



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

UUDET PALOTURVALLISUUSMÄÄ- RÄYKSET JA PALONESTOKEMIKAA- LIEN KÄYTTÖ PUURAKENTAMI- SESSA

TEKIJÄ: Elina Häikiö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Elina Häikiö	
Työn nimi Uudet paloturvallisuusmääräykset ja palonestokemikaalien käyttö puurakentamisessa	
Päiväys	12.3.2019
Sivumäärä/Liitteet	41/1
Ohjaaja(t) Merja Tolvanen, yliopettaja; Kalle Kiviranta, projekti-insinööri	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Mikko Laasanen, lehtori, EkoMateriaalit-hanke	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Paloturvallisuus on yksi rakentamisen oleellisista teknisistä vaatimuksista ja sitä koskevat säännökset ja ohjeet oli aiemmin koottu Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) osaan E1. Sääntelyn selkeyttämiseksi ja vähentämiseksi RakMK E1 on korvattu ympäristöministeriön asetuksella rakennusten paloturvallisuudesta (YMA 848/2017) vuoden 2018 alusta lähtien. Uudistettavana olevassa maankäyttö- ja rakentamislaisissa pyritään kiinnittämään huomiota rakentamisen energiatehokkuuteen ja vähähiilisyyteen, ja näitä asioita selvitettiin myös "Savolaisen ekopientalon modernit rakennusmateriaalit"-hankkeessa (Euroopan aluekehitysrahastosta rahoitettu hanke Savonia-AMK:lle 2016-2018), jonka osana tämä opinnäytetyö tehtiin. Työn tavoitteena oli tarkastella rakentamismääräysten muutoksia lähinnä puukerrostalorakentamisen näkökulmasta ja pohtia, voidaanko palonestokemikaaleja käyttämällä parantaa puumateriaalien paloturvallisuutta ja siten lisätä puun käyttöä rakentamisessa.</p> <p>Opinnäytetyössä käytiin läpi oleellisimmat palomääräyksiin tulleet muutokset vertaamalla RakMK E1:n ohjeita uuden asetuksen määräyksiin. Työssä selvitettiin palonestokemikaalien saatavuutta Suomessa ja kemikaalien toimintaperiaatteita puun palosuojauksessa. Käytännön kokeiden avulla vertailtiin palonestokemikaaleilla käsitellyn ja käsittelemättömän viilupuun palo-ominaisuuksia sekä käytön aikaisia haihtuvien orgaanisten aineiden päästöjä sisäilmaan.</p> <p>Kartiokalorimetrikokeiden avulla tutkittiin kolmella eri palonestokemikaalilla käsiteltyjen LVL-koekappaleiden syttymisaikaa sekä lämmön- ja savuntuottoa. Palonestokemikaalikäsittely nopeutti syttymistä ja lisäsi savuntuottoa, mutta vähensi lämmöntuottoa verrattuna käsittelemättömään viilupuuhun, jolloin ainakin yhdellä palosuoja-aineella saatettaisiin päästä materiaalin paloluokkaan B (=materiaalin osallistuminen paloon hyvin rajoitettu). Palosuojakäsittelystä viilupuusta näytti kuitenkin pääsevän ilmaan selvästi suurempia määriä orgaanisia haihtuvia aineita verrattuna käsittelemättömään viilupuuhun tai sahatavaraan.</p> <p>Uudet paloturvallisuusmääräykset laajentavat mahdollisuuksia käyttää massiivipuuta perinteisesti betonista tehtyjen kerrostalojen rakentamisessa ja sallivat muun muassa entistä korkeampien majoitus- ja hoivalaitosten rakentamisen asuin- ja työpaikkarakennusten lisäksi. Sisäpinoissa saadaan myös jättää enemmän puuta näkyviin. Palosuojakäsittelyn avulla voidaan parantaa puun palo-ominaisuuksia ja päästä parempaan paloluokkaan, jolloin puun käyttömahdollisuudet vaativissakin rakenteissa lisääntyvät. Käyttämällä puuta betonin sijaan voidaan rakentamisen hiilijalanjälkeä pienentää, sillä puu sitoo kasvaessaan ilman hiilidioksidia ja toimii rakenteissa pitkäaikaisena hiilivarastona.</p>	
Avainsanat puukerrostalo, palokäyttäytyminen, palonestokemikaalit, LVL, CLT, rakentamismääräykset, palotestaus, kartiokalorimetri	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Elina Häikiö			
Title of Thesis New regulations on fire safety and the use of fire retardant chemicals in wood construction in Finland			
Date	12 March 2019	Pages/Appendices	41/1
Supervisor(s) Ms Merja Tolvanen, Principal Lecturer; Mr Kalle Kiviranta, Project Engineer			
Client Organisation /Partners Mr Mikko Laasanen, Senior Lecturer			
<p>Abstract</p> <p>Fire safety is one of the essential technical requirements for construction and the relevant regulations and guidelines were previously compiled in the Finnish Building Code Part E1. In order to clarify and reduce regulation, the building code has been replaced by a decree of the Ministry of the Environment on Fire Safety of Buildings (YMA 848/2017) from the beginning of 2018. The law on land use and construction to be renewed aims to pay attention to the energy efficiency and low carbon content of construction, and these issues were also discussed in the project "Savolaisen ekopientalon modernit rakennusmateriaalit" (Savonia UAS project funded by the European Regional Development Fund in 2016-2018), which was the subject of this thesis. The aim of this thesis was to examine the changes in construction regulations, mainly from the point of view of the construction of wooden block houses, and to consider whether the use of fire retardants can improve the fire safety of wood materials and thus increase the use of wood in construction.</p> <p>The most important changes in the fire regulations were reviewed by comparing the instructions of the old building code with the provisions of the new regulation. The availability of fire retardant chemicals in Finland and the operating principles of chemicals in fire protection of wood were studied. Practical experiments were performed to compare the fire properties of fire retardant treated and untreated wood and the indoor emissions of volatile organic compounds during use.</p> <p>In cone calorimetric tests, the ignition time and heat and smoke production of laminated veneer lumber (LVL) samples treated with three different fire retardant chemicals were examined. Fire retardant chemical treatment accelerated ignition and increased smoke production, but reduced heat output compared to untreated LVL, with at least one flame retardant treatment being able to upgrade the material's fire class to 'B' (= material participation in the fire is very limited). However, it seemed that much larger quantities of organic volatile compounds were released into the air compared to the untreated LVL or timber.</p> <p>The new fire safety regulations will extend the possibilities of using wood in the construction of apartment buildings traditionally made of concrete, and allow, among other things, the construction of higher accommodation and care facilities in addition to residential and workplace buildings. Also, more wood can be left visible in the inner surfaces. Fire retardant treatment can improve the fire properties of the wood and achieve a better fire class, thereby increasing the potential for wood use also in more demanding structures. By using wood instead of concrete, the carbon footprint of construction can be reduced, as wood binds carbon dioxide and works as a long-term carbon storage in the structures.</p>			
<p>Keywords tall wood building, fire performance, fire retardant chemicals, LVL, CLT, building code, fire testing, cone calorimetry</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	PUUN KÄYTTÖ RAKENTAMISESSA.....	8
2.1	Uudet rakennusmateriaalit (ns. insinööripuu).....	8
2.1.1	CLT	9
2.1.2	LVL	9
2.2	Puurakentamisen hiilijalanjälki	10
3	PALOSUOJAUS RAKENTAMISMÄÄRÄYKSISSÄ	12
3.1	Rakennuksen paloturvallisuus	12
3.1.1	Eurokoodit rakentamisessa	12
3.1.2	Rakennusten paloluokitus	13
3.1.3	Rakennusosien paloluokitus (kantavat rakenteet).....	13
3.1.4	Rakennustuotteiden paloluokitus	14
3.2	Rakentamismääräykset Suomessa ja niiden muutokset.....	16
3.2.1	Rakennuksen paloluokat ja olennaiset vaatimukset	16
3.2.2	Rakennuksen kantavuus ja osastoivuus	17
3.2.3	Sisä- ja ulkopuolisten pintojen luokkavaatimukset	18
3.2.4	Ulkoseinät	19
4	PUUN PALAMINEN JA PALOSUOJAUS	20
4.1	Puun palaminen.....	20
4.2	Puurakenteiden palonkestävyys	21
4.2.1	Suojaverhous.....	22
4.2.2	Palonestokemikaalit.....	22
5	PALOSUOJATUN RAKENNUSMATERIAALIN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN.....	26
5.1	Rakennusmateriaalin palo-ominaisuuksien tutkiminen	26
5.1.1	Kartiokalorimetrikoe	26
5.1.2	Yksittäisen palavan esineen koe (SBI-koe).....	31
5.2	Palosuojatun rakennusmateriaalin vaikutukset sisäympäristöön.....	32
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO.....	35
	LÄHTEET	37
	SÄÄDÖKSET	40
	STANDARDIT	40

LIITE 1. SAVONIAN PALOLABORATORIOSSA TEHTYJEN KARTIOKALORIMETRIKKEIDEN TULOKSET

..... 42

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

CLT	monikerroslevy; <i>cross-laminated timber</i>
FIGRA	lämmöntuoton kasvunopeus; <i>fire growth rate index</i> (W/s)
F _s	liekin leviäminen; <i>flame spread</i> (mm)
HRR	lämmönvapautumisnopeus, paloteho; <i>heat release rate</i> (kW)
LFS	sivusuuntainen liekin leviäminen (koekappaleen reunaan asti); <i>lateral flame spread</i>
LVL	viilupuu, kertopuu; <i>laminated veneer lumber</i>
PCS	ylempi lämpöarvo, materiaalin lämpöarvo sen palaessa täydellisesti; <i>gross calorