itse kykene ylläpitämään palamista, voidaan tunnistaa tästä ominaisuudesta. Aiheeseen palataan seuraavaksi puun palamisen yhteydessä.

3.4 Puun palaminen erikoistapauksena

Esimerkiksi Drysdale erottaa puun palamisen omaksi erikoistapaukseksi erilleen edellisessä luvussa käsitellyistä lähinnä synteettisiä polymeerejä olevista kiinteistä aineista. Drysdalen mukaan puu on hyvin epähomogeeninen aine, jolla on isotrooppinen luonne. Jälkimmäinen tarkoittaa sitä, että monet puun ominaisuudet riippuvat siitä, mihin suuntaan puuaineksen rakenteeseen nähden mittaus tehdään. Puu materiaalina ja aineena on monimutkainen yhdistelmä luonnollisia polymeerejä, joista tärkeimmät ovat selluloosa (~50 %), hemiselluloosa (~25 %) ja ligniini (~25 %), joskin mainitut prosenttiosuudet vaihtelevat merkittävästi puulajeittain. (Drysdale 2011, 199 ja 209–210.)

Puuaines alkaa vapauttaa palavia kaasumaisia yhdisteitä jo karkeasti 200–260 °C lämpötilassa, jolloin hemiselluloosa alkaa pyrolysoitua. Lämpötilan kohotessa pyrolysoituvat selluloosa (240–350 °C) ja ligniini (280–500 °C). Puu sitoo itseensä kosteutta osin sitoutuneena puun rakenteen muodostavien luonnollisten polymeerien hydroksyyliiryhmiin (-OH). Jos ympäristön vallitseva ilmankosteus on suuri, sitoutuu vettä myös puun rakenteen tyhjiin tiloihin kapillaarisesti. (Drysdale 2011, 219–211.) Tällä puun kosteudella onkin merkittävä vaikutus puun palokäyttäytymiseen, kuten alempana tulee ilmi.

Puun palokäyttäytymiseen vaikuttaa voimakkaasti myös sen hiiltyminen. Hiiltyminen muodostaa suojaavan kerroksen vielä pyrolysoitumattomalle koskemattomalle (*virgin*) puulle. Hiilittymistä vaikuttaa tapahtuvan enemmän, jos lämpöaltistuminen on vähäisempää. Hiilittymistäipumusta voidaan lisätä erilaisilla aineilla, lähinnä fosfaateilla ja boraateilla, mutta myös eräillä suoloilla, jolloin puulle saadaan parempia palonsuojausominaisuuksia lisääntyvän hiilittymisen suojatessa koskemattomaa puuta lämpöaltistumiselta. Matemaattisesti edellisen alaluvun teoriaan viitaten tämä vähentää liekeistä hiilittymän alla olevaan koskemattomaan pintaan säteilevää osuutta \dot{Q}''_F . (Drysdale 2011, 211–213.)

Puun monimutkaisuus tekee siitä hankalan käsitellä edellisessä alaluvussa käytetyn liekkien säteilytehoa, tehohäviötä ja faasimuunnos-/pyrolyysienergiaa käyttävän yhtälön keinoin. Tähän vaikuttaa muun ohella se, että puu käyttäytyy erilaisesti sen mukaan, toteutuvatko erilaiset reaktiot puun syiden suuntaisesti vai niitä vastaan. Lisäksi jo edellä käsitelty hiiltyminen vaikuttaa asiaan. Edelleen eri puulajeilla on merkittävästi erilaiset palo-ominaisuudet. Erilaisen muuttujien, kuten faasimuunnos-/pyrolyysienergian muuttuminen hiilittymissyvyyden muuttuessa, vaikuttaa myös palamisreaktioon. (Drysdale 2011, 217.)

Partiolaiset tuntevat sanonnan ”yksinäinen puu ei pala”. Tällä viitataan eränkävijöiden tuntemaan mekanismiin sammuttaa nuotio verrattain nopeasti tilanteessa, jossa saatavilla ei ole vettä. Palavat halot erotellaan sopivan etäisyyden päähän toisistaan. Lopputuloksena yksittäisten halkojen liekehtivä palaminen loppuu verrattain nopeasti ja kytevä palaminenkin hiipuu verrattain pian. Drysdale selittää tämän Tewarsonin ja Pionin havaintojen kautta, joiden mukaan esimerkiksi heidän tutkimansa douglaskuusen liekkien palavaan pintaan kohdistama lämpösäteilyteho on hyvin samansuuruinen, kuin tehohäviö pois päin lämpösäteilyn kautta, eli $\dot{Q}''_F \approx \dot{Q}''_L$ tai jopa $\dot{Q}''_F < \dot{Q}''_L$. (Drysdale 2011, 218.) Tämä jättää edellisen alaluvun yhtälön yläosan nolaksi tai jopa negatiiviseksi, jolloin palon massavirta on nolla tai negatiivinen, eikä palaminen jatku. Puun (ja vastaavien aineiden) palaminen vaatii siis ulkopuolista ”lisäsäteilytehoa”, joka voi tapahtua esimerkiksi useiden puupintojen välisenä ristiinsäteilynä (*cross-radiation*) (Drysdale 2011, 2019).

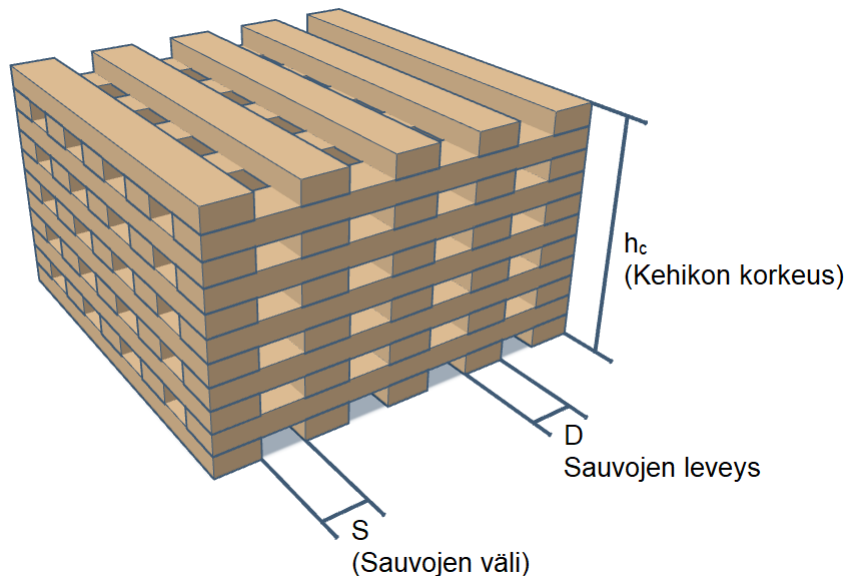
3.4.1 Puukehikko

Varsinaiseen puun palamisen massavirran mallintamiseen lähdemme puukehikon mallista. Puukehikko tarjoaa riittävän puupintojen välisen ristiinsäteilyvaikutuksen (Drysdale 2011, 220). Tämä voidaan useita edellisiä lähteitä yhdistellen matemaattisesti esittää lisäämällä edellisen alaluvun yhtälöön tekijä \dot{Q}''_E , joka tarkoittaa tarkastelussa olevan palavan puupinnan palota-
pahtuman ulkopuolelta tulevaa lämpösäteilytehoa. Alaluvun 3.3 yhtälö saa nyt muodon

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}''_F + \dot{Q}''_E - \dot{Q}''_L}{L_v}$$

jolloin, vaikka $\dot{Q}''_F \approx \dot{Q}''_L$ tai jopa $\dot{Q}''_F < \dot{Q}''_L$, yhtälön osoittaja pysyy riittävän suuren \dot{Q}''_E :n ansiosta positiivisena, massavirta muodostuu positiiviseksi ja palo jatkuu. Tämän riittävän suuren ulkopuolisen lämpösäteilytehon puupinnat tarjoavat toisilleen kunkin itsensä ulkopuolelle häviävien lämpösäteilytehojen \dot{Q}''_L muodossa.

Puukehikon massavirran käytännönläheiseksi laskentavaksi kelpaa seuraava laskentamalli (SFPE 2016, 828–830). Mallin lähtökohtana on se, että puukehikko (tai eräiden muiden materiaalien kehikko) koostuu kolmiulotteisesta rakennelmasta, jossa sauvat (*sticks*) on järjestetty päällekkäin suunnaltaan vuorotteleviin riveihin ilmaraoilla (kuvio 1). Lisäksi oletetaan, että kehikko sytytetään verrattain yhtäaikaisesti kaikkialta, kuten sen alapuolelle asetetulla pienellä määrällä palavaa nestettä.



Kuvio 1: Puukehikko (mukaillen SFPE 2016, 829)

Vain toisesta päästään tai keskeltä sytytetyille kehikoille alla kuvattu malli ei sovellu yhtä hyvin (SFPE 2016, 828–830), mutta oletuksena on, että yhtäaikaisesti sytytetty kehikko tarjoaa nopeimman palonkehityksen ja siten suurimman hetkellisen palotehon. Tämän työn

tarkoituksessa suurin hetkellinen paloteho tarjoaa jälleen pahimman vaihtoehdon, joka on riskiperusteisessa tarkastelussa oikea.

Kehikon massavirta saavuttaa aluksi alemman kahdesta vaihtoehdosta, jotka ovat

$$\dot{m} = \frac{4}{D} m_0 v_p \left(1 - \frac{2v_p t}{D}\right)$$

tai

$$\dot{m} = 4,4 \cdot 10^{-4} \left(\frac{S}{h_c}\right) \left(\frac{m_0}{D}\right)$$

Kaavoista ylempi pätee kehiolle, joka palaa *pinta-alahallittuna* (*fuel surface controlled*), ja alempi kaava kehiolle, joka *huokoisuushallittuna* (*crib porosity controlled*). Tämä tarkoittaa sitä, hallitseeko palotapahtumaa enemmän massan sisäinen ventilaatio vai palavan pinta-alan suuruus. Koska välttämättä ei ole selvää, kumpi arvo on alussa pienempi, toisin sanoen alkaako palo ensin huokoisuushallittuna ja muuttuu myöhemmin pinta-alahallitukseksi vai onko se alusta lähtien pinta-alahallittu, on alussa syytä laskea kumpikin.

Kaikissa yllä mainituissa kaavoissa

- D on sauvan leveys (m)
- m_0 on kehiön alkuperäinen massa (kg)
- t on aika sytytyshetkestä (s)
- h_c on kehiön korkeus (m)
- S on ilmarako sauvojen välissä (m)
- V_p on aineen sauvapaksuuden funktiona syntyvä regressiionopeus (taulukosta 2 alapuolelta, suuntaa antavia lukuja)

Taulukko 2: Regressiionopeuksia (SFPE 2016, 829)

Materiaali	Regressiionopeus v_p
Puu	$2,2 \cdot 10^{-6} \cdot D^{-0,6}$
PMMA (akryyli, polymetyylimetakrylaatti)	$1,4 \cdot 10^{-6} \cdot D^{-0,6}$

Kestomuovi	$3,1 \cdot 10^{-6} \cdot D^{-0,6}$
Jäykkä polyuretaanivaahdo	$3,8 \cdot 10^{-6} \cdot D^{-0,6}$

Kun massavirta on näin selvitetty, voidaan paloteho laskea alaluvussa 3.3 esitetyllä tavalla.

Lasketaan esimerkin vuoksi täyden palamisen vaiheeseen nopeasti kehittyneen puukehikon suurin paloteho. Puukehikon sauvojen leveys on (D) 20 cm ja korkeus 10 cm (vastaa noin niin sanottua ”kakkosnelosta”). Sauvojen välin leveys (S) on 200 mm. On huomattava, että kaavassa kaikki mitat annetaan metreinä. Sauvoja on joka kerroksessa viisi kappaletta. Kerroksia on 11. Edellä kuvatulla asetelmalla toteutettuna puusauvojen pituus on 1,8 m ja korkeus (h_c) 1,1 m. Puun tiheydeksi oletetaan 640 kg/m^3 . Regressionopeus on $2,2 \cdot 10^{-6} \cdot D^{-0,6}$.

Lasketaan puukehikon alkuperäinen kokonaismassa m_0

$$m_0 = (0,2 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ m} \cdot 5 \cdot 11) \cdot 640 \text{ kg/m}^3 = 1267,2 \text{ kg}$$

Lasketaan pinta-alahallittu massavirta:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= (4 / D) m_0 v_p (1 - ((2 v_p t) / D)) = \\ &(4 / 0,2 \text{ m}) \cdot 1267,2 \text{ kg} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2^{-0,6} \text{ m/min} \cdot (1 - ((2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2^{-0,6} \cdot 1 \text{ s}) / 0,2 \text{ m})) \\ &\approx \mathbf{0,146 \text{ kg/s}} \end{aligned}$$

Lasketaan huokoisuushallittu massavirta:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 4,4 \cdot 10^{-4} (S / h_c) (m_0 / D) = \\ &4,4 \cdot 10^{-4} \cdot (0,2 \text{ m} / 1,1 \text{ m}) \cdot (1267,2 \text{ kg} / 0,2 \text{ m}) \approx \mathbf{0,51 \text{ kg/s}} \end{aligned}$$

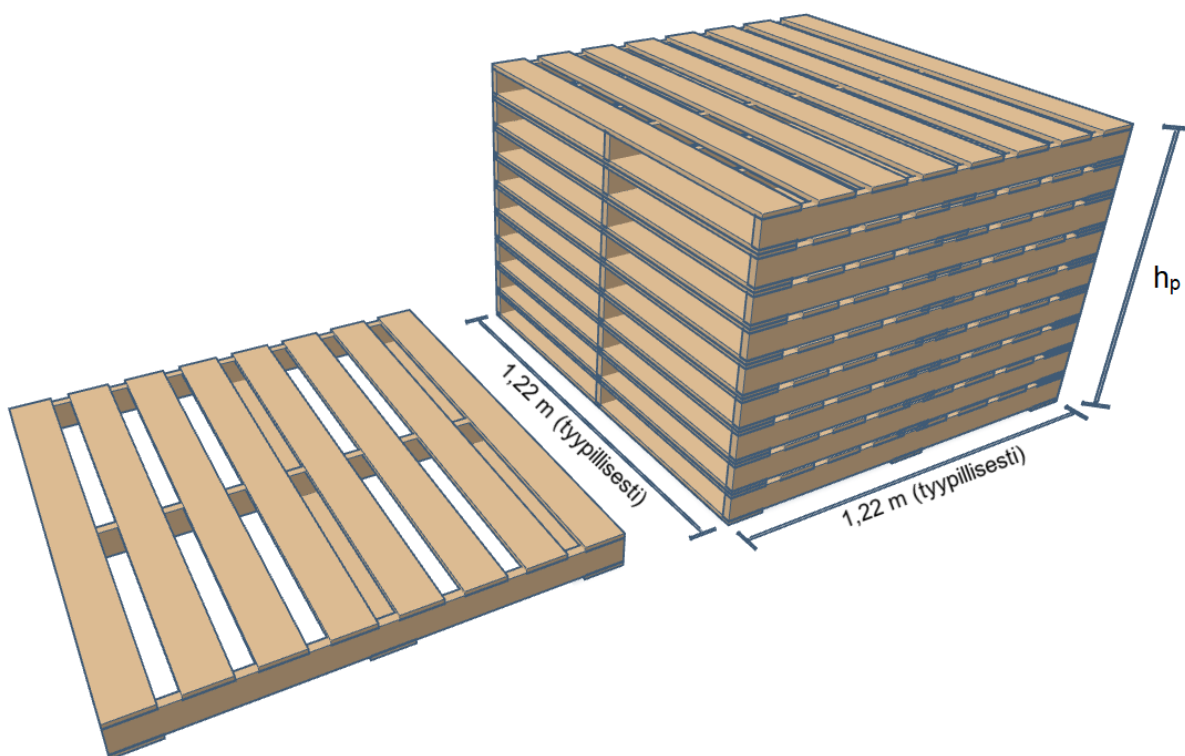
Koska pinta-alahallittu massavirta on pienempi, valitaan massavirraksi (\dot{m}) 0,146 kg/s. Oletetaan edelleen, että puun energiasisältö on 17 MJ/kg ja vain säteilyn huomioiva palamistehokkuus 0,4. Nyt voidaan laskea puukehikon paloteho sen alkuvaiheen täyden palon vaiheessa

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m} \times \Delta h_c = \\ \dot{Q} &= 0,146 \text{ kg/s} \cdot 0,4 \cdot 17 \text{ MJ/kg} \approx \mathbf{0,99 \text{ MW}} \end{aligned}$$

3.4.2 Kuormalavapino

Toisena hyvin mallinnettuna puuaines-eränä tunnetaan kuormalavapino (SFPE 2016, 857–859). Kuormalavapino eroaa puukehikosta siten, että tyypillisessä kuormalavassa on tiheästi

asetettuja "sauvoja" vain yhdessä suunnassa. Toisen suunnan muodostavat harvaan asetetut tukipuut, joiden väliin jää enimmäkseen tyhjää tilaa. Se on siis rakenteellisesti paljon avoimempi. Kuvio 2 havainnollistaa yhden kuormalavan ja kuormalavapinon geometrian.



Kuvio 2: Kuormalava ja kuormalavapino (mukaiillen SFPE 2016, 858)

Pohjapinta-alaltaan 1,22 m x 1,22 m kokoisen kuormalavapinon laskentakaava on muotoa

$$\dot{q} = 1368(1 + 2,14h_p)(1 - 0,03M)$$

jossa

- \dot{q} on kokonaispaloteho (kW)
- h_p on kuormalavapinon korkeus (m)
- M on puun suhteellinen kosteus (%)
- oletettuna lämpöarvona on 12 MJ/kg (hieman siis yleensä otaksuttua arvoa 14–17 MJ/kg vähemmän)

Lisäksi sama lähde (SFPE 2016, 857–859) esittää kaavan, joka käy pohjapinta-alaltaan määrittelemättömälle kuormalavapinolle.

$$\dot{q}'' = 919(1 + 2,14h_p)(1 - 0,03M)$$

Erona edelliseen kaavaan on se, että nyt laskettu \dot{q}'' on suhteessa pohjan pinta-alaan eli yksikössä kW/m².

Esimerkin vuoksi lasketaan pohjapinta-alaltaan 1,22 m x 1,22 m kokoisen ja 1,22 m korkean kuormalavapinon paloteho kummallakin kaavalla pinta-alaltaan vakioidulla tavalla ja pinta-alalta määrittämättömällä tavalla. Suhteelliseksi kosteudeksi oletetaan 20 %. Vain säteilyn huomioon ottavaksi palamistehokkuudeksi oletetaan 0,4

$$\dot{q} = (1368 \cdot (1 + 2,14 \cdot 1,22 \text{ m}) \cdot (1 - 0,03 \cdot 20 \%)) \cdot 0,4 \approx \mathbf{1964 \text{ kW}}$$

$$\dot{q}'' = (919 \cdot (1 + 2,14 \cdot 1,22 \text{ m}) \cdot (1 - 0,03 \cdot 20 \%)) \cdot 0,4 \approx \mathbf{1319 \text{ kW/m}^2}$$

Kertomalla jälkimmäisen laskelman tulos tehtävänannon mukaisella pinta-alalla saadaan

$$\dot{q} = 1319 \text{ kW/m}^2 \cdot (1,22 \text{ m} \cdot 1,22 \text{ m}) \approx \mathbf{1963 \text{ kW}}$$

Kaavat ovat siis yhtäpitävät yhden kilowatin eron selittyessä laskennassa tehdyillä pyöristyksillä.

VTT (2007, 106–108) viittaa aikaisempaan SFPE:n käsikirjan versioon (3rd edition, uusin on vuoden 2016 5th edition) ja esittää seuraavan yllä olevia vastaavan kaavan, jolla voi ottaa huomioon valitsemansa lämpöarvon puulle (Δh_c = valittu puun lämpöarvo (MJ/kg))

$$\dot{q}'' = 65(\Delta h_c)(1 + 2,14h_p)(1 - 0,03M)$$

Lisäksi VTT (2007, 106–108) esittelee edellisiä mukailevat korkeusriippuvaiset suhteet laskenta-kaavoineen seuraaville pinta-alasidonnoisille (kW/m²) varastointitavoille

$$\text{Pahvilaatikot: } \dot{q}'' = 534 (1 + 0,06h_p)$$

$$\text{Pahvilaatikoihin pakatut polystyreenikupit: } \dot{q}'' = 1217 (1 + 0,77h_p)$$

Käytettäessä kehikko- tai kuormalavapinojen palotehokonstruktioita käytännön paloteknisessä laskennassa voidaan nähdäkseni ajatella seuraavasti: Jos kyseessä on tiheästi koottu puuaines, jossa "sauvat" ovat merkittävän vahvuisia suhteessa niiden pituuteen ja niiden välisiin aukkoihin, voidaan käyttää puukehikon mallia. Tällaisia voisivat olla esimerkiksi halkaisemattomien tai vain osittain halkaistujen polttopuiden tiheästi kasatut "pinomottimaiset" puuerät. Kuormalavan mallia voidaan käyttää sellaisenaan kuormalavojen ollessa kyseessä tai luonteeltaan muuten harvempaan puuainekseen, esimerkiksi hyvin käyttövalmiiksi halkaistujen harvasti "heittomottimaisesti" pinottujen puuerien tapauksessa. Kysymys on joka tapauksessa aina korkeintaan suuntaa antavasta laskennasta.

3.5 Mitoituspalot lämpösäteilyn lähteenä

3.5.1 Kalorimetria

Janssens (SFPE 2016, 905) myötäilee SFPE:n käsikirjassa ylempänä esitettyä ajatusta siitä, että paloteho on kaikkein tärkein yksittäinen muuttuja paloriskin tarkastelussa. Ylempänä on esitetty eräitä tapoja laskea erilaisten kuumien tai palavien pintojen ja aineiden palotehoja. Kuten puun palamisesta kertovan luvun 3.4 yhteydessä voidaan havaita, osassa näitä malleja palavaa kohdetta on käsiteltävä pikemminkin esineenä tai muuten sellaisena objektina, jonka fyysiset mitat ja muut ominaisuudet tunnetaan tarkasti. Palotehoa voidaan nykyään tarkasti mitata juuri polttamalla oikeita esineitä ja mittaamalla vapautunut energiamäärä (esineen lämpöarvo) tai paloteho, eli vapautuvan energian määrä aikayksikköä kohden. Menetelmää kutsutaan kalorimetriksi ja siihen käytettävää välinettä kalorimetriksi. Mitoituspaloja käsittelevän luvun alkuun syvennytään ensin Janssensin esitykseen kalorimetreistä ja kalorimetriasta, minkä jälkeen perehdytään useista lähteistä saataviin tietoihin kalorimetrialla mitattujen oikeiden palavien esineiden palotehoista. Laskennallisten mallien ohella näitä voidaan käyttää arvioidessa erilaisia palodynaamisia tapahtumia, kuten lämpösäteilytehoa.

Aineen (tai esineen) lämpöarvoon, eli aineen palaessa täysin siitä vapautuvaan energiaan suhteessa poltetun aineen massaan, voidaan selvittää *happipommikalorimetrillä* (*oxygen bomb calorimeter*). Laitteessa hyvin pieni määrä ainetta (yleensä noin 1 g) poltetaan puhtaassa hapessa noin 30 bar paineessa. Happipommikalorimetrissä aineita poltetaan siis olosuhteissa, jotka ovat kaukana todellisen tulipalon olosuhteista, eikä se kerrokaan mitään aineen palotehosta todellisessa tulipalossa. Happipommikalorimetri sopii hyvin aineen lämpöarvon selvittämiseen. Lämpöarvoa mitataan palotilaa ympäröivän veden lämpötilan nousua mittaamalla (adiabaattisesti) tai mittaamalla, kuinka paljon vedestä on poistettava lämpöenergiaa, jotta sen lämpötila pysyy vakiona polttokokeen ajan (isoperiboolisesti). (SFPE 2016, 906.)

1970-luvulta asti on kehitetty kalorimetrejä, joiden toiminta perustuu hapen kulutuksen ja hiili-monoksidin syntymisen mittaamiseen. Jo vuodesta 1917 asti on tiedetty, että useiden orgaanisten nesteiden, kaasujen ja kiinteiden aineiden palaminen kuluttaa tietyn suunnilleen (noin 5 % tarkkuudella) vakiosuuruisen määrän happea palavan aineen massayksikköä kohden. Tunnuksella E tunnettu vakio on $\sim 13,1 \text{ MJ/kg(O}_2\text{)}$, mikä tarkoittaa sitä, että 13,1 kg happea kuluu kyseisen polttoaineen palaessa yhden megajoulen energiamäärän tuottamiseen. Tarkat arvot voidaan mitata tuntemalla poltettavan aineen kemiallinen koostumus ja laskemalla aineen palamisen kemiallinen reaktion moolimassa suhteessa sen palamiseen tarvittavan hapen moolimassaan. Kun voidaan mitata lisäksi palavan aineen massan vähentymistä, voidaan laskea, kuinka paljon energiaa massayksikön polttaminen tuotti, eli aineen lämpöarvo. Käytännössä tulee enää koota kaikki palamistuotteet hallittua kanavaa pitkin mittaamista varten. Mitata

voidaan myös hiilimonoksidia ja hiilidioksidia, joiden syntyminen palotapahtumassa tunnetaan hapen tavoin. (SFPE 2016, 911–917.)

Nykyään hapen kulutukseen perustuva kalorimetria on suosituin tapa mitata palotehoa. Suosittuja laitekoonpanoja on erilaisia, esimerkiksi

- Niin sanottu *kartiokalorimetri (cone calorimeter)*, jonka kehitti Babrauskas 1980-luvulla Yhdysvaltain National Bureau of Standardsille (nykyään National Institute of Standards and Technology, NIST).
- Factory Mutual Insurance Company -nimellä tunnetun vakuutusyhtiön tutkimushaaran Factory Mutual Research Companyn (sittemmin FM Global [ja nykyään FM] ja sen Research-osaston) *palonetenemislaitte (fire propagation apparatus)*.
- *FAA:n mikromittakaavan polttokalorimetri (Microscale Combustion Calorimeter)*, jolla kehitetään erityisesti ilmailualan palonkestäviä polymeerejä milligrammamittakaavassa olevilla koekappaleilla

Edellä kuvailut kalorimetrit ovat verrattain pienten kappaleiden koelaitteita. Lisäksi käytössä on kokonaisia huonekaluja polttavia kalorimetrejä samoin, kuin huoneen kokoisia kalorimetrejä, joissa voidaan toteuttaa erilaisia suuren mittakaavan palokokeita mittauksineen. (SFPE 2016, 925–937.)

3.5.2 Valikoituja mitoituspaloja säteilyteholaskennan välineeksi

Palotekninen kirjallisuus tarjoaa laajan kattauksen erilaisten polttokokeiden tuloksia käytettäväksi valmiiksi annetun palotehon omaavana palavana kohteena. Näillä tarkoitan palotapahtumia, joissa palavan aine-erän tai esineen fyysiset ominaisuudet tiedetään tarkasti, ja palon palodynaamiset ominaisuudet, kuten paloteho, on mitattu esimerkiksi kalorimetrian tai laskennan keinoin. Mitoituspalot tarjoavat valmiin kokonaispalotehon palon säteilytehon laskemiselle ja siitä seuraavan riskienarvioinnin tekemiselle.

Tässä luvussa luodaan katsaus työn rajauksen suhteen parhaiten sopiviin mitoituspaloihin. Koska kyse tässä työssä on säteilytehon aiheuttaman riskin selvittämisestä, on syytä huomata, että yleensä kalorimetreillä saadut tulokset ovat nimenomaan kokonaispalotehoja. Niitä on yleensä tarpeen korjata kertoimella X, millä otetaan huomioon vain säteilevän palotehon osuus. Liitteeseen 1 liitetaulukoon 6 on koottu valmis kattaus tällaisia mitoituspaloja. Tässä esitetään liitetaulukon taustoja hieman seikkaperäisemmin.

Ajoneuvoja on koepoltettu useissa testeissä. SFPE:n (2016, 870–876) mukaan yksittäisten ajoneuvojen suurin paloteho vaihteli 1500 ja 8500 kW välillä. Tyypillinen tapaus oli 3500 ja 5000 kW välillä. Linja-autojen ("school bus") palotehot olivat luonnollisesti huomattavasti

kovempia, jopa 30–35 MW (SFPE 2016, 870–876). Varsinaisen lähteen uutuudesta huolimatta tämä tieto on melko vanhaa, viime vuosituhannen puolelta. Henkilöautojen massat näissä testeissä vaihtelivat noin 700–1300 kg välillä, eli pienen puoleisina nykyautoihin verrattuna. Nykyautot voivat palaa tehokkaamminkin. Toisaalta on myös mahdollista, että niiden sisusteiden palo-ominaisuudet ovat kehittyneet edullisempaan suuntaan edellä kuvattujen vanhojen testien jälkeen.

Muovisen kuusi metriä pitkän veneen paloteho on VTT:n mukaan jopa 12000 kW ja moottori-
pyörän 3800 kW. Autojen palotehon laskemiselle VTT esittää hyvin hienostuneen mallin, mutta tässä yhteydessä riittää yhteenvedoksi se, että ”tyypin 2 ja 3 autot” (tavallinen henkilöauto ja tavallinen perheauto) palavat 5800–9100 kW ja 7300–11800 kW palotehoilla. (VTT 2007, 79.) VTT:n lukujen voidaan karkeasti arvioida olevan asiassa hieman uudempaa tietoa, joten nykyautojen palotehoa arvioitaessa sitä voitaneen pitää paremmin suuntaa antavina kuin SFPE:n vanhempia viitteitä.

Sähköajoneuvoja on koepoltettu ainakin yhdessä Fire Safety Journalissa julkaistussa tutkimuksessa (Dehghani ym. 2025). Chevrolet Boltin ja Tesla Model 3:n suurimmat palotehot olivat noin 11800 kW ja 6200 kW. Suurimmat ajoneuvojen pituussuuntaisesta keskilinjasta 2,74 metrin päässä mitatut säteilytehot olivat 37,1 kW/m² ja 19,7 kW/m². (Dehghani ym. 2025, 5–7.)

Ajoneuvojen renkaita on koepoltettu muun ohella raskaan ajoneuvon paripyöräkokonaisuutena (285/80, R22.5) (SFPE 2016, 882) suurimmalla palotehotuloksella ~1000 kW. On toki huomattava, että tällaisen yhden renkaan massa voi olla jopa 40–80 kg, eli 5–10 kertaa tavanomaisen henkilöauton renkaan massan verran. Massavirta on siis vastaavasti suurempi.

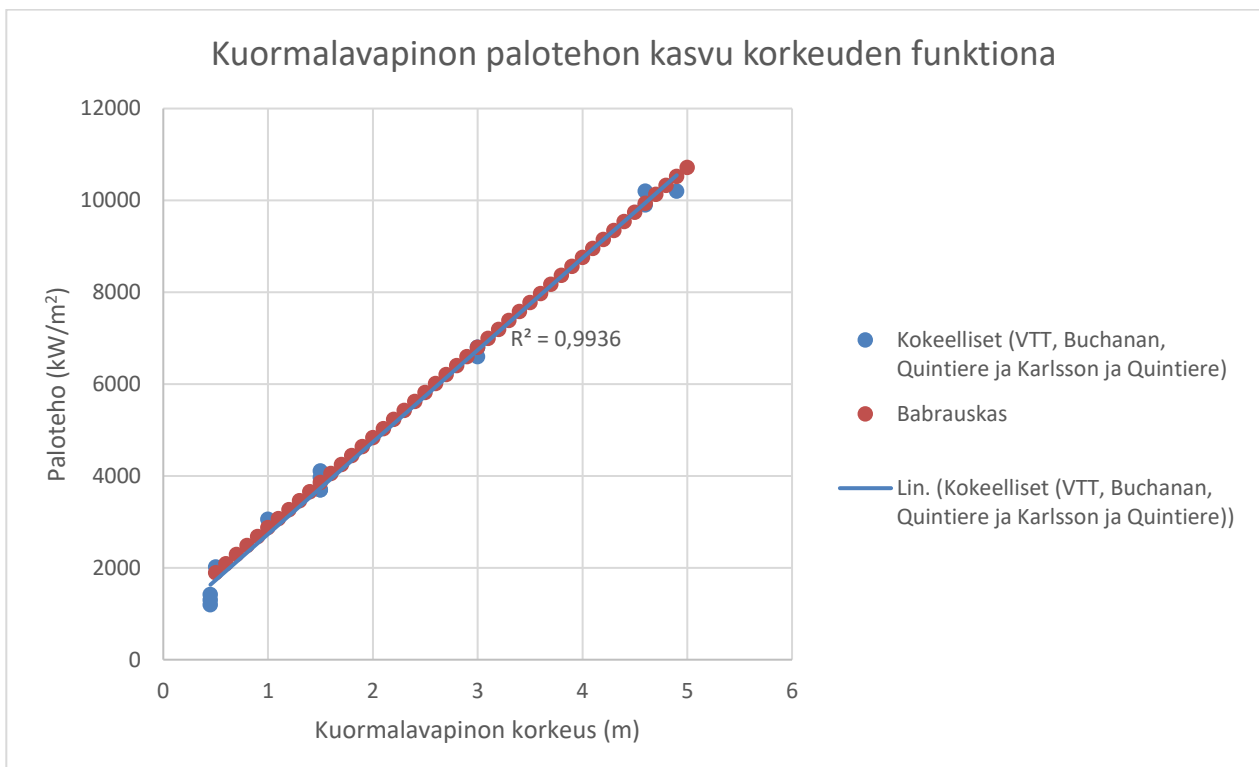
Jäteastioiden ja jätepussien koepoltoissa on saatu seuraavia tuloksia. Pienten jäteastioiden kokoluokassa 6,6–8,8 litraa ja alle kilogramman massaluokassa suurimmat palotehot vaihtelivat 28 ja 50 kW välillä, kun taas 1–4 kg massaluokassa palotehot olivat 150–350 kW luokkaa. Siirryttäessä suurempiin jäteastioihin on mitattu esimerkiksi noin 450 kW paloteho 136 litran jäteastiolla ja jopa 2500 kW 364 litran jäteastiolla. Luonnollisesti paloteho on merkittävästi kiinni jäteastian sisällöstä. (SFPE 2016, 882–887.) VTT (2007, 81) päätyy omien lähteidensä kautta vastaaviin lukuihin. Quintiere (2017, 190) esittää seuraavia lukuja: pienet jäteastiat (18–40 litraa) 100 kW, suuret jäteastiat (70–120 litraa) 300 kW.

Jätekatosten osalta VTT esittää 16000 kW palotehoa palamatonkattoiselle ja 18800 kW palavakattoiselle neljän jäteastian jätekatokselle. Jos kyse on vähän palokuormaa sisältävistä jätekatoksista, ovat vastaavat arvot 6700 kW ja 10800 kW. (VTT 2007, 133.)

Puupinojen palotehojen arviointiin voidaan edellä alaluvussa 3.4. esitettyjen laskentamallien lisäksi käyttää seuraavia tietoja.

- Puutapuli 25 kg 400 kW, 50 kg 1380 kW ja 500 kg 3500 kW (VTT 2007, 27–34).
- Kuormalavapino (1,0 m x 1,2 m) 0,5 m korkea 2422 kW, 1,0 m korkea 3670 kW ja 1,5 m korkea 4930 kW (VTT 2007, 27–34).
- Buchanan (2001, 222) antaa kuormalavapinoille seuraavia palotehoja: 0,45 m korkealle 1200 kW/m², 1,5 m korkealle 3700 kW/m², 3,0 m korkealle 6800 kW/m² ja 4,6 m korkealle 10200 kW/m².
- Quintiere (2017, 200) esittää kuormalavapinoille seuraavia pinta-alaan suhteutettuja palotehoja korkeuden mukaan: 1,5 ft (~0,45 m) 1300 kW/m², 5 ft (~1,5 m) 3700 kW/m², 10 ft (~3,0 m) 6600 kW/m² ja 15 ft (~4,6 m) 9900 kW/m². Karlsson ja Quintiere (2000, 42) esittävät palotehoja 1,5 ft 1420 kW/m², 5 ft 3970 kW/m², 10 ft 6800 kW/m² ja 16 ft (~4,9 m) 10200 kW/m².

Asetettaessa yllä olevat kuormalavapinojen kokeelliset havainnot (VTT:n osalta 1 m² alueelle laskettuna) samaan kuvaajaan (kuvaaja 2) ylempänä käsitellyn Babrauskasin pohjapinta-alalle määrittelemättömän kuormalavapinon kaavan kuvaajan kanssa (kosteus 10 %) huomataan niiden olevan keskenään erittäin hyvin korreloivia.



Kuvaaja 2: Kuormalavapinojen kokeelliset tulokset ja Babrauskasin kaava alaluvusta 3.4.2

Ulkokalusteryhmälle (tarkemmin määrittelemätön) VTT (2007, 132) antaa maksimipalotehoksi 3800 kW muovikalusteilla ja 350 kW puukalusteilla.

On syytä vielä korostaa, että yllä olevat palotehot ovat kokonaispalotehoja. Jos halutaan tutkia vain niiden säteilemällä siirtyvää tehoa, tulee ne kertoa sopivalla vain säteilytehon huomioon ottaen palamistehokkuuskertoimella. Esimerkiksi Dehghani ym. (2025, 5) käyttivät ajoneuvopalojen point source model -laskuissaan kertoimena X niinkin pientä arvoa kuin 0,25.

4 Kohdistuvan säteilyn intensiteetti

Edellä pääluvussa kolme käsiteltiin

- lämpösäteilyn laskemista suoraan säteilevän pinnan lämpötilan perustella
- lämpösäteilytehon laskemista palavan aineen massavirran ja lämpöarvon kautta
- puun palamista erikoistapauksena
- mitoituspalojen käyttämistä lämpösäteilyn lähteenä.

Tässä pääluvussa käsitellään erilaisia tapoja laskea palokohteesta lähtevän lämpösäteilytehon kohdistumista tiettyyn vastaanottavaan pisteeseen. Käsiteltävistä vaihtoehdoista pistemäinen säteilijä ja tasopintasäteilijä ovat verrattain puhtaasti tunnettuihin fysikaalisiin lainalaisuuksiin perustuvia laskentamalleja. Niiden jälkeen esiteltävät mallit perustuvat empiirisistä koikeista johdettuihin kaavoihin. Myöhemmin pääluvussa viisi näitä malleja sovelletaan CASE-esimerkkeihin. Muilta osin sopivan tavan soveltaminen kuhunkin käsillä olevaan tapaukseen jää jokaisen riskienhallintatyötä tekevän oman valinnan varaan.

4.1 Pistemäinen säteilijä

Yksinkertaisimmassa teoreettisessa mallissa oletetaan palokohteen olevan pistemäinen säteilijä, joka lähettää lämpösäteilytehonsa tasaisesti kaikkiin suuntiin kolmiulotteisessa avaruudessa pallonmuotoiselle alueelle. Tätä ajatusta käytetään alempana liekin aiheuttaman lämpösäteilyn laskentamalleissa, mutta perehdytään siihen ensin teoreettisesti puhtaammassa muodossa.

Karlsson ja Quintiere (Karlsson ja Quintiere 2000, 155–156; Quintiere 2017, 89) kuin myös NFPA (2003 3–135), esittävät tämän *Modakin yksinkertaiseksi malliksi* tai *Lawsonin ja Quintieren malliksi* kutsumansa pistemäisen säteilijän pallopinnalle kohdistaman ajatuksen puhtaassa muodossaan seuraavasti

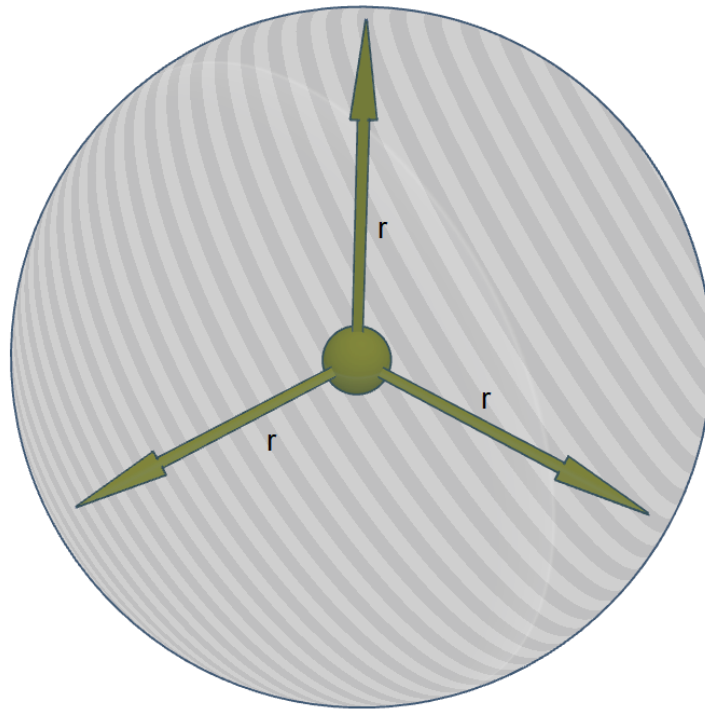
$$q'' = \frac{X_r \dot{Q}}{4\pi r^2}$$

jossa

- q'' on pallopinnan pinta-alayksikköä kohden vastaanottama lämpösäteilyteho (yleensä kW/m² tai MW/m²)

- X_r on säteilytehokkuuskerroin samalla tavalla, kuin edellisessä pääluvussa. Jos se on huomioitu jo palotehoa \dot{Q} laskettaessa, sen tulee tässä olla arvo 1 tai jäädä pois
- \dot{Q} on kokonaispaloteho (yleensä kW tai MW)
- r on pallon säde (yleensä m)

Kuvio 3 havainnollistaa ajatusta pallomaisesta säteilijästä ja pallon säteestä r .



Kuvio 3: Pistemäinen säteilijä ja pallopinta

Kuten aluvussa 3.2 havaittiin lämpötilan nousemisen osalta, tästäkin kaavasta on helppo havaita sen merkittävin yksittäinen tekijä. Pallon säde r kohotetaan toiseen potenssiin, eli se kasvattaa nimittäjää nopeasti, mikä puolestaan pienentää mihin tahansa kohtaan pallopinnalle kohdistuvaa pinta-alasidonnaista lämpösäteilytehoa.

Asiaa voidaan havainnollistaa esimerkin kautta seuraavasti. Oletetaan pistemäiseksi katsottava palokohde, jonka lämpösäteilyteho on 1000 kW. Lämpösäteilyä vastaanottava tarkastuspiste on yhden metrin päässä palokohteesta. Lasketaan tarkastelupisteeseen kohdistuva lämpösäteilyteho.

$$\dot{q}'' = \dot{Q} / (4 \pi r^2) = 1000 \text{ kW} / (4 \cdot \pi \cdot 1^2 \text{ m}) \approx \mathbf{79,6 \text{ kW/m}^2}$$

Säteilyteho yhden metrin päässä on vielä huomattava. Kasvatetaan etäisyyttä r kahteen metriin ja lasketaan uudelleen.

$$\dot{q}'' = 1000 \text{ kW} / (4 \cdot \pi \cdot 2^2 \text{ m}) \approx \mathbf{19,9 \text{ kW/m}^2}$$

Etäisyyden kaksinkertaistuksessa vastaanotettu lämpösäteilyteho laskee odotetusti neljänneksen. Lisättäessä etäisyyttä kolmeen metriin laskisi vastaanotettu lämpösäteilyteho noin $8,8 \text{ kW/m}^2$:iin, eli noin kymmenesosaan alkuperäisestä yhden metrin etäisyydestä. Edellä luvussa 3.2 todetun lämpösäteilytehon kasvua koskeneen ”nyrkkisääntömäisen totuuden” vastinpariksi voidaan siis todeta, että pienikin etäisyyden lisääminen palavaan kohteeseen pienentää lämpösäteilyn aiheuttamaa riskiä merkittävästi.

4.2 Tasopintasäteilijä ja näkyvyyskerroin

Edellä esitetty pistemäisen säteilijän ja pallomaisen säteilyalueen tapaus ei luonnollisesti sovellu läheskään kaikkiin tilanteisiin. Usein säteilijä on, tai on yksinkertaistettavissa, pisteen sijaan levyksi tai tasoksi, jonka vain yhden puolen lähettämää säteilytehoa tarkastellaan. Tällöin myös sen säteilyn kohdistumisalue muuttuu pallosta puolipalloksi.

Vaikka intuitiivisesti voisi ajatella, että jos pistemäisen säteilijän lähettämä säteilyteho jaetaan edellisen alaluvun mukaisesti pallon muotoiselle alueelle pinta-alalle $4 \pi r^2$, olisi puolipallon muotoiselle alueelle kohdistuva tasopinnan säteily jaettava alueelle $2 \pi r^2$. Ainakin Drysdalen, SFPE:n ja VTT:n mukaan tasopinnan säteilytehoa tulee tarkastella eri lailla. Tasopinnan tiettyyn suuntaan lähettämän säteilytehon suuruus riippuu Lambertin kosinilain mukaisesti siitä suunnasta, johon säteilyn suuntaa tarkastellaan suhteessa kohtisuoraan pintaa vastaan. Tästä syystä myös vastaanottavan pinta-alan jakajana käytetään vain ”neljännespalloa”, eli πr^2 . (Drysdale 2011, 62–63; SFPE 2016, 107–109; VTT 2013, 12). Puolipallomaisen säteilyä vastaanottavan pinnan mihin tahansa pisteeseen kohdistuva lämpösäteilyteho voidaan edellisiä mukailien laskea kaavalla

$$\dot{q}'' = \dot{Q} \frac{\cos \theta}{\pi r^2}$$

jossa

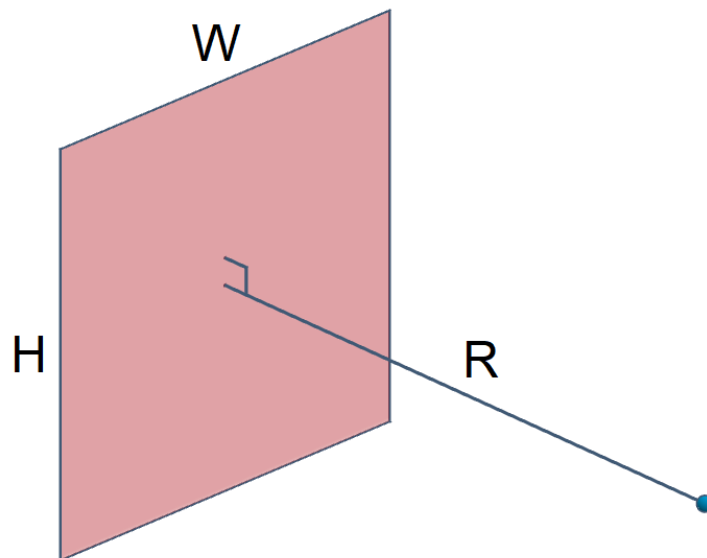
- θ on valitun pallopinnan pisteen kulman poikkeama kohtisuorasta tasopintaa vastaan
- r on pallon säde

Tämän tavan edellytyksenä on kuitenkin, että puolipallopinnalla sijaitsevan pisteen etäisyys (= puolipallon halkaisija r) on selvästi suurempi kuin tasopinnan pinta-alan neliöjuuri. Tasopinta

voidaan tällöin yksinkertaistaa (lähes) pistemäiseksi säteilijäksi sen säilyttäessä kuitenkin tasomaisen vain toiselta puolelta säteilevän olemuksensa. Mitä lähemmäksi tarkastelupiste siirry tasopintaa, toisin sanoen kuinka ”suurelta tasopinta pisteelle näyttää”, sitä epätarkemmaksi tämä yksinkertaistus käy.

Tasopinnan pisteeseen tai toiseen tasopintaan kohdistaman kokonaislämpösäteilytehon tarkka laskeminen vaatisi kaksinkertaista integraalilaskentaa, ja se on sellaisena tämän työn rajauksen ulkopuolella. Asiaa voidaan kuitenkin lähestyä eräänlaisen puolivalmiiksi lasketun näkyvyyskerroimen (*configuration factor*) kautta. Tällä tarkoitetaan sitä, että lähettävän ja vastaanottavan pinnan spatiaaliset suhteet on otettu ennalta huomioon ja niistä on laskettu kerroin, jolla säteilevän pinnan kokonaissäteilyteho kerrotaan. (esim. SFPE 2016, 120; Drysdale 2011, 64–71; Quintiere 2017 86–88; Buchanan 2001, 79–80; VTT 2013.). Näkyvyyskerroimia on laskettu runsaasti valmiiksi kirjallisuudessa.

Työn rajauksen mukaisesti tässä yhteydessä esitellään yksinkertainen perustapaus, jossa kuvion 4 mukaisesti tasopinta säteilee pisteeseen, joka on pahimmassa mahdollisessa paikassa kohtisuorassa tasopintaa vastaan tietyllä etäisyydellä tasopinnan keskikohdasta. Näkyvyyskerroimen laskemiseksi käytän VTT:n jätekeskusten paloturvallisuuden tutkimuksessaan (2008, 110) käyttämää mallia siitä syystä, että se käyttää kulmayksikkönä radiaania, ja on siten suoraan sopiva MS-EXCEL-ohjelmalle.



Kuvio 4: Tasopinta ja tarkastelupiste

Tässä tapauksessa näkyvyyskerroin ϕ (ef) saadaan kaavalla

$$\phi = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{H/2}{\sqrt{H/2 + R^2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{W/2}{\sqrt{H/2 + R^2}} \right) + \left(\frac{W/2}{\sqrt{W/2 + R^2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{H/2}{\sqrt{W/2 + R^2}} \right) \right]$$

jonka elementit on esitetty kuviossa 4.

Lasketaan esimerkiksi seuraava tapaus. Säteilevän pinnan lämpötila on 600 °C. Emissiivisyys on 0,7. Pinnan korkeus (H) on 1,1 m ja leveys (W) on 1,8 m. Tarkastelupisteen etäisyys on yksi metri.

Alaluvun 3.2 mukaisesti lasketuksi pinnan pinta-alariippuvaiseksi säteilytehoksi saadaan noin 23 kW/m². Soveltamalla annettuja pinnan mittoja ja tarkastelupisteen etäisyyttä yllä olevaan näkyvyyskertoimen kaavaan saadaan näkyvyyskertoimeksi ϕ noin 0,37.

Kertomalla säteilyteho näkyvyyskertoimella saadaan pisteeseen kohdistuvan lämpösäteilyn tehoksi noin **8,5 kW/m²**. On huomattava, että näkyvyyskerroinlaskelma ottaa huomioon säteilevän pinnan mitat, eikä sitä muilta osin ole tarpeen laskelmassa ottaa huomioon.

Tässä tapauksessa säteilevän pinnan pinta-ala suhteessa tarkastelupisteen etäisyyteen on sellainen, että säteilylähdetä ei voi hyvällä omalla tunnolla kutistaa ”pistemäiseksi”. Laskettaessa sama laskutoimitus ylempänä olevalla yksinkertaisella mallilla (säteilevän pinnan kokonaispinta-ala huomioiden) saadaankin tulokseksi

$$\dot{q}'' = (23 \text{ kW/m}^2 \cdot 1,1 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ m}) / (\pi \cdot 1^2) \text{ m} \approx \mathbf{14,5 \text{ kW/m}^2}$$

Jos tarkastellaan asiaa toisenlaisella skenaariolla, jossa olosuhteet ovat muuten yllä olevan mukaiset, mutta etäisyys on viisi metriä, saadaan yksinkertaisella mallilla noin 0,58 kW/m² ja näkyvyyskerroinmallilla noin 0,56 kW/m². Huomataan, että säteilevän pinnan kutistuessa ”pistemäisemmäksi” suhteessa tarkastelupisteen etäisyyteen tulokset lähenevät toisiaan. Yksinkertaisen mallin antama arvo vaikuttaa lähtevän poikkeamaan tasopintamallin arvosta ylöspäin merkittävästi karkeasti siinä kohdin, kun tarkastelupisteen etäisyys tasopinnasta alittaa säteilevän pinnan pinta-alan neliöjuuren.

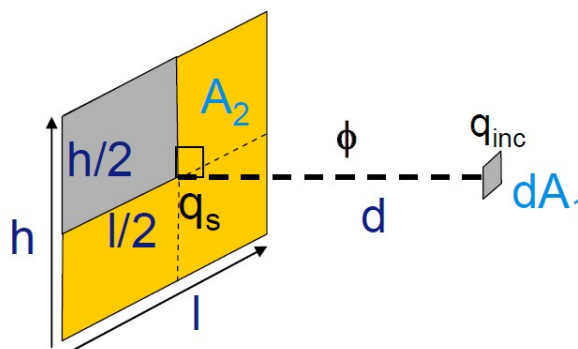
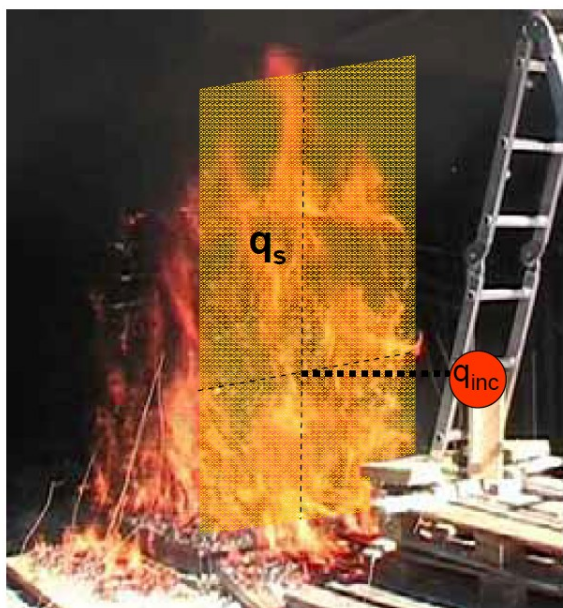
4.3 Liekin aiheuttama lämpösäteily ja muita käytännön sovelluksia

Useassa lähteessä esitetty tapa arvioida palon aiheuttamaa lämpösäteilytehoa tiettyyn tarkastelupisteeseen on tarkastella palon aiheuttamien liekkien lähettämää lämpösäteilyä. Eri lähteistä löytyvät mallit tarkastelevat muun ohella tilannetta, jossa palavan massan sivu katsotaan liekeistä koostuvaksi seinämäksi, johon puolestaan sovelletaan edellä alaluvussa 4.2 esitettyä tasomaisen säteilijän tapaa. Tämä nähdäkseni sopii tilanteisiin, joissa palavan massan

korkeus on merkittävä liekkien kokonaiskorkeuteen asti ja massa palaa kauttaaltaan (esimerkiksi kuormalavapino) tai koko sivultaan (tiivis jätekasa). Toisena mallina esitetään nähdäkseni parhaiten palavien nesteiden vaakasuorille palaville pinnoille sopiva malli, joissa liekit yksinkertaistetaan paloalueen halkaisijan lävistäväksi pystysuoraksi seinämäksi tai pistemäiseksi säteilijäksi. Tässä aluvussa tarkastellaan näitä tapoja.

4.3.1 Palava massa seinämäisenä säteilijänä

VTT tarkasteli eräässä tutkimuksessaan jätekeskusten paloturvallisuutta. Tutkimuksen lämpösäteilytehoa käsittelevässä osassa arvioitiin suojaetäisyyksiä palavien jätteiden paaleista ja varastokasoista vaakasuunnassa vieressä oleviin kohteisiin. Tutkimuksessa palavat jätekasat (paperi, energijae) yksinkertaistettiin säteileviksi seinämiksi. Laskentamekanismina käytettiin aluvussa 4.2 käytettyä tasopintasäteilijää ja näkyvyyskerrointa kuvion 5 osoittamalla tavalla. Säteilevän pinnan lämpötilaksi omaksuttiin liekkien lämpötila, minkä jälkeen laskeminen onnistuu alalukujen 4.2 ja 3.2 mukaisin opein. Näkyvyyskerroin tässä tapauksessa noudattaa aluvussa 4.2 esitettyä tapaa. (VTT 2008, 110.)



Kuvio 5: Tasopinta ja tarkastelupiste (VTT 2008, 110)

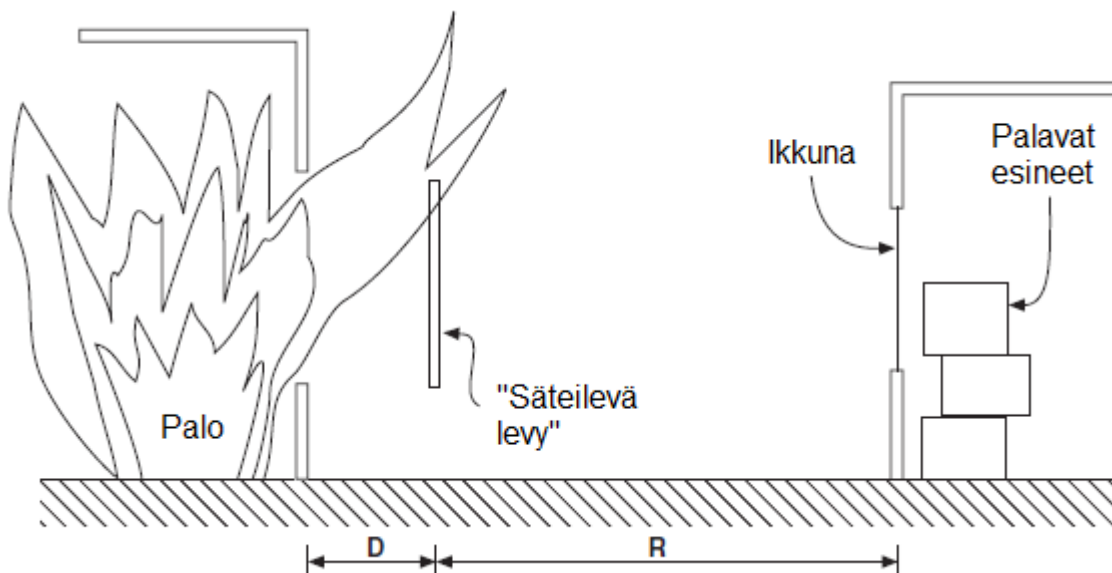
Avoimessa tilassa palavien kiinteiden aineiden liekkien lämpötila-arvoja ei ole helppo löytää, eikä niiden laskeminen mahdu tämän työn rajaukseen. Todettakoon seuraavia erilaisista lähteistä löytyviä tietoja suuntaa antavaksi laskennan pohjaksi.

- SFPE:n mukaan (2016, 148) eräiden kaasujen, kuten metaanin, etaanin, propaanin ja butaanin vapaasti ilmassa palavien liekkien lämpötilat ovat välillä 1173–1419 °C

(alempi syttymisraja). Drysdalen (2011, 32) mukaan vastaavasti 2116–2199 °C (stokiometrinen seos).

- Drysdalen mukaan (2011, 77) eräiden polymeerien, kuten polymetyylimetakrylaatin (PMMA, ”pleksi”), polypropyyleenin ja polystyreenin vapaasti ilmassa palavien liekkien lämpötilat ovat välillä 817–1127 °C.
- Puun palamisen liekkien lämpötilaksi esitetään esimerkiksi 727 °C (SFPE 2016, 3244). Useiden alan teosten tehtävissä lämpötilaksi otaksutaan esimerkiksi 800 °C (esim. Quintiere 2017, 88).

Buchanan lähestyy asiaa vastaavalla tavalla esimerkissään, jossa ikkunasta uloslyövien liekkien aiheuttama lämpösäteily kohdistuu vastapäisen talon seinään ja ikkunan läpi sisällä oleviin palaviin esineisiin. Kuvion 6 mukaisessa tapauksessa ”säteilevä levy” (*notional radiator*) on liekkien lyödessä rikkoutuneesta ikkunasta ulos siitä sopivan etäisyyden D päässä (usein yksinkertaisesti nolla) oleva ikkunan muotoinen ja kokoinen säteilevä levy. Tarkasteltava pinta on tästä levystä etäisyyden R päässä. Levyn lämpötilan Buchanan laskee niin sanotulla standardipalokäyrällä, jossa tavanomaisen suljetun tilan palon lämpötilan kehitys noudattaa kaavaa $T = 345 \log(8 t_b + 1) + T_0$, jossa t_b on palamisen kesto (min) ja T_0 on lähtölämpötila (°C). (Buchanan 2001, 79–81.)



Kuvio 6: Ikkunasta purkautuvan liekkiseinämän säteilyteho (Buchanan 2001, 79–81)

Buchananin (2001, 78) mukaan jos vastaanottavan rakennuksen ikkuna pysyy ehjänä ja julkisivumateriaali on palamatonta, voidaan sisällä olevien esineiden hyväksi laskea ikkunan lämpösäteilytehoa vaimentava vaimennuskerroin 0,5.

4.3.2 Liekkien aiheuttama lämpösäteily

Seuraavaksi esitettävien tapojen soveltaminen vaatii ensiksi lähtötiedokseen liekkien korkeuden. Liekkien korkeuden laskemiseksi voidaan soveltaa ensinnä Heskestadin kaavaa (*the Heskestad plume*) (SFPE 2016, 402; Drysdale 2011, 145; Quintiere 2017, 228; Karlsson ja Quintiere 2000, 52).

$$L = 0,235\dot{Q}^{2/5} - 1,02D$$

jossa

- L on liekkien keskikorkeus
- \dot{Q} on tuttuun tapaan kokonaispaloteho (kW)
- D on paloalueen halkaisija (m). Jos paloalue ei ole ympyrän muotoinen, voidaan tehollinen halkaisija selvittää sovittamalla paloalueen pinta-ala A kaavaan $D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$

Karlsson ja Quintiere (2000, 67) ja Drysdale (2011, 148) esittelevät vaihtoehdoisen tavan (*the McCaffrey plume*). McCaffreyn mallissa liekit jaetaan kolmeen vyöhykkeeseen, jotka ovat jatkuvan liekin alue (*continuous*), hulmuavan liekin alue (*intermittent*) ja nostepatsas (*Plume*).

McCaffreyn kaava itse asiassa laskee korkeuspisteen lämpötilaa, mutta sitä kautta on mahdollista laskea hulmuavan liekin ja nostepatsaan välinen raja, jota voidaan myös pitää palon liekin korkeutena.

$$\Delta T = \left(\frac{\kappa}{0,9 \cdot \sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{1/5}} \right)^{2\eta-1} \cdot T_{\infty}$$

jossa

- \dot{Q} on kokonaissäteilyteho (kW)
- g on luonnollinen putoamiskiihtyvyys maapallolla, jolle tässä työssä käytetään likiarvoa $9,81 \text{ m/s}^2$
- T_{∞} on ympäristön absoluuttinen lämpötila (K)
- z on tarkkailupisteen korkeus
- η (*eta*) ja κ (*kappa*) ovat taulukkoarvoja, jotka tulevat alla olevasta taulukosta 3

Taulukko 3: McCaffreyn vakiot (Karlsson ja Quintiere 2000, 67)

Alue	$z/\dot{Q}^{2/5}$	η	κ
Jatkuva liekki	<0,08	1/2	6,8
Hulmuava liekki	0,08–0,2	0	1,9
Nostepatsas	>0,2	-1/3	1,1

Esimerkin vuoksi lasketaan 6500 kW paloteholla palavan halkaisijaltaan 1,0 metrin tulipalon liekkien korkeuden kummallakin tavalla, ensin Heskestadin mallilla

$$0,235 \dot{Q}^{2/5} - 1,02 D =$$

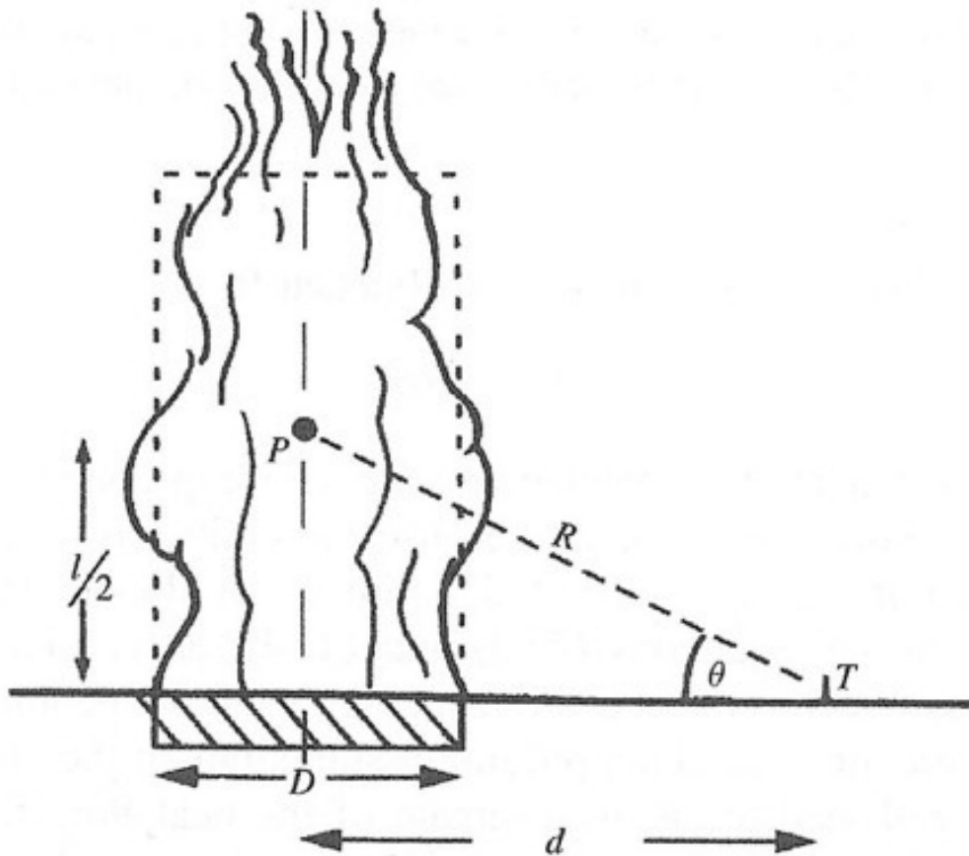
$$0,235 \cdot 6500^{2/5} \text{ kW} - 1,02 \cdot 1,0 \text{ m} \approx \mathbf{6,9 \text{ m}}$$

McCaffreyn mallissa lasketaan korkeuspisteen z arvo siten, että ollaan hulmuavan liekin ja nostepatsaan rajalla. Tällöin edellistä taulukkoa mukaillen tulee olla $z/\dot{Q}^{2/5} = 0,2$, josta johtamalla saadaan $z = \dot{Q}^{2/5} \cdot 0,2$ eli

$$6500^{2/5} \text{ kW} \cdot 0,2 \approx \mathbf{6,7 \text{ (m)}}$$

Kun jatkuvan liekin korkeus on näin laskettu, voidaan siirtyä varsinaisiin säteilytehon laskentamalleihin.

Seuraavaksi tarkastellaan liekkien aiheuttaman lämpösäteilyn laskentaa kolmella helpolla tavalla, tai, kuten Drysdale (2011, 165–168; kts. myös esim. SFPE 2016, 2601–2603) asian ilmaisee, ”*some practical solutions*”. **Ensimmäisen tavan** lähtökohta on alaluvussa 4.1 käsitelty pistemäisen säteilijän malli. Tässä kuvion 7 osoittamassa mallissa säteilyn vastaanotto-piste on samassa tasossa, kuin liekehtivä pinta. Kun säteilyn lähtöpisteeksi kuitenkin yksinkertaistetaan liekkien keskikorkeus (ja keskisyvyys), huomioi kaava tämän pisteen ja tarkastelupisteen etäisyyden trigonometrisen laskentatavan, minkä ohella kaava sisältää mahdollisuuden huomioida tarkastelupisteen ”kallistus” tästä linjasta. Jos sen sijaan kohtisuorassa orientaatioissa olevaksi tarkastelupisteeksi valitaan ”pahin piste” suoraan palon keskipisteen sivulla, voidaan $R; n$ arvona pitää d :tä ja θ :nä nollaa.



Kuvio 7: Liekin lämpösäteily pistemäisen säteilijän mallilla (Drysdales 2011, 167)

Kaava on tässä tapauksessa muotoa

$$q'' = \frac{(X \dot{m} \Delta h_c A_f \cos \theta)}{4 \pi R^2}$$

jossa

- q'' on pisteeseen kohdistuva lämpösäteilyteho (kW/m^2)
- X on säteilytehokkuuskerroin
- Δh_c on palavan aineen lämpöarvo (kW/kg tai MW/kg)
- A_f on paloalueen pinta-ala (m^2)
- l on liekkien korkeus
- θ on kohtisuoraan "lattia"pintaa vastaan olevan tason T tarkastelulinjan välinen kulma
- D on paloalueen tehollinen pinta-ala (m^2)
- d on palon keskipisteen ja tarkastelupisteen vaakasuora etäisyys (m)

- R on etäisyys liekkien keskisyvyydestä ja keskikorkeudesta tarkastelupisteeseen (m). Tämä voidaan laskea etäisyyden d ja liekkien keskikorkeuden l/2 avulla trigonometrisesti.

On huomattava etäisyyttä R tarkasteltaessa, että kaikissa näissä kolmessa nyt käsiteltävässä tavassa vastaanottopiste on palavan nesteen altaan tasossa, eli ”lattian tasossa”. Tämä ei ole epädullisin piste riskienhallinnan kannalta. Epädullisin piste olisi vaakasuorassa palon liekkien keskipisteen kanssa. Jos tätä halutaan tarkastella, kaksi ensimmäistä tapaa toimivat omaksuen etäisyyden R tällaisena vaakasuorana etäisyytenä. Kolmas tapa, Shokri ja Beyler -tapa, omaksuu sisäänrakennetusti tässä esitetyn ”lattian tasossa” olevan tarkastelupisteen.

Lasketaan esimerkin vuoksi 10,0 m halkaisijaltaan D olevan palavan bensiinialtaan tarkastelupisteeseen kohdistama lämpösäteilyteho eri tavoin. Massavirraksi oletetaan 0,055 kg/m²·s, lämpöarvoksi 46,8 MJ/kg, palamisen säteilytehokkuudeksi 0,4 ja etäisyydeksi d 20 metriä. Ensimmäisenä käsitellään edellä esitettyä pistemäisen säteilijän mallia. Lähdetään liikkeelle kokonaispalotehosta alaluvun 3.3 opein.

$$0,055 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 46,8 \text{ MJ/kg} \cdot \pi \cdot (10,0 \text{ m} / 2)^2 \approx \mathbf{202 \text{ MW} = 202000 \text{ kW}}$$

Nyt voimme laskea liekkien keskikorkeuden l/2. Käytetään Heskestadin mallia.

$$(0,235 \cdot 202000^{2/5} \text{ kW} - 1,02 \cdot 10,0 \text{ m}) / 2 \approx \mathbf{10,5 \text{ m}}$$

Lasketaan etäisyys R trigonometrisesti saaden 22,59 m. Lasketaan kulma θ trigonometrisesti saaden 0,48 rad. Lasketaan kulman θ kosini saaden 0,89. Nyt meillä on riittävät tiedot kohdistuvan lämpösäteilytehon laskemiseksi.

$$(0,3 \cdot 202000 \text{ kW} \cdot 0,89) / (4 \cdot \pi \cdot 22,59^2 \text{ m}) \approx \mathbf{8,41 \text{ kW/m}^2}$$

Toinen tapa (Drysdale 2011, 167–168) on ”pystysuoran suorakulmion” malli (*vertical rectangle*), jossa liekit yksinkertaistetaan paloalueen halkaisijan kautta kulkeväksi pystysuoraksi suorakulmioksi $l \times D$. Tässä tapauksessa pinta-alaan suhteutetun palotehon kaava saa muodon

$$Q = \frac{1}{2} (X \dot{m}'' \Delta h_c A_f \cos \theta / l D)$$

jossa notaatio on edellistä kaavaa mukaileva, mutta tulos on MW.

Edellisen esimerkin lähtötiedoin voimme laskea tämän suorakulmion yhden pinnan säteilytehon.

$$1/2 \cdot ((0,3 \cdot 0,055 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 46,8 \text{ MJ/kg} \cdot \pi \cdot (10,0 \text{ m} / 2)^2) / (21,0 \text{ m} \cdot 10,0 \text{ m})) \approx \mathbf{0,144 \text{ MW/m}^2}$$

Tämä luku tulee kuitenkin kertoa vielä näkyvyyskertoimella, joka ottaa huomioon säteilevän pinnan ja tarkastelupisteen spatiaaliset ominaisuudet. Kohtisuoraan liekkien keskipisteestä olevan tarkastelupisteen näkyvyyskerroin olisi luvun 4.2 oppien mukaisesti noin 0,1380, mikä antaisi kohdistuvaksi lämpösäteilytehoksi **19,87 kW/m²**. Alempana käsitellystä Drysdalen (2011, 168) kuvaajasta (kuvaaja 3) nähdään noin **14 kW/m²** arvo. Eron selittää luultavasti se, että Drysdalen esittämässä tavassa vastaanottava piste on ”lattian rajassa”.

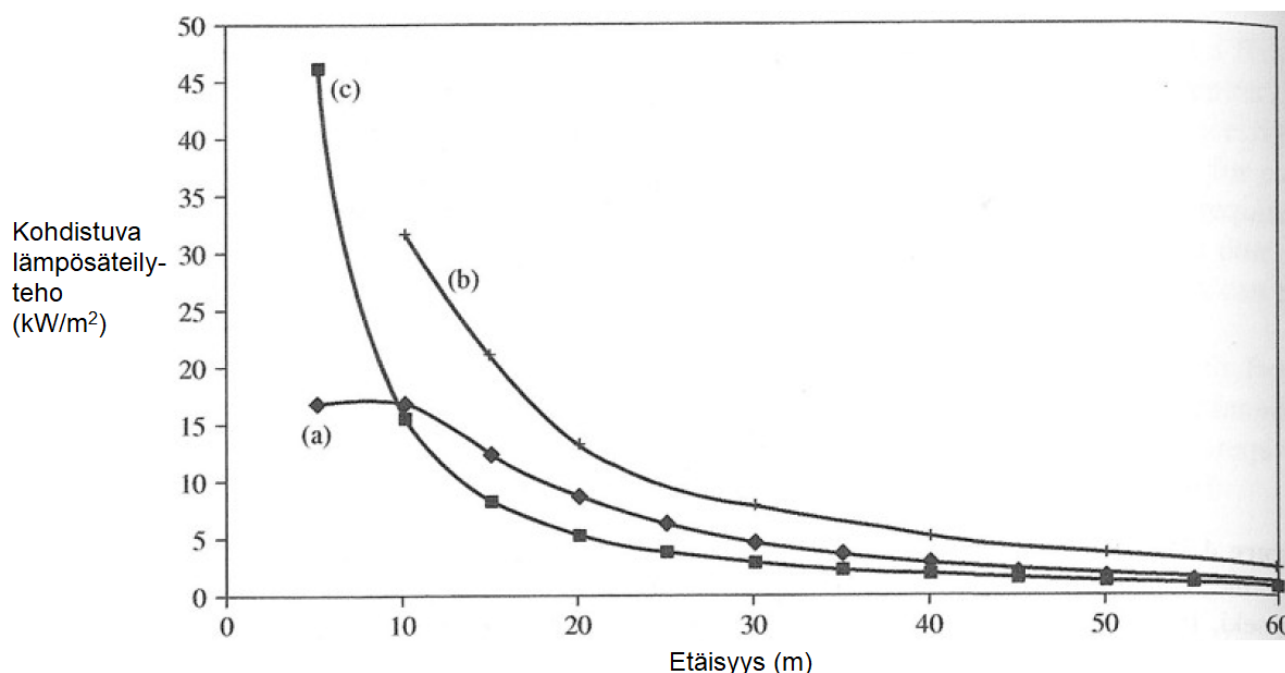
Kolmas tapa (Drysdale 2011, 169; SFPE 2016, 2601) on *Shokri & Beyler* -tapa, jonka kaava on yksinkertainen

$$\dot{q}'' = 15,4 \left(\frac{d}{D}\right)^{-1,59}$$

Notaatio on samanlainen kuin ylempänä, ja tulos on kW/m². Kaavassa ei tarvitse huomioon ottaa palamistehokkuuskerrointa. Edellisiä esimerkkejä mukaillen voidaan nyt laskea

$$15,4 \cdot (20,0 \text{ m} / 10,0 \text{ m})^{-1,59} \approx \mathbf{5,12 \text{ kW/m}^2}$$

Kuten huomataan, tulokset näillä kolmella tavalla hajaavat toisistaan esimerkissä annetuilla arvoilla noin kolmella kertaluvulla. Drysdale (2011, 168) esittääkin, että näiden mallien käytön ehdottomana edellytyksenä on se, että $d > 2D$ ja SFPE (2016, 2604), että $d > 2,5D$. Kuvaaja 3 alla esittää näiden kolmen mallin tulosten hajonnan lämpösäteilyteholle etäisyyden funktiona eräässä laskentatapauksessa. Jää lukijan harkinnan varaan, mitä malleista hän mahdollisesti soveltaa omassa riskienhallintatyössään.



Kuvaaja 3: Eri laskentatapojen eroavaisuudet, lämpösäteilyteho etäisyyden funktiona (Drysdale 2011, 168)
a) pistemäisen säteilijän mallilla, b) pystysuoran suorakulmion mallilla ja c) Shokri & Beyler -tavalla.

4.4 Riskin arvioiminen

4.4.1 Riski omaisuudelle

Tämän työn tavoitteena on lämpösäteilyn aiheuttaman riskin arviointi. Tässä alaluvussa esitetään eri lähteistä koottua tietoa siitä, minkälaisella lämpösäteilyllä on jonkinlaisia tunnettuja vaikutuksia tiedettyihin kohteisiin. Työn rajauksen mukaisesti tarkastellaan sellaisia materiaaleja, joita esiintyy tavanomaisissa asumiseen liittyvissä ulkotiloissa. Lisäksi ihmisen itsensä sietämää lämpösäteilyä tarkastellaan. Lämpösäteilyn sietokyvyn lisäksi riskiä voidaan arvioida sen mukaan, minkälainen lämpötilan nousu säteilyä vastaanottavalla pinnalla voidaan pitää hyväksyttävänä. Lämpötilan nousemiseen tarvittava tieto on alaluvussa 3.2. Tässä tarkoituksessa tässä alaluvussa tarkastellaan erilaisten materiaalien itsesyttymislämpötiloja ja muita lämpötilan nousun vaikutuksia.

Buchanan (2001, 80) esittää seuraavia suurimpia sallittuja kohdistuvan lämpösäteilyn arvoja tapauksessa, jossa palavan rakennuksen aiheuttama lämpösäteily uhkaa naapurirakennusta.

- Muoviset rakennusosat tai irtaimisto 10,0 kW/m²
- Selluloosapohjaiset osat (puu ja puunkaltaiset materiaalit) 12,5 kW/m²
- Ei-palava-aineinen seinä 30 kW/m²

Drysdale (2011, 260, 69) esittää seuraavia syttymisen kannalta kriittisiä lämpösäteilytehoja ja kriittisiä pintalämpötiloja.

- Puu
 - Kriittinen lämpösäteilyn intensiteetti yleisesti ottaen 12 kW/m², vaihteluväli 9,7–14,0 kW/m², välitön syttyminen 29 kW/m²
 - Kriittinen pintalämpötila yleisesti ottaen 350 °C, vaihteluväli 300–364 °C
- Polymeerit
 - Kriittinen lämpösäteilyn intensiteetti keskimäärin 14,7 kW/m², vaihteluväli 11,0–21,0 kW/m²
 - Kriittinen pintalämpötila keskimäärin 331 °C, vaihteluväli 281–366 °C

Vertailun vuoksi voidaan tässä vaiheessa laskea alaluvun 3.2 opein asiaa pinnan lämpenemisen kautta. Oletetaan, että puuseinään kohdistuu $9,7 \text{ kW/m}^2$ lämpösäteilyteho. Emissiivisydeksi oletetaan 0,9. Lasketaan puupinnan lämpötilan nousu.

$$(9,7 \text{ kW/m}^2 / (0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4))^{1/4} \approx 660 \text{ K} \approx 387 \text{ }^\circ\text{C}$$

Jo siis $9,7 \text{ kW/m}^2$ lämpösäteilyteholla puu on vaarassa lämmetä arvoon, jossa se syttyy palaamaan. Edellä esitetty tieto aineen kriittisestä lämpösäteilytehosta ja ulkoisen lämpösäteilytehon lähteen aiheuttamasta kuumentumisesta suhteessa aineen itsesyttymislämpötilaan korreloivat esimerkin valossa kohtuullisesti. Riskinarviossa voidaan siis käyttää hyväksi myös vastaanottavan aineen pintalämpötilan nousua ja sen itsesyttymislämpötilaa. Menetelmän voi arvella sopivan erityisen hyvin nesteille, joiden itsesyttymislämpötila tunnetaan hyvin tarkkaan. Liitteeseen 1 liitetaulukoon 7 on koottu eräille arkipäiväisille aineille kriittisiä lämpösäteilytehoja.

Keski-Rahkonen (1993) esittää, että ikkunat rikkoutuvat noin 11 kW/m^2 lämpösäteilyteholla, mikä on hieman vähemmän kuin selluloosapohjaisille materiaaleille kriittinen lämpösäteilyteho keskimäärin. Tieto on kuitenkin melko vanhaa, ja jo tuolloin ikkunalasimateriaaleissa on epäilemättä ollut merkittäviä eroja. Tässä yhteydessä voidaan palauttaa mieleen alaluvussa 4.3.1 esitetty Buchananin teesi, jonka mukaan ehjänä pysyvän ikkunalasin suoja sen takana olevalle materiaalille voidaan ottaa huomioon kertoimella 0,5.

4.4.2 Riski ihmiselle

Palon kuumuuden aiheuttamat riskit ihmiselle voidaan jakaa kolmeen lajiin, jotka ovat lämpökuormasta seuraava lämpöhalvaus (*heat stroke*), palovammat kehon pinnalla ja hengitysteiden palovammat (SFPE 2016, 2373). Tämän työn rajauksen mukaisesti keskitytään kehon palovammojen aiheutumiseen. Eri lähteet esittävät tämän tapahtuman laskemiseksi ja riskin arvioimiseksi hienostuneita malleja, joissa tarkastellaan ihon eri kerrosten lämpenemistä ja lämpenemisen vaikutuksia fysikaalisbiologisella tasolla (katso esimerkiksi SFPE 2016, 2376–2380 ja koko luku 68). Tässä työssä pitäydymme kuitenkin sen rajauksen mukaisesti seuraavissa helpommissa ja yksinkertaisemmissa laskentamalleissa. Kaikki alla esitetyt mallit vaativat lähtötiedokseen paljaalle iholle kohdistuvan pinta-alaan suhteutetun lämpösäteilytehon suuruuden (\dot{q}'' , W/m^2 tai kW/m^2) ja tuloksena on aika (t , s), jossa haitallinen seuraus syntyy.

SFPE (2016, 2721) esittää seuraavan kaavan sen laskemiseksi, milloin ihminen **tuntee kipua ihollaan**. Alempana raja-arvona on $1,7 \text{ kW/m}^2$, jonka alapuolella kipua ei synny äärettömästä altistumisajasta huolimatta. Kohdistuvan lämpösäteilytehon intensiteetin \dot{q}'' yksikkö on W/m^2 .

$$\text{a) } t_p = \left(\frac{35000}{\dot{q}''} \right)^{1,33}$$

Yhtälöä voidaan korjata aikakertoimella (SFPE 2016, 2721), jos ihon lämpötila ei ole 32,5 °C välillä seuraavasti

$$t_{p2} = t_{t1} \left(\frac{44 - T_{02}}{44 - T_{01}} \right)^2$$

jossa

- T_{p2} on uusi haitallisen seurauksen syntymiseen kestävä aika (s)
- T_{p1} on alkuperäisestä kaavasta saatava aika (s) ihon normaali lämpötilalle
- T_{01} on valittu ihon normaalilämpötila (oletuksena 32,5 °C)
- T_{02} on todellinen ihon lähtökohdasta poikkeava lämpötila (°C)
- 44 on johdettu siitä tiedosta, että ihon kivun tuntemukset ja muut haitalliset seuraukset alkavat ihon lämpötilan noustessa 44–44,8 °C:een (SFPE 2016, 2376 ja 2713)

Esimerkkilaskelma osoittaa, että esimerkiksi SFPE:n (2016, 2714) iholle normaalin aiheenvaihdon ja vahingoittumattomuuden alarajana pitämällä lämpötilalla 20 °C korjauskertoimeksi tulee

$$((44 - 20) / (44 - 32,5))^2 \approx \mathbf{4,36}$$

Tieto ei siis ole merkityksetön esimerkiksi kylmän ulkoilman viilentämän ihon tapauksessa.

Toisen asteen palovammojen syntymisaika voidaan laskea kaavalla (SFPE 2016, 2723)

$$t_{2b} = 300 \left(\frac{\dot{q}''}{1000} \right)^{-1,46}$$

SFPE (2016, 2724) esittää myös yksinkertaisemmat laskentamallit, joissa kohdistuvan lämpösäteilytehon yksikkönä käytetään käytännönläheisemmin yksikköä kW/m² (huom. edellisissä W/m²).

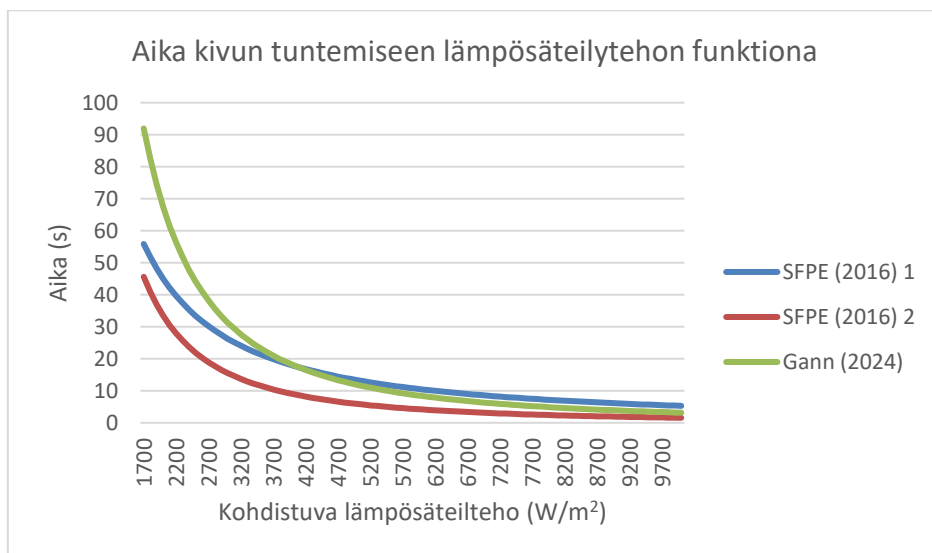
$$t_p = 125(\dot{q}'')^{-1,9}$$
$$t_{2b} = 260(\dot{q}'')^{-1,56}$$

Gann (2024, 85) esittää vastaavat kaavat seuraavasti (min, kW/m²). On huomattava, että Gann esittää yleensä ongelmitta siedettäväksi iholle kohdistuvaksi lämpösäteilytehoksi 2,5 kW/m² (vrt. SFPE:n 1,7 kW/m²).

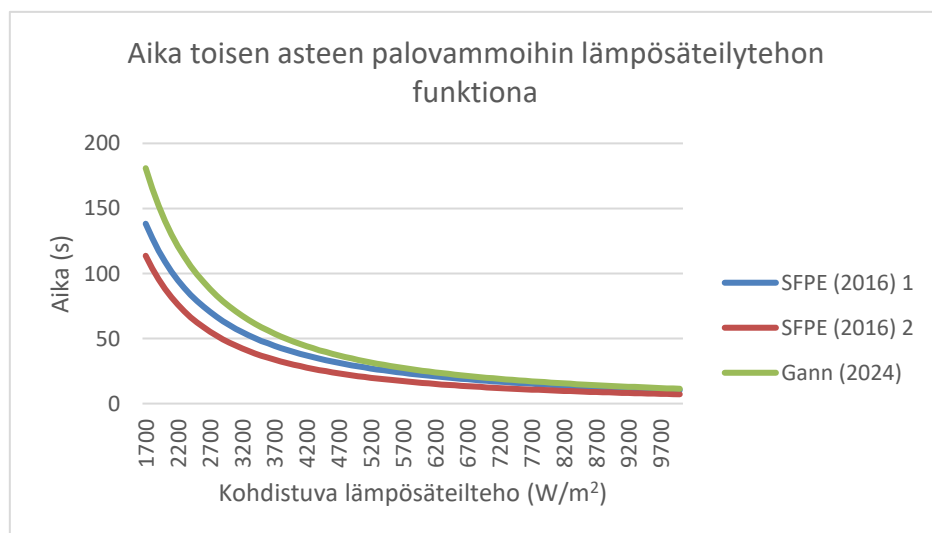
$$t_{pain} = 4,2\dot{q}''^{-1,9}$$

$$t_{burn} = 6,9\dot{q}''^{-1,56}$$

Kuvaajat 4 (kipu) ja 5 (toisen asteen palovammat) esittävät näiden laskentamallien tarjoamat kehitymisajat eri suuruisilla kohdistuvilla lämpösäteilytehoilla. Erot syntyvät muun ohella siitä, että tässä esitetty SFPE:n ensimmäinen malli on vailla varmuuskertoimia. Edellä mainittujen lähteiden mukaan SFPE:n ensimmäisessä mallissa kivun tuntemukseen tulisi käyttää varmuuskertoimena lukua 0,5 ($\leq 6000 \text{ W/m}^2$) tai jopa 0,25 ($> 6000 \text{ W/m}^2$) ja toisen asteen palovammoihin kertoimena 200 nyt käytetyn 300:n sijasta (varmuuskerroin siis 2/3). Tällöin SFPE:n ensimmäiset mallit antavat hyvin tarkasti samat tulokset kuin Gannin malli. Eri laskentatavat tarjoavat siis erilaisen lähestymistavan sen mukaan haluaako käyttäjä varmasti turvallisen raja-arvon vai pikemminkin pienimmän hyväksyttävissä olevan raja-arvon.



Kuvaaja 4: Aika kivun tuntemiseen lämpösäteilytehon funktiona eri laskentamalleilla



Kuvaaja 5: Aika toisen asteen palovammoihin lämpösäteilytehon funktiona eri laskentamalleilla

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että Quintieren (2017, 93) arvo lämpösäteilyteholle, joka aiheuttaa kipua on $\sim 2 \text{ kW/m}^2$, palovammoja $\sim 4 \text{ kW/m}^2$ ja kohteiden syttymistä $10\text{--}20 \text{ kW/m}^2$ ”pitkällä” altistumisajalla. Edellä esimerkiksi SFPE:n yksinkertaisilla kaavoilla laskettuna näillä lämpösäteilytehoilla nämä iho vaikutukset tulevat 33 sekunnissa 30 sekunnissa.

Drysdale (2011, 69) puolestaan esittää, että ihminen tuntee kipua kahdeksan sekunnin jälkeen $6,4 \text{ kW/m}^2$ ja kolmen sekunnin jälkeen $10,4 \text{ kW/m}^2$ sekä saa viidessä sekunnissa toisen asteen palovammoja 16 kW/m^2 lämpösäteilytehosta. Nämä arvot ovat hyvin linjassa edellä SFPE:n kaavoista laskettujen arvojen kanssa.

Yhteenvedonä ihmiseen kohdistuvasta riskistä voidaan ajatella, että esimerkiksi alkusammutusta yrittävän henkilön tulisi kyetä toimimaan noin 30 sekunnin ajan. Palavan kohteen ohittavan henkilön tulisi kyetä sietämään lämpösäteilyä esimerkiksi viiden sekunnin ajan. Oletetaan alkusammutusta suorittaessa hyväksyttävyyden rajaksi kivun tuntemus ja ohittamisessa toisen asteen palovammat. Eri malleilla laskettuna tämä tarkoittaisi sitä, että henkilöön saa kohdistua korkeintaan noin $2,6 \text{ kW/m}^2$ lämpösäteilyteho (alkusammutus) ja $15,3 \text{ kW/m}^2$ lämpösäteilyteho (palopaikan ohittaminen).

5 Soveltaminen – CASE-esimerkit

5.1 Tietokantatarkastelu ja aineistoanalyysi

Tavoitteena oli löytää tarkasteltavaksi sellaisia tapauksia, jotka mahdollisimman hyvin esittäisivät todellisen elämän tulipaloja. Tulipalojen oli kuitenkin sovittava työn tutkimuskysymyksiin ja rajauksiin. Sopivien tapausten löytämiseksi käytettiin pelastustoimen Pronto-tietokantaa.

Sopivan aineiston löytämiseksi tarvittiin riittävän pitkältä aikaväliltä kaikki sellaiset rakennuspalot ja rakennuspalovaarat, joissa syttymä on tapahtunut rakennuksen ulkopuolella. Aineiston hankinnan lähtökohdaksi valitsin ensin virkatyöpaikkani Pirkanmaan pelastuslaitoksen alueen sillä varauksella, että lisää aineistoa hankitaan tarvittaessa laajemmin Suomesta. Aineiston hankinta toteutettiin pyytämällä Pirkanmaan pelastuslaitokselta julkista tietoa rakennusselosteista seuraavin edellytyksin

- Poimintaparametrit
 - Tapahtuma-alue Pirkanmaa
 - Vuosi 2020–2024
 - Rakennuspallo tai rakennuspalovaara minä tahansa onnettomuustyyppinä
 - Syttymiskohta rakennuksen ulkopuoli

- Tarvittavat tiedot selosteittain
 - Vuosi
 - Onnettomuusselosteen numero
 - Onnettomuustyyppit
 - Kuvaus onnettomuustilanteen kehittymisestä
 - Ensimmäisenä syttynyt kohde
 - Tarkempi kuvaus syttymiskohdasta
 - Arvio mikä aiheutti tulipalon
 - Arvio tulipalon syttymissyystä
 - Syttymissyyn tarkempi kuvaus

Tuloksena sain tiedot kaikkiaan 139 tulipalosta. Karkea ensilukeminen aineistoon paljasti, että merkittävässä osassa tapauksista kyse oli siitä, että joko itse rakennuksen rakenteet tai rakennuksessa kiinni oleva tai esimerkiksi sen kuistilla oleva tavara oli syttynyt tai oli sytytetty palaamaan. Tällaisia tapauksia olivat erilaisista valaisimista, kynttilöistä ja lyhdyistä, tupakoinnista, väärin sijoitetusta kuumasta tuhkasta ja tulitöistä lähteneet tulipalot. Eräissä tapauksissa ensin oli syttynyt jokin ulkorakennus tai -rakennelma, kuten huvimaja. Työn rajauksen vuoksi aineistolle tehtiin ensin esikarsinta, jossa tällaiset tapaukset poistettiin. Jäljelle jäi 17 tapausta. Näiden syttymissyyt tyypiteltiin seuraavasti:

- Ajoneuvo tai kulkuneuvo 8 tapausta
- Risujen, roskien tai muun palavan aineksen massan palo 9 tapausta

Ajoneuvojen koko vaihteli henkilöautosta ”täysperävaunulliseen ajoneuvoyhdistelmä vetäjään”. Myös matkailuauto ja kuorma-auto paloivat. Osassa tapauksista ei ollut mainintaa ajoneuvon koosta. Ajoneuvon ajoneuvoluokkaa tai käyttövoimatietoa ei tietopyynnössä pyydetty. Yhdessä tapauksessa saadut tiedot kertoivat, että kyse oli lataushybridistä.

Roskien ja risujen palamisissa kyse oli tapaturmaisesti syttyneestä kantokasasta, tarkoituksella poltetuista risuista, kuormalavoista, halkopinosta, paperista, perunalaatikoista ja nuotiosta. Aina ei ollut aivan selvää, oliko palo levinnyt säteilemällä, maastoa pitkin vai savukaasujen levittämänä. Joka tapauksessa ryhmä on merkittävä.

Tarkasteltaviksi CASE-esimerkeiksi oli edellä esitetyn valossa luontevaa valita ajoneuvo ja puuaineksen massa. Lisäksi työn johdannossa esitellyn SPEK:n jäteastiaoppaan innoittamana tarkasteltiin jäteastiar ryhmää. Kaikissa CASE-esimerkeissä etsittiin se vähimmäissuojaetäisyys, jolla palava kohde ei sytytä lähellä olevan puuverhoillun rakennuksen seinää tuleen. Raja-arvona pidettiin arvoa 10,0 kW/m². Lisäksi laskettiin, miltä etäisyydeltä henkilö voisi suorittaa alkusammutusta kokematta kipua 30 sekunnin altistumisajalla ja miltä etäisyydeltä henkilö voisi pakenemistarkoituksessa sivuuttaa palavan kohteen kärsimättä toisen asteen palovammoja viiden sekunnin altistumisajalla. Näissä raja-arvot pyöristettiin 2,5 ja 15,0 kW/m²:iin SFPE:n yksinkertaisista malleista lasketuista tuloksista.

5.2 Case 1: Ajoneuvo

Tarkastellaan ajoneuvoa ensiksi alaluvun 3.5.2 mukaisesti esineenä, jolle on tiedossa kokonaispaloteho. SFPE:n aineiston mukaan tyypillinen henkilöauton kokonaispaloteho on 3500–5000 kW ja VTT:n mukaan 5800–9100 kW. Fire Safety Journalin testissä (Dehghani 2025) kokonaispalotehot olivat 6200 ja 11800 kW. Näiden tietojen karkea aritmeettinen keskiarvo (\bar{Q}) on 6900 kW.

Tarkastellaan ajoneuvoa ensin pistemäisenä säteilijänä. Korjataan kokonaispalotehoa vain säteilytehon huomioon ottavaksi kertoimella X, joksi valitaan Dehghanian ym. (2025, 5) mukailleen 0,25.

$$\dot{q}'' = 6900 \text{ kW} \cdot 0,25 = \mathbf{1725 \text{ kW}}$$

Luodaan nyt alaluvun 4.1. pohjalta kaavat, joilla riittävät suojaetäisyydet saavutetaan suurimman siedettävän lämpösäteilytehon ja kokonaispalotehon kautta 1725 kW säteilyteholla. Lähikohtaisesti

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{Q}}{4\pi r^2}$$

josta saadaan

$$r = \sqrt{\frac{\dot{Q}}{\dot{q}'' 4 \pi}}$$

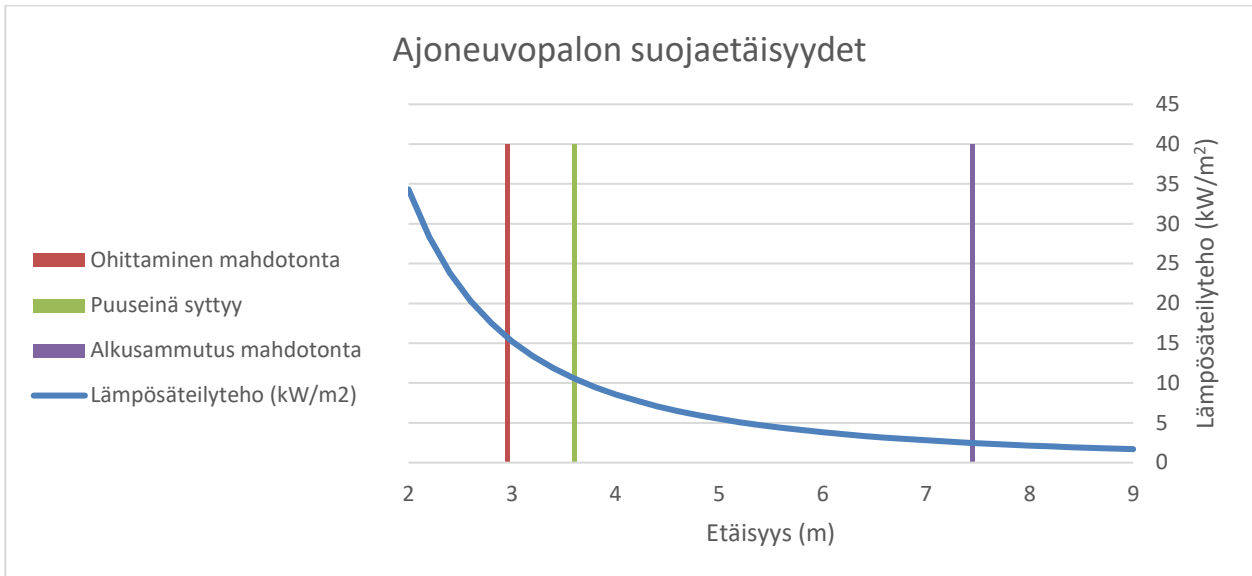
ja edelleen alkusammuttamiselle, puupinnalle ja ohittamiselle turvallinen etäisyys ajoneuvon keskipisteestä.

$$\text{Alkusammuttaminen (2,5 kW/m}^2\text{): } \sqrt{\frac{1725 \text{ kW}}{2,5 \text{ kW/m}^2 4 \pi}} \approx \mathbf{7,4 \text{ m}}$$

$$\text{Puupinta (10,0 kW/m}^2\text{): } \sqrt{\frac{1725 \text{ kW}}{10,0 \text{ kW/m}^2 4 \pi}} \approx \mathbf{3,7 \text{ m}}$$

$$\text{Ohittaminen (15,0 kW/m}^2\text{): } \sqrt{\frac{1725 \text{ kW}}{15,0 \text{ kW/m}^2 4 \pi}} \approx \mathbf{3,0 \text{ m}}$$

Kuvaaja 6 alla esittää yllä lasketun ajoneuvopalon säteilytehon etäisyyden funktiona. Kuvaajaan on merkitty riskinarvioinnin kannalta merkitykselliset kohdat.



Kuvaaja 6: Ajoneuvopalon suojaetäisyydet

Tarkastellaan toisena lähestymistapana ajoneuvoa palavana seinämänä. Dehghanin ym. (2025) kokeissa ajoneuvot olivat Chevrolet Bolt ja Tesla Model 3. Ajoneuvojen pituus ja leveys ovat julkisten tietojen mukaan keskimäärin 4,3 m ja 1,8 m. Jatkuvien liekkien korkeus voidaan laskea McCaffreyn kaavalla, jolla saadaan tulokseksi 2,75 m. Liekkien lämpötilaksi otaksutaan synteettisille polymeereille hyvin konservatiivinen 800 °C.

Lasketaan alaluvun 3.2 opein ensin pinta-alaan suhteutettu säteilyteho. Oletetaan liekkiseinämän emissiivisyydeksi 1.

$$\dot{Q} = 5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4 \cdot (800 + 273,15)^4 \text{ °C} \approx \mathbf{75 \text{ kW/m}^2}$$

Liekkiseinä voidaan sijoittaa ajoneuvon kyljelle. Tarkastellaan tämän pisteen keskikohdasta kohtisuoraan ulospäin sijaitsevan pisteen kohtaamaa lämpösäteilytehoa edellisessä laskelmassa käytetyin rajoin ja käyttäen alaluvussa 4.2 esitettyä tasopintasäteilijän ja näkyvyyskerroimen teoriaa. Voidaan laskemalla todeta, että

- korkeintaan 2,5 kW/m² lämpösäteilytehoon vaaditaan noin 10,5 metrin etäisyys (näkyvyyskerroin noin 0,0329)
- korkeintaan 10 kW/m² lämpösäteilytehoon vaaditaan noin 5,0 metrin etäisyys (näkyvyyskerroin noin 0,1286)
- korkeintaan 15,0 kW/m² lämpösäteilytehoon vaaditaan noin 3,9 metrin etäisyys (näkyvyyskerroin noin 0,1935)

Huomataan, että tällä tavoin laskemalla palavan alueen koko tulee huomioiduksi, ja tarvittavat suojaetäisyydet kasvavat, joskin eroa kaventaa se, että pistemäisen säteilijän lähde on ajoneuvon keskellä, eli karkeasti 0,9 m kauempana (puolet ajoneuvon leveydestä).

Denghanin ym. (2025) tutkimuksessa todettiin ajoneuvojen keskilinjasta 2,74 m eli noin kahden metrin päässä ajoneuvojen laidoista olevissa mittauspisteissä suurimmiksi kohdistuviksi säteilytehoiksi noin 28 kW/m² ja 18 kW/m², eli keskimäärin 22 kW/m².

Laskemalla edellisten esimerkkien tiedoilla pistemäisellä mallilla saadaan etäisyydellä 2,74 m tulokseksi 18,28 kW/m² ja seinämäisellä säteilijällä 24,25 kW/m². Tässä tehdyt laskelmat antavat siis hyvin samansuuntaisia tuloksia Denghanin ym. mittaustulosten kanssa.

5.3 Case 2: Puuaineksen massa

Kuten edellä todettiin, puuaineksen massa voi olla esimerkiksi kuormalavoja, halkopinoja tai puisia perunalaatikoita. Voidaan arvioida, että yhteistä näille on vaihteleva pinoamistiheys ja pinon "sauvojen" (toisin sanoen klapien, halkojen, lautojen ja vastaavien) pituus- ja paksuusominaisuudet. Puuaineksen massaa käsitellään tässä CASE-esimerkissä Babrauskasin kaavan kautta alaluvun 3.4.2 mukaisesti. Koska työn yhtenä tarkoituksena on johtaa helposti käytännön työssä käyttökelpoisia nyrkkisääntöjä, tarkastellaan asiaa puumassan leveyden funktiona arvioiden edellisen CASE-esimerkin mukaisesti sitä, kuinka etäältä onnistuu palavan massan alkusammuttaminen (30 s altistumisaika) ja ohittaminen (5 s altistumisaika) sekä kuinka suuri suojaetäisyys tulisi olla palava-aineiseen materiaaliin (puu).

Oletetaan puumassan olevan tarkastelupisteeseen nähden syvyydeltään 1,0 m ja korkeudeltaan 1,0 m. Leveys vaihtelee yhden ja kolmen metrin välillä. Kyseessä on siis esimerkiksi merkittävän kokoinen kuormalavapino tai 1–3 "heittomotin" suhteellisen harvaan pinottu polttopuumassa. Suhteelliseksi kosteudeksi oletetaan 20 %. Puun palamisen säteilytehoksi oletetaan 0,3. Puun lämpöarvoksi oletetaan 17 MJ/kg, mikä korjataan Babrauskasin kaavaan kertoimella $17 / 12 \approx 1,42$.

Lasketaan ensin puumassan paloteho Babrauskasin pohjapinta-alaperusteisella kaavalla korjattuna säteilytehokkuuskertoimella, lämpöarvokertoimella ja eri pinonleveyksillä eli pohjapinta-aloilla

- 1,0 metriä leveä kasa: $919 \cdot (1 + 2,14 \cdot 1,0 \text{ m}) \cdot (1 - 0,03 \cdot 0,2) \cdot 0,3 \cdot 1,42 \cdot 1 \text{ m}^2 \approx$
1222 kW
- 2,0 metriä leveä kasa: $919 \cdot (1 + 2,14 \cdot 1,0 \text{ m}) \cdot (1 - 0,03 \cdot 0,2) \cdot 0,3 \cdot 1,42 \cdot 2 \text{ m}^2 \approx$
2444 kW

- 3,0 metriä leveä kasa: $919 \cdot (1 + 2,14 \cdot 1,0 \text{ m}) \cdot (1 - 0,03 \cdot 0,2) \cdot 0,3 \cdot 1,42 \cdot 3 \text{ m}^2 \approx$
3666 kW

Yhdestä kolmeen metriä leveän puumassan tiivistäminen pistemäiseksi säteilijäksi sisältää toki omat ongelmansa, mutta käytämme sitä yksinkertaisuuden vuoksi. Käyttämällä edellisen alaluvun periaatetta, jossa alkusammuttamiselle, puun suojaetäisyydelle ja ohittamiselle käytetään vastaavia suurimpia kohdistuvia säteilytehoja 2,5, 10,0 ja 15,0 kW/m², saadaan seuraavat taulukon 4 mukaiset suojaetäisyydet.

Taulukko 4: Valmiiksi laskettuja suojaetäisyyksiä palavalle puumassalle

Puumassan leveys (m)	Toiminto	Suojaetäisyys (m)
1,0	Alkusammuttaminen	6,2
1,0	Puun suojaetäisyys	3,1
1,0	Ohittaminen	2,5
2,0	Alkusammuttaminen	8,8
2,0	Puun suojaetäisyys	4,4
2,0	Ohittaminen	3,6
3,0	Alkusammuttaminen	10,8
3,0	Puun suojaetäisyys	5,4
3,0	Ohittaminen	4,4

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että 1,0 m syvälle ja 1,0 m korkealle puupinolle tarvitaan siis yllä olevan valossa seuraavat suojaetäisyydet palaviin puupintoihin (korkeintaan 10 kW/m²)

- 1,0 m leveä puupino suojaetäisyys 3,1 m
- 2,0 m leveä puupino suojaetäisyys 4,4 m
- 3,0 m leveä puupino suojaetäisyys 5,4 m

SPEK (2025, 8–11) puolestaan tarjoaa seuraavat suojaetäisyydet

- alle 1,5 m leveät ja korkeat palavien materiaalien kasat suojaetäisyys 4 m
- 2–4 m leveät ja korkeat palavien materiaalien kasat suojaetäisyys 6 m
- 4–6 m leveät ja korkeat palavien materiaalien kasat suojaetäisyys 8 m
- yleisesti ottaen suojaetäisyys on ”kappaleen leveys + 2,5 m”

Karkeasti tarkasteltuna edellä tehdyt laskelmat ja SPEK:n esittämät suojaetäisyydet vaikuttavat osuvan samoihin suuruusluokkiin.

5.4 Case 3: Jäteastiaryhmä

Jäteastioiden tulipalot eivät Pronto-aineistoanalyysissä nousseet merkityksellisesti esiin. Voidaan spekuloida, johtuuko tämä siitä, että jäteastioiden ja jätekatosten suojaetäisyydet ovat yleisesti ottaen kunnossa. Joka tapauksessa jäteastioiden sijoittaminen suhteessa rakennukseen on ollut yhteiskunnallisessa keskustelussa erityisesti ns. jätesäädöspaketin eli vuonna 2021 voimaan tulleiden jätelain (646/2011) muutosten ja uuden jätteistä annetun valtioneuvoston asetuksen (978/2021) vuoksi. Tuolloin lisättiin jätteiden lajitteluvollisuuksia käytännössä kaikissa asumismuodoissa, mikä käytännössä tarkoitti aikaisempaa useampia jäteastioita suurimmalla osalla kiinteistöjä. Käytännön valvontatyössä olemmekin törmänneet esimerkiksi vaikeuksiin siinä, että pienillä omakotitalokiinteistöillä on vaikeuksia saada yhdestä jäteastiasta jäteastiaryhmäksi muuttunut jättepiste sopimaan esimerkiksi SPEK:n (2025) oppaan suojaetäisyyksiin.

Jäteastioiden suurimpia palotehoja löytyy kirjallisuudesta melko runsaasti. Erilaisia ja eri jätteitä sisältäviä jäteastioita on poltettu erilaisissa kalorimetrialteistoissa useissa kokeissa. Mitoituspaloskenaarion valitsemisessa vaikeuksia tuottaa lähinnä kaksi asiaa. Ensinnä se, että luonnollisesti kaikki jätteet eivät pala samalla tavalla. Vaikka toki kaikissa tapauksissa muovipohjaisesta materiaalista tehty jäteastia itsessään on merkittävä palokuorma, lienee kokonaispalotehossa selvä ero vaikkapa metallijätteen tai biojätteen keräämiseen käytetyllä jäteastialla verrattuna muovi- tai pahvijäteastiaan. Toinen ongelma liittyy säteilytehokkuuskertoimen valintaan. Pintapuolisten yleisen tietoverkon tietojen valossa jäteastiat tehdään yleensä HDPE:stä tai polypropeenista. Esimerkiksi muovijäte muodostuu pääosin polyeteenistä, polypropeenista tai polyvinyylidikloridista, pahvi- ja paperijäte puolestaan selluloosapohjaisista materiaaleista. Tässä CASE-esimerkissä sivuutetaan jätelajike ja käytetään viitatuissa kokeissa saatua kokonaispalotehoa sellaisenaan. Säteilytehokkuuskertoimeksi valitaan keskimäärin synteettisiä polymeerejä ja selluloosaa kohtuullisesti edustava 0,3.

Pientalojen jäteastioiden voidaan yleisen elämäkokemuksen perusteella sanoa olevan tilavuudeltaan yleensä noin

240 litraa, asunto-osakeyhtiön jäteastioiden puolestaan 660 litraa (kuva 1). SPEK (2025, 9) kohtelee näitä saman arvoisina, mutta tässä CASE-esimerkissä tarkastellaan kahta erilaista skenaariota. Ensimmäisessä tarkastellaan pientalon kolmen 240 litran jäteastian ryhmää, toisessa asunto-osakeyhtiön viiden 660 litran jäteastian ryhmää. Näin siksi, että asunto-osakeyhtiöitä koskee monipuolisempi lajitteluvollisuus ja niissä jätettä syntyy nopeammalla tahdilla vaatien suuremmat astiakoot.



Kuva 1: Jäteastioiden tavallisimmat koot (Salpakierto 2025)

Skaalataan ensin sopivat palotehot edellä alaluvussa 3.5.2 saaduista tiedoista taulukkoon 5 kertomalla kokonaispaloteho astian kokotietojen suhdeluvulla. Korjataan tulosta vielä säteilytehokkuuskertoimella 0,3. Todetaan, että 240 l jäteastialle voidaan käyttää karkeasti 230 kW ja 660 l jäteastialle karkeasti 1360 kW säteilytehoa. Kolmen 240 l jäteastian ryhmässä teho kertaantuu 690 kW:iin ja viiden 660 l astian ryhmässä 6800 kW:iin.

Taulukko 5: Skaalatut ja tehokkuuserroin korjatut jäteastioiden palotehot

Koko (l)	Paloteho (kW)	Vertailukoko (l)	Skaalattu paloteho (kW)	X:llä (0,3) korjattu paloteho
136	450	240	794	238
70–120 (95)	300	240	758	227
364	2500	660	4533	1360

Lasketaan jälleen alaluvun 5.2 tavoin pistemäisen säteilijän periaatteella sellaiset suojaetäisyydet, jotka mahdollistavat alkusammuttamisen (2,5 kW/m² 30 s altistuminen), eivät johda puunpinnan syttymiseen (10,0 kW/m²) ja mahdollistavat turvallisen nopean ohittamisen (15,0 kW/m² 5 s altistuminen). Tulokset on koottu taulukkoon 6.

Taulukko 6: Valmiiksi lasketut suojaetäisyydet jäteastioiden paloissa

Jäteastiakoko (l) ja paloteho (kW)	Toiminto	Suojaetäisyys (m)
3 x 240, 690	Alkusammuttaminen	4,7
3 x 240, 690	Puunpinnan suojaetäisyys	2,3
3 x 240, 690	Ohittaminen	1,9
5 x 660, 6800	Alkusammuttaminen	14,7
5 x 660, 6800	Puunpinnan suojaetäisyys	7,4
5 x 660, 6800	Ohittaminen	6,0

Verrataan jälleen yleisesti käytettyyn lähteeseen. Saavutetut suojaetäisyydet palava-aineiselle pinnalle näissä laskelmissa ovat siis

- kolmen 240 l jäteastian ryhmälle 2,3 m

- Viiden 660 l jäteastian ryhmälle 7,4 m

SPEK (2025, 11) esittää ”useamman roska-astian rivistölle” suojaetäisyydeksi kuusi metriä. Suuntaa antavana yhteenvetona voidaan todeta, että pienempien astioiden lukumäärältään vähäisemmille ryhmille (tyypillinen omakotitalon jätepiste) kuuden metrin suojaetäisyys saattaa olla yliampuva. Suurempien jäteastioiden suuremmille ryhmille kuuden metrin suojaetäisyys osuu hyvin kohdilleen, pahimmassa tapauksessa ollen jopa alakanttiin.

6 Työn toiminnallisen tuotoksen esittely

Työssä pitäydettiin laskentamalleissa, joita voidaan käsitellä tavallisella funktiolaskimella ja MS-Excelin kaltaisella taulukkolaskentaohjelmalla. Siitä huolimatta osa kaavoista on verrattain pitkäköjiä ja monimutkaisia. Esimerkkinä tästä käy McCaffreyn liekinkorkeuskaava, jonka osana on monen tekijän muodostaman eksponentin potenssilasku, jonka kantalukuna on murtoluku, jonka nimittäjään korotetaan omaan potenssiinsa.

Näiden laskujen laskeminen joka kerta funktiolaskimella on työlästä ja syöttämisessä tapahtuville kirjoitusvirheille altista. Laskentataulukko-ohjelmaan syötettynä niiden käyttäminen moneen kertaan erilaisilla lähtöarvoilla on nopeampaa ja tehokkaampaa, mutta verrattain monimutkaisten kaavojen antaminen taulukkolaskentaohjelman yleensä käyttämässä lineaarisessa muodossa vaatii perehtymistä ja huolellisuutta.

Tämän opinnäytetyön osana valmistettiin MS-Excel-laskentataulukko-ohjelmalla kyseisen ohjelma tiedostomuodossa oleva työkirja, jonka laskentataulukot on valmiiksi rakennettu käyttämään tässä työssä esitettyjä laskentamalleja (Kuva 2). Laskentataulukoihin on lisäksi asianomaiseen yhteyteen koottu samat lähtötietotaulukot, jotka ovat tämän työn liitteessä 1. Tähän opinnäytetyöhön perehtyvällä on näin käytössään yksi valmis laskentatyökalu, jolla laskea tässä työssä esitettyjä säteilyteholaskelmia.

Työkirja on suojattu muuttamiselta siten, että vain niihin soluihin voi käyttäjä syöttää tietoa, joihin annetaan laskennassa käytettäviä lähtötietoja. Muut solut on suojattu siten, että niitä voidaan valita, mutta niiden sisältöä ei voida muuttaa. Näin työn ulkoasu ja rakenne sekä laskentaa suorittavat kaavasolut pysyvät muuttumattomina, mutta käyttäjä voi nähdä solun sisällön, esimerkiksi laskentakaavan. Työkirja on osa tätä julkista opinnäytetyötä ja sen levittäminen ja käyttäminen on sallittua samoin kuin opinnäytetöiden yleensä.

Tällä työkalulla voi laskea suorakulmion muotoisen tasopintasäteilylähteen aiheuttaman lämpösäteilyn intensiteetin tietyllä etäisyydellä olevaan tarkastelupisteeseen.			
Työkalu olettaa, että tarkastelupiste on kohtisuorassa kulmassa tasopinnan keskikohtaan tasopinnan keskikohtaan kohdalla etäisyyden R päässä kuvan osoittamalla tavalla.			
Jos tarkastelupiste sijaitsee tasopinnalla, joka ei ole samansuuntainen säteilevän pinnan kanssa, tulee käyttää kulmakerrointa, jolla säteilyintensiteetti vaimenee kulman mukaisesti			
Syötettävät laskentasuureet		Yksikkö	Tunnus
Säteilevän pinnan lämpötila (°C)	800	T	°C
Säteilevän pinnan emissiivisyys	1		ε
Tarkastelupisteen pinnan kulman poikkeus	0	°	θ
Samansuuntaisen pinnan kulman poikkeus on 0°			
Säteilevän pinnan korkeus	2,75	m	H
Säteilevän pinnan leveys	4,3	m	W
Tarkastelupisteen etäisyys	1,84	m	R
Laskenta		Yksikkö	Tunnus
Säteilevän pinnan lämpötila (°K)	1073,15	°K	T
Säteilypinta-ala	11,825	m ²	A
Stefan-Boltzmann -vakio	5,67E-11	kW/m ² ·K ⁴	σ
Pinnan säteilyintensiteetti	75,20	kW/m ²	E = ε σ T ⁴
Näkyvyysskerroin	0,5055		φ
Vastaaanottavan pinnan kulmakerroin	1,000		Ω
Tarkastelupisteeseen kohdistuvan säteilyn intensiteetti	38,01	kW/m ²	I = E φ Ω

$$\phi = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{H/2}{\sqrt{H/2 + R^2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{W/2}{\sqrt{H/2 + R^2}} \right) + \left(\frac{W/2}{\sqrt{W/2 + R^2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{H/2}{\sqrt{W/2 + R^2}} \right) \right]$$

Kuva 2: Excel-työkirjan tasopintasäteilylää laskeva laskentataulukko

7 Loppusanat

7.1 Yhteenveto

Lämpöenergia siirtyy tulipalossa kolmella tavalla: Johtumalla, kuljettumalla ja säteilemällä. Näistä kuljettuminen ja säteileminen ovat tulipalossa merkitsevät siirtymistavat.

Työn ensimmäisessä osassa tarkasteltiin palotapahtuman säteilemän lämpösäteilytehon selvittämistä. Yksinkertaisin lämpösäteilyn siirtymisen laskentatapa perustuu pinnan lämpötilaan, jonka neljäs potenssi kerrotaan Stefan-Boltzmann-vakiolla ($5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$) ja epätäydellisen säteilyn huomioon ottavalla emissiivisyyskertoimella ($0 < \varepsilon < 1$). Lopputulos on pinta-ala-suhteellinen siten, että se on yksikössä kW/m^2 . Todellinen säteilyteho on siis tämän ja pinnan todellisen pinta-alan tulo.

Varsinaisen tulipalon palotapahtuman lämpösäteilyteholle esitettiin kaksi massavirtaperusteista laskentatapaa. Molemmissa palon lämpösäteilytehokkuuslaskelma on tulo, jossa tekijöinä on aineen lämpöarvo (MJ/kg tai kJ/g), palamisen säteilevän lämmönsiirto-osuuden huomioiva kerroin ($0 < X < 1$), palavan aineen pinta-ala (m^2) ja massavirta ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$). Massavirran laskemiseksi esitettiin kaksi mallia. Zabetakis-Burgess-malli sopii erityisesti nestepaloille. Tewarson-Pion-malli puolestaan sopii myös kiinteille aineille.

Omana erityistapauksenaan käsiteltiin puun palamista. Puun palaminen on monimutkainen tapahtuma, ja sen teoreettinen mallintaminen on hankalaa. Puun palamisen laskennalliseksi mallintamiseksi esitettiin eräitä polttokokeiden tuloksista johdettuja tuloksia parhaiten kuvaavia yhtälöitä.

Viimeisenä tulipalon säteilytehon määrittämistapana esitettiin mitoituspaloja eli sellaisia polttokokeiden tuloksia, joissa palamistehokkuutta mitataan kalorimetreillä ja mahdollisesti lämpösäteilyantureilla on mitattu oikeiden esineiden palamistapahtumia. Tällaisia valmiita tuloksia voidaan käyttää lähtökohtana, kunhan erotetaan kokonaispalotehosta säteilytehon osuus.

Työn toisessa osassa tarkasteltiin sitä, miten voidaan määrittää tietyssä paikassa tietyllä etäisyydellä palosta olevan tarkastelupisteen vastaanottaman lämpösäteilyn intensiteetti. Ensimmäinen tarkasteltava malli oli pistemäinen säteilijä, jossa palotapahtuma yksinkertaistetaan pistemäiseksi singulariteetiksi, joka säteilee kolmiulotteiseen avaruuteen pallomaiselle alueelle ympärilleen. Toinen tarkastelutapa oli seinämämäinen tasopintasäteilijä, jonka keskipisteestä kohtisuoraan ulospäin tarkastelupiste sijaitsee. Tämä tarkastelutapa ottaa huomioon säteilevän seinämämäisen pinnan ulottuvuudet ja sen koon suhteen tarkastelupisteen etäisyyteen. Kolmantena taparyhmänä esitettiin eräitä lähinnä kokeellisesti selvitettyjä ja kokeiden

perusteella matemaattisesti yleistettyjä tapoja määrittää tarkastelupisteen vastaanottama säteilytehointensiteetti.

Näiden kahden vaiheen jälkeen tarkasteltiin lämpösäteilytehon intensiteetin aiheuttamaa riskiä tarkastelupisteen laadun mukaisesti. Yksinkertaistaen voidaan todeta, että yleensä palava-aineisille pinnoille on syytä soveltaa suojaetäisyyttä, jolla tarkastelupisteeseen kohdistuu korkeintaan 10–12 kW/m² lämpösäteilyintensiteetti. Ihmisten toiminnan raja-arvoiksi asetettiin sellaiset suojaetäisyydet, joissa ihminen voi joko suorittaa alkusammutusta (korkeintaan 2,5 kW/m² 30 sekunnin ajan) tai ohittaa palopaikan pakenemistarkoituksessa (korkeintaan 15 kW/m² viiden sekunnin ajan).

Työn viimeinen vaihe oli edellä kuvatun soveltaminen CASE-esimerkkeihin. CASE-esimerkkien todenmukaisuuden pohjustamiseksi pyydettiin Pirkanmaan pelastuslaitokselta vuosien 2020–2024 ajalta kaikki rakennuksen ulkopuolelta alkaneet tulipalot, joissa jonain onnettomuustyyppinä oli rakennuspallo tai rakennuspalovaara. Saatujen 139 tulipalon joukosta erotettiin sellaiset suuret ryhmät, joissa alkupallo oli ollut rakennuksen lähellä ollut irtain esine. Kaksi suurta ryhmää olivat ajoneuvot ja risujen, roskien tai vastaavat palavan aineksen kasat. Näiden ja työn johdannossa esiteltujen lähtökohtien vuoksi CASE-esimerkeiksi valittiin henkilöajoneuvo, puuaineksen massa ja kaksi erikokoista jäteastiar ryhmää. Puuaineksen massan malli oli kuormalavapino, jonka syvyys ja korkeus olivat 1,0 m ja tarkastelupistettä kohti olevan sivun pituus yhdestä kolmeen metriä. Ensimmäinen jäteastiar ryhmä oli pientalolle tyypillisempien pienempien jäteastioiden kolmen ryhmä. Toinen ryhmä oli asunto-osakeyhtiökokoluokan ryhmä, jossa oli viisi suurempaa jäteastiaa. Kaikissa kolmessa tapauksessa käytettiin vaihtelevia laskentamalleja tietyille etäisyydelle kohdistuvan lämpösäteilyn intensiteetin määrittämiseksi. Kaikissa tapauksissa määritettiin yllä kuvailut turvaetäisyydet alkusammuttamiselle, palava-aineiselle rakennusmateriaalille ja nopealle pakenemisenomaiselle ohittamiselle.

Palavan ajoneuvon nopea ohittaminen osoittautui mahdolliseksi 3,9 metrin päästä, suojaetäisyys palava-aineiselle seinälle määritettiin 5,0 metriin ja alkusammuttaminen turvalliseksi 10,5 metrin päästä.

Puuaineksen massan suojaetäisyydet vaihtelivat massan pituuden mukaan 2,5–4,4 m välillä ohittamiselle, 3,1–5,4 m välillä palava-aineisen rakennuksen seinustalle ja turvallinen alkusammuttaminen mahdolliseksi 6,2–10,8 m välillä olevalta etäisyydeltä.

Jäteastioiden suojaetäisyydet olivat pienellä jäteastiar ryhmällä 1,9 m (ohittaminen), 2,3 m (etäisyys rakennukseen) ja 4,6 m (alkusammuttaminen). Suurella jäteastiar ryhmällä vastaavat luvut olivat 6,0 m, 7,4 m ja 14,7 m.

Todettiin myös, että kahden jälkimmäisen CASE-esimerkin laskennalliset tulokset olivat hyvin linjassa johdannossa viitatus SPEK:n *Pihan jäteastiat ja tuhopolttojen torjunta* -oppaassa

esitetyn kanssa. Todettiin kuitenkin, että pienillä omakotitalomaisilla jäteastiaryhmillä oppaan esittämät suojaetäisyydet olivat ehkä jonkin verran konservatiiviset huomioon ottaen, että pienillä omakotitalotonteilla on haasteita saavuttaa tällaisia suojaetäisyyksiä. Toisaalta viiden suuren jäteastian ryhmällä oppaan esittämä kuusi metriä vaikuttaa jopa hieman optimistiselta. Tässä työssä esitettyjen laskelmien valossa suojaetäisyys saisi isoimmilla jäteastiaryhmillä olla lähempänä kahdeksaa metriä.

7.2 Työn luotettavuus ja tarkkuus

Työn luotettavuutta tarkasteltaessa on kysyttävä, onko työssä onnistuttu löytämään parhaiten soveltuvat palotekniset laskentamallit ja laskentatietoa niiden käyttämiseksi. Paloteknisestä laskennasta on julkaistu hirvittävä määrä tutkimuksia ja kirjallisuutta. Kaiken tutkimuksen ja kirjallisuuden lukeminen olisi työn laajuus huomioon ottaen kohtuuton urakka. Kirjallisuuskatsauksessa oli siis tyydyttävä jonkinlaiseen saturaatiopisteeseen sen suhteen, milloin merkittävää uutta tietoa ei enää löydy.

Tässä tapauksessa lähestulkoon koko työn tietoteoreettisen pohjan olisi voinut koota vain *SFPE:n Handbook of fire protectionista* (SFPE 2016), jonka kolmea volyymia yli 3500 sivulaan tunnutaan pitävän alalla ylivoimaisena lähdeoteksena. Tämä ei luonnollisesti ole riittävä vastaus siihen, onko nyt nähty riittävästi vaivaa kaiken kohtuudella saatavissa olevan tiedon löytämiseksi. Sen vuoksi tämän työn kirjallisuuskatsauksessa pyrittiin tutustumaan kaikkiin saatavilla oleviin sopiviin lähdeoteksiin rajauksella, että kyseessä olisi julkaistu kirja pikemmin kuin vain tutkimuspaperi. Yleisen kirjaston tarjonta osoittautui hieman suppeaksi. Pirkanmaan maakuntakirjasto (PIKI) sen paremmin, kuin Tampereen korkeakouluyhteisön kirjastotkaan eivät tarjonneet käytännössä mitään. Pelastusopiston kirjasto osoittautui sen sijaan rikkaammaksi. SFPE:n (2016), Drysdalen (2011) ja Quintieren (2017) sekä Karlssonin ja Quintieren (2000) jälkeen saturaatiopiste säteilyteholaskennassa tuntuikin jo saavutetulta. Enemät käytetyt lähteet, kuten NFPA (2003) ja Gann (2024) sekä käyttämättä jäänyt Gorbettin ym. *Fire dynamics* vuodelta 2016, tarjosivat lähinnä pieniä yksityiskohtia, mutta eivät enää uusia merkittäviä löydöksiä. Ottaen huomioon työn perustasoisen luonteen, voidaan arvella, että muiden kuin työssä esitettyjen mallien löytäminen keskeisestä Suomessa saatavilla olevasta alan kirjallisuudesta vaatisi jo huomattavaa työtä.

Toiseksi on kysyttävä, kuinka hyviä ja tarkkoja tuloksia esitetyillä laskentamalleilla saadaan. Tarjoaako työ siis hyvän tiedon ja hyvän työkalun tietystä tulipalosta lähtevän tiettyyn tarkastelupisteeseen kohdistuvan lämpösäteilyn laskemiseksi ja siitä aiheutuvan riskin määrittelymiseksi? On selvää, että osin kyse on ainakin työn viitekehys huomioon ottaen fyysikaalisista tosiasioista. Voitaneen luottaa siihen, että esimerkiksi Stefan-Boltzmannin kaava antaa hyvin tarkasti tietynlämpöisen mustan kappaleen lämpösäteilytehon ja pistemäisen säteilijän

pallomaiselle tietyn etäisyyden päässä olevalle pinnalle kohdistama lämpösäteily voidaan laskea matemaattisella tarkkuudella.

Saatavien tulosten epävarmuus liittyykin tosielämän rikkauteen. Erilaiset polttokokeiden luonteeltaan tilastollisista tuloksista johdetut kaavat (kuten Heskestadin, McCaffreyn ja Shokrin & Beylerin kaavat) ovat juuri niin tarkkoja, kuin koeasetelmat niiden taustalla. Näiden arvioiminen ei tämän työn viitekehysessä ole mahdollista. Lisäksi mille tahansa mallinnettavalle ja laskettavalle palotapahtumalle valitut materiaalit ja niiden palo-ominaisuustiedot (emissiivisyys, lämpöarvo, massavirta, kappa-beta, syttyvyysparametrit, säteilytehokkuuskerroin...) ovat aina korkeintaan suuntaa antavia valintoja erityisesti, jos palotapahtumassa on mukana useista aineista koostuva palokohde.

Myös kirjailijat itse tunnustavat epävarmuuden. Esimerkiksi Quintiere (2017, 92) arvioi paloteholaskelmien tarkkuuden olevan huonoimmillaan $\pm 50\%$, mutta yleensä $\pm 30\%$. Kuten yllä alaluvussa 4.4.2 todetaan, ensimmäisissä SFPE:n palovammamallien aikarajoissa tulisi käyttää jopa 0,5–0,25:n varmuuskertoimia. Voidaan siis todeta, että tämän työn avulla saatavat tulokset ovat karkeasti oikeassa kertaluokassa. Voidaan arvioida, että jos jokin tämän työn avulla tehty laskelma jättää tarkastelijan riskin suhteen epävarmalle alueelle, on merkittävä riski ei-toivotulle seuraukselle ainakin selvästi olemassa. Jos tarkasteltavassa tosielämän tilanteessa halutaan olla niin sanotusti ”selvillä vesillä”, tulee näillä ”käsinlaskentatyökaluilla” saatavien tulosten olla selvästi riskittömällä alueella.

Oikeudellisessa viitekehysessä tarkasteltuna työn tuloksilla voidaan esittää olevan seuraava asema. Jos laskennan tulos osoittaa päivän selvää riskiä, toisin sanoen esimerkiksi laskettu tarkastelupisteeseen kohdistuva lämpösäteilyteho on kymmeniä prosentteja tai jopa monikerrota yli siedettävänä tunnetun, voitaneen tulosta pitää jopa korjausmääräyksen perustana. Ainakin tällöin todistustaakka siitä, että riskiä ei ole, voitaneen asettaa tarkasteltavaa toimintaa harjoittavalle.

Jos laskennan tulos on lähellä hyväksyttävälle riskille asetettua raja-arvoa, asia on neuvonnan ja turvallisuusviestinnän alueella. Hallinto-oikeudellisesti velvoittavalle korjausmääräykselle riittävää varmuutta ei voitane saavuttaa, mutta riskin voidaan osoittaa olevan olemassa.

Jos laskennan tulos jää selvästi (kymmeniä prosentteja) alle hyväksyttävänä pidetyn maksimiarvon, ei pelastusviranomaisella liene tarvetta puuttua asiaan enemmälti.

7.3 Jatkotutkimuksen tarve

Tässä työssä tarkasteltiin vain säteilyä lämmön siirtymisen muotona. Kuten työn alussa on esitetty, johtuminen ei yleensä näytele tulipalossa merkittävää osuutta. Sen sijaan kuuman ilman ja savun ja kuumien palokaasujen virtauksen kuljettama energia on merkittävä. Tämä

energia suuntautuu oletusarvoisesti ylöspäin, mutta voi esimerkiksi tuulen vaikutuksesta siirtyä myös sivusuunnassa. Kuljettumisen aiheuttamaa riskiä ei voida pitää vähäisenä. Tämä opinäytetyö vaatisi siis rinnalleen vastaavan tutkimuksen kuljettumisesta.

Palotekninen laskenta on toki huomattavasti laajempi kokonaisuus kuin avoimen tilan palo ja sen aiheuttama lämpöenergian siirtyminen säteilemällä ja johtumalla. Luultavasti merkittävämpi osuus pelastuslaitosten kohtaamista tulipaloista on suljetun tilan paloja (*enclosure fires*). Näiden lämpötilan kehityksen, tukahtumisen tai yleissyttymisen ja muiden palodynaamisten kehityskulkujen mallintamiseen tilan koon, aukkotekijöiden, palokuorman palamisnopeuden ja muiden muuttujien viidakossa on valtavasti tässä työssä käytetyn kaltaista aineistoa. Pelastuslaitokset varmasti hyötyisivät paremmasta paloteknisestä laskentaosaamisesta myös suljetun tilan palojen osalta niin riskienhallinnan kuin operatiivisen pelastustoiminnan kehittämässä. Lisäksi palotekninen laskenta luultavasti edelleen lisääntyy ”asiakaspäässä”. Erilaiset ”P0-rakennukset” tai ainakin rakennusten oletettuun palonkehitykseen perustuvat osatoukset ovat tulleet jäädäkseen. Pelastusviranomaisten valvontatyö jää puolitiehen, jos tällaisten paloteknisten suunnitelmien arviointi jää palokonsultteihin kohdistuvan (puoli)sokean luottamuksen varaan.

Merkittävänä jatkotutkimuksen kohteena voidaan nähdä myös ”nykyaikaisempien” työkalujen käyttö. Erilaiset palotekniset laskentaohjelmistot vaativat sellaista käyttöosaamista, jota pelastuslaitoksilla todennäköisesti yleensä ei ole. Monet niistä ovat kalliita. Esimerkiksi Yhdysvaltojen NIST:n sinällään ilmaisen Fire Dynamics Simulator -laskentaohjelmiston visuaalinen apuohjelma PyroSim maksaa tätä kirjoitettaessa yli 1000 euroa vuodessa. Ilmaisiakin avoimen lähdekoodin ohjelmia on kuitenkin saatavilla. Käsineläskentamallien tulosten ajoittainen tarkistuslaskenta tietokoneohjelmistolla esimerkiksi Pelastustoimen kumppanuusverkoston yhteisresurssein voisi olla mahdollista ja se voisi antaa merkittävää syvyyttä asiaan.

Lähteet

Buchanan, A. 2001. *Fire engineering design guide*. 2. painos. Centre for Advanced Engineering. Canterburyn yliopisto. Uusi-Seelanti

Dehghani, P., DiDomizio, M., Sauer, N. ja Barowy, A. 2025. *Heat exposure from electric vehicle fires: Experimental results and analysis*. Fire Safety Journal 158 (2025).

Drysdale, D. 2011. *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & Sons, Ltd. Iso-Britannia.

Gann, R. 2024. *Principles of fire behaviour and combustion*. Jones & Barlett Learning LLC. Yhdysvallat.

HE 72/2002 vp. Hallituksen esitys Eduskunnalle hallintolaiksi ja laiksi hallintolainkäyttölain muuttamisesta

HE 257/2010 vp. Hallituksen esitys pelastuslaiksi ja laiksi meripelastuslain 23 §:n muuttamisesta.

Husa, J. ja Pohjolainen, T. 2014. *Julkisen vallan oikeudelliset periaatteet*. Print Best. Viro.

Iltalehti 2025a. *Tämä yleinen tapa on nyt laiton*. www-uutinen. Julkaistu 4.8.2025. Ladattu 4.9.2025.

Iltalehti 2025b. *Kansa hämillään polttopuiden säilytyksestä – ”Sääntö-Suomi”*. www-uutinen. Julkaistu 7.9.2025. Ladattu 11.9.2025.

Karlsson, B. ja Quintiere J. 2000. *Enclosure fire dynamics*. CRC Press, Ltd. Yhdysvallat.

Keski-Rahkonen, O. 1993. *Ikkunoiden rikkoutuminen tulipalossa*. Palontorjuntatekniikka-lehti 3/1993.

Länsineva, P. 1998. *Harkitseva hallinto*. Teoksessa Juhlakirja Kaarlo Tuori 50 vuotta. Helsingin yliopiston julkisoikeuden laitos. Helsinki.

Merikoski, V. 1958. *Vapaa harkinta hallinnossa*. Lainopillisen ylioppilastiedekunnan kustannustoimikunta. Vammala.

Mills, A. 2014. *Basic heat and mass transfer*. Pearson. Yhdysvallat.

NFPA 2003. *Fire Protection Handbook*. 19. painos. National Fire Protection Association Inc. Yhdysvallat.

- Niemivuo, M. Keravuori-Rusanen, M. ja Kuusikko, K. 2010. *Hallintolaki*. WSOY Lakitieto. Juva.
- Quintiere, J. 2017. *Principles of fire behaviour*. Taylor & Francis Group LLC. Yhdysvallat.
- Raikko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. ja Kurki-Suonio, I. (toim.) 2002. *Poltto ja palaminen*. 2. täydennetty laitos. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä.
- Salpakierto 2025. *Jäteasiat kiinteistöllä - Jäteastioiden mitat*. Verkkosivu. Luettu 16.2.2025 <https://salpakierto.fi/kiinteiston-jatehuolto/1-4-huoneiston-kiinteistot-ja-vapaa-ajan-asunnot/jateasiat-kiinteistolla/>
- SFPE 2016. *Handbook of fire protection engineering volumes 1-3*. Fifth edition. Springer Science+Business Media LLC. Yhdysvallat.
- SPEK 2025. *Pihan jäteasiat ja tuhopolttojen torjunta*. 4. uusittu painos. Suomen Pelastusalan keskusjärjestö. Verkkojulkaisu. ISBN 978-951-797-745-6.
- Tuomi, J. ja Sarajärvi, A. 2018. *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi*. Kustannusosakeyhtiö Tammi. Helsinki.
- Verkkouutiset 2025. *Tällaisesta halkopinosta voi saada sakot*. www-uutinen. Julkaistu 26.5.2025. Ladattu 4.9.2025. verkkouutiset.fi/a/mt-tallaisesta-halkopinosta-voi-saada-sakot/
- Vilkka, H. 2023. *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tampere.
- Vilkka, H. 2025. *Tutki ja kehitä*. Santalahti-kustannus. Jyväskylä.
- Vilkka, H. ja Airaksinen, T. 2004. *Toiminnallinen opinnäytetyö*. 1.–2. painos Gummerus Kirjapaino. Jyväskylä.
- VTT 2007. *Palon voimakkuuden kuvaaminen paloteknisessä suunnittelussa*. JH Working papers 1.
- VTT 2008. *Jätekeskusten paloturvallisuus - Riskit ympäristölle tulipalotilanteessa*. VTT Tiedotteita 2457. ISBN 978-951-38-7251-9 (verkkojulkaisu).
- VTT 2013. *Säteilylämmönsiirron laskennasta*. VTT Technology 116. ISBN 978-951-38-8044-6 (verkkojulkaisu).
- Welty, J., Wicks, C., Wilson, R. ja Rorrer, G. 2001. *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons Inc. Yhdysvallat.

Wickström, U. 2016. *Temperature calculations in fire safety engineering*. Springer International Publishing Switzerland. Sveitsi.

Liitteet

Liite 1: Liitetaulukot

Liitetaulukoihin on koottu kirjallisuudesta saatavilla olevia laskennassa käytettäviä ainearvo-tietoja. Jos tietoja on ollut saatavilla vain rajallisesti, on mukaan otettu kaikki tiedot. Joissain tapauksissa saatavilla oli hyvin runsaasta ja hienojakoista tietoa sellaisistakin aineista, jotka eivät kuulu työn rajaukseen. Tässä tapauksessa mukaan on otettu keskiarvoistavia tietoja sel-laisista aineista, joita tekijän elämäkokemuksen valossa voi kohdata arkielämässä. Tarvitta-essa tietoa joistain muista aineista lukijaa kehoitetaan perehtymään tarkemmin työn lähdeluet-teloon erityisesti liitetaulukoissa mainituilta osin.

Liitetaulukko 1: Valikoituja tyypillisiä emissiivisyysarvoja eri aineille

Liitetaulukko 2: Aineiden lämpöarvoja

Liitetaulukko 3: SäteilYTEHOKKUUSKERTOIMIA X eri polttoaineille

Liitetaulukko 4: Maksimimassavirta (\dot{m}''_{∞}) ja $\kappa\beta$ -arvoja

Liitetaulukko 5: Tewarsonin syttyvyysparametreja

Liitetaulukko 6: Mitoituspaloja

Liitetaulukko 7: Eri aineille kriittisiä lämpösäteilYTEHOJA ja pintalämpötiloja

Liitetaulukko 1: Valikoituja tyypillisiä emissiivisyysarvoja eri aineille (SFPE 2016, 111–114)

Metallit		Muut aineet	
Aine	ε (tyypil.)	Aine	ε (tyypil.)
Alumiini, hapettunut	0,11	Tiili, erilaiset tulitiilet	0,71–0,94
Alumiini, kirkas folio	0,01	Tiili, silikaatti	0,84
Alumiini, yleisesti	0,35	Tiili, punatiili kalkkihiekkakivi	0,59
Hopea, kiillotettu	0,01	Asfaltti	0,85–0,93
Kromi	0,075	Asbestilevy	0,96
Kulta	0,02	Savi, rakennussavi	0,39
Kupari, hapettunut tai matta	0,22–0,56	Betoni	0,94
Kupari, kiiltävä	0,045	Graniitti	0,44
Lyijy hapettumaton	0,05	Sora	0,28
Lyijy hapettunut	0,28	Kipsi	0,9
Messinki hapettunut	0,5	Marmori, kiillotettu	0,93
Messinki, patinoitu	0,03	Kiille	0,75
Nikkeli, hapettunut	0,31–0,39	Laasti	0,89
Nikromi	0,36	Kvartsi	0,76
Nikromi hiekkapuhallettu	0,81	Hiekkakivi	0,83
Platina	0,04–0,07	Liuskekivi	0,67
Rauta, galvanoitu	0,22–0,28	Hiili, tyypillisesti	0,7–0,95
Rauta, kiillotettu	0,06	Keramiikka, tyypillisesti	0,9–0,94
Rauta, ruostunut	0,61	Puuvilla	0,77
Rauta, takorauta kiillotettu	0,28	Silkki	0,78
Rauta, valurauta	0,21	Lasi, yleisesti	0,76–0,96
Teräs, hapettunut	0,79	Maali, tyypillisesti	0,7–0,97
Teräs, hiekkapuhallettu	0,82	Kumi, kova musta kiiltävä	0,95
Teräs, kiillotettu	0,07	Kumi, pehmeä, harmaa	0,86
Tina, hapettumaton	0,04–0,05	Puu, pyökki	0,91
		Puu, tammi	0,91
		Puu, kuusi	0,82

Liitetaulukko 2: Aineiden lämpöarvoja (SFPE 2016, 3440–3449)

Nesteitä ja kaasuja		Kiinteitä aineita	
Aine	Δh_c (MJ/kg)	Aine	Δh_c (MJ/kg)
Asetoni	30,8	Epoksi, kovettumaton	32,92
Asetyleeni	48,2	Epoksi, kovettunut	30,27,92
Bentseeni	39,9	Ligniini	24,7–26,4
Etanoli	26,8	Nylon	30,1–36,99
Glyseroli	17,95	Polyesteri	21,6–29,8
n-heptaani	44,4	Polyetyyleeni	46,2–46,5
n-heksaani	44,7	Polykarbonaatti	30,99
Kerosiini	43,1	Polymetyylimetakrylaatti	26,64
Metaani	50,0	Polyoksymetyyleeni	16,93
Metanoli	19,8	Polypropyleeni	46,37
n-nonaani	44,6	Polystyreeni	41,4–42,5
n-oktaani	44,8	Polyuretaani	23,90
n-pentaani	45,3	Polyvinyylikloridi	17,95
Propaani	46,3	Selluloosa	17,47
Propeeni	45,8	Styreeni (C ₈ H ₈)	42,21
Tolueeni	40,9		
Xyleeni	43,1		
Vety	119,9		

Muita materiaaleja			
Materiaali	Δh_c (MJ/kg)	Materiaali	Δh_c (MJ/kg)
Bensiini	46,8	Puu, punatammi	20,2
Eläinrasva	39,8	Puu, pyökki	20,0
Kivihilli	33,7–34,7	Puu, vaahtera	19,1
Hiili	30,9–34,6	Puuvilla	16,5–20,4
Koksi	28,0–31,0	Rengas, autonrengas	32,6
Korkki	26,1	Turve	16,7–21,6
Nahka	18,2–19,8	Öljy, risiini	37,1
Neopreeni	24,3	Öljy, pellava	39,2–39,4
Olki	15,6	Öljy, mineraali	45,8–46,0
Paperi, ruskea	16,3–17,9	Öljy, oliivi	39,6
Paperi, aikakauslehti	12,7	Villa	20,7–26,6
Paperi, sanomalehti	19,7		
Paperi, vaha	21,5		
Parafiinivaha	46,2		
Puu, HDF-levy	19,9		
Puu, koivu	20,0		
Puu, kuusi	21,8		
Puu, mänty	19,2		

Liitetaulukko 3: Säteilytehokkuuskertoimia X eri polttoaineille (SFPE 2016, 2641; Drysdale 2011, 207; Quintiere 2017, 89)

Polttoaine	X (= X_{rad})
Bensiini	0,40–0,60
Bentseeni	0,20–0,40
Butaani	0,20–0,40
C5-hiilivedyt ja korkeammat	0,40
Etyleeni	0,25–0,38
Heksaani	0,40–0,60
Heptaani	0,316
Metaani	0,15–0,20
Metaani	0,19–0,23
Metanoli	0,15–0,20
Metanoli	0,141
Polymetyylimetakrylaatti (pleksi)	0,245–0,300
Polyoksymetyleeni	0,148
Polypropyleeni	0,204–0,413
Polystyreeni	0,40–0,60
Polystyreeni	0,222–0,334
Polyvinylikloridi	0,209
Propaani	0,30–0,32
Puukehikko	0,20–0,40
Selluloosa	0,365
Styreeni	0,37
Vety	0,17–0,20

Liitetaulukko 4: Maksimimassavirta (\dot{m}''_{∞}) ja $k\beta$ -arvoja (SFPE 2016, 865; Karlsson ja Quintiere 2000, 35)

Aine	\dot{m}''_{∞}	$k\beta$
Kryogeeniset		
Nestemäinen H ₂	0,017	6,1
LNG (enimmäkseen nestemäinen CH ₄)	0,078	1,1
LPG (enimmäkseen nestemäinen C ₃ H ₈)	0,099	1,4
Alkoholit		
Metanoli (CH ₃ OH)	0,017	
Etanoli (C ₂ H ₅ OH)	0,015	
Yksinkertaiset hiilivedyt		
Butaani (C ₄ H ₁₀)	0,078	2,7
Bentseeni (C ₆ H ₆)	0,085	2,7
Heksaani (C ₆ H ₁₄)	0,074	1,9
Heptaani (C ₇ H ₁₆)	0,101	1,1
Xyleenit (C ₈ H ₁₀)	0,090	1,4
Asetoni (C ₃ H ₆ O)	0,041	1,9
Dioksaani (C ₄ H ₈ O ₂)	0,018	5,4
Dietyylieetteri (C ₄ H ₁₀ O)	0,085	0,7
Öljytuotteet		
Petrolieetteri	0,048	3,6
Bensiini	0,055	2,1
Kerosiini	0,039	3,5
Muuntajaöljy	0,039	0,7
Polttoöljy, raskas	0,035	1,7
Raakaöljy	0,060	0,62
Kiinteät aineet		
Polymetyylimetakrylaatti (PMMA, pleksi)	0,020	3,3
Polypropyleeni (C ₃ H ₆) _n	0,018	
Polystyreeni	0,034	

Liitetaulukko 5: Tewarsonin syttyvyysparametreja (Drysdale 2011, 200)

Aine	Olomuoto	L_v	\dot{Q}''_F	\dot{Q}''_L
Bentseeni	Neste	0,49	72,8	42,2
Etanoli	Neste	0,97	38,9	24,7
Fenoli	Kiinteä	1,64	21,8	16,3
FR fenolivaaho (jäykkä)	Kiinteä	3,74	25,1	98,7
FR polyesteri (lasikuituvahvistettu)	Kiinteä	1,75	29,3	21,3
FR polyisosyanuraattivaaho (jäykkä)	Kiinteä	1,52	50,2	58,5
FR polyisosyanuraattivaaho (jäykkä, lasikuidulla)	Kiinteä	3,67	33,1	28,4
FR Polystyreenivaaho (jäykkä)	Kiinteä	1,36	34,3	23,4
FR polyuretaanivaaho (jäykkä)	Kiinteä	1,19	31,4	21,3
Heptaani	Neste	0,48	44,3	30,5
Metanoli	Neste	1,20	38,1	22,2
Metyylimetakrylaatti	Neste	0,52	20,9	25,5
Polyetyleeni	Kiinteä	2,32	32,6	26,3
Polykarbonaatti	Kiinteä	2,07	51,9	74,1
Polymetyylimetakrylaatti	Kiinteä	1,62	38,5	21,3
Polyoksymetyleeni	Kiinteä	2,43	38,5	13,8
Polypropyleeni	Kiinteä	2,03	28,0	18,8
Polysesteri (lasikuituvahvistettu)	Kiinteä	1,39	24,7	16,3
Polystyreeni	Kiinteä	1,76	61,5	50,2
Polyuretaanivaaho (jäykkä)	Kiinteä	1,52	68,1	57,7
Polyuretaanivaaho (notkea)	Kiinteä	1,22	51,2	24,3
Puu douglasinkuusi	Kiinteä	1,82	23,8	23,8
Puu, vaneri	Kiinteä	0,95	9,6	18,4
Styreeni	Neste	0,64	72,8	43,5
FR = Fire resistant, palosuojattu				

Liitetaulukko 6: Mitoituspaloja

Palokohde	Tarkempi kuvaus	Paloteho (kW)	Lähde
Ajoneuvo	Henkilöauto 70–1300 kg	1500–8500	SFPE 2016, 870–876
	Linja-auto	30000–35000	SFPE 2016, 870–876
	Henkilöauto ("tavallinen ja perheauto")	5800–9100	VTT 2007, 79
	Vene, 6 metriä pitkä	12000	VTT 2007, 79
	Moottoripyörä	3800	VTT 2007, 79
	Sähköauto	6200–11800	Dehghani ym. 2025
Autonrenkaat	Raskaan ajoneuvon paripyörä	1000	FSPE 2016, 882
Jätteen säilytys	Pienet jätteastiat (18–40 litraa)	100	Quintiere 2017, 190
	Suuret jätteastiat (70–120 litraa)	300	Quintiere 2017, 190
	Pienet jätteastiat 6,6–6,8 litraa, alle 1 kg	28–50	SFPE 2016, 882–887
	Pienet jätteastiat 1–4 kg	150–350	SFPE 2016, 882–887
	Suuret jätteastiat 136 litraa	450	SFPE 2016, 882–887
	Suuret jätteastiat 364 litraa	2500	SFPE 2016, 882–887
	Jätekatos palamatonkattoinen	16000	VTT 2007, 133
	Jätekatos palavakattoinen	18800	VTT 2007, 133
	Jätekatos palamatonkattoinen, vain vähän palokuormaa	6700	VTT 2007, 133
	Jätekatos palavakattoinen, vain vähän palokuormaa	10800	VTT 2007, 133
Puupinot	Puutapuli 25 kg	400	VTT 2007, 27–34
	Puutapuli 50 kg	1380	VTT 2007, 27–34
	Puutapuli 500 kg	3500	VTT 2007, 27–34
	Kuormalavapino (1,0 m x 1,2 m) 0,5 m korkea	2422	VTT 2007, 27–34
	Kuormalavapino (1,0 m x 1,2 m) 1,0 m korkea	3670	VTT 2007, 27–34
	Kuormalavapino (1,0 m x 1,2 m) 1,5 m korkea	4930	VTT 2007, 27–34
	Kuormalavapino 0,45 m korkea	1200	Buchanan 2001, 222
	Kuormalavapino 1,5 m korkea	3700	Buchanan 2001, 222
	Kuormalavapino 3,0 m korkea	6800	Buchanan 2001, 222
	Kuormalavapino 4,6 m korkea	10200	Buchanan 2001, 222
	Kuormalavapino 1,5 ft (0,45 m) korkea, per pohjan m ²	1300	Quintiere 2017, 200
	Kuormalavapino 5 ft (~1,5 m) korkea, per pohjan m ²	3700	Quintiere 2017, 200
	Kuormalavapino 10 ft (~3,0 m) korkea, per pohjan m ²	6600	Quintiere 2017, 200
	Kuormalavapino 15 ft (~4,6 m) korkea, per pohjan m ²	9900	Quintiere 2017, 200
	Kuormalavapino 1,5 ft korkea, per pohjan m ²	1420	Karlsson ja Quintiere 2000, 42
	Kuormalavapino 5 ft korkea, per pohjan m ²	3970	Karlsson ja Quintiere 2000, 42
	Kuormalavapino 10 ft korkea, per pohjan m ²	6800	Karlsson ja Quintiere 2000, 42
	Kuormalavapino 16 ft (~4,9 m) korkea, per pohjan m ²	10200	Karlsson ja Quintiere 2000, 42

Liitetaulukko 7: Eri aineille kriittisiä lämpösäteilytehoja (CHF = Critical Heat Flux) (SFPE 2016, 3451–3455)

Luonnolliset aineet		Pinta- ja eristevaahdot	
Aine	CHF (kW/m ²)	Aine	CHF (kW/m ²)
Jauho	10	Fenolit	20
Paperi, sanomalehti	10	Lateksi	16
Paperi, pehmo	10	Polyuretaanit	13–40
Paperi, aaltopahvi	10	Polystyreenit	10–15
Puu, yleisesti	10		
Sokeri	10		

Synteettiset polymeerit		Muut materiaalit	
Aine	CHF (kW/m ²)	Aine	CHF (kW/m ²)
Epoksi	13	Selluloosa	15
Polyamidi	15	Silikoni	19
Polysesteri	10–15		
Polyetyleni (HDPE)	15		
Polymetyylimetakrylaatti	10		
Polyoksymetyleni	13		
Polystyreenit	13		
Polykarbonaatti	15		
Polypropyleenit	8–18		
Polyvinyylikloridi	10–17		
Nylon	13–16		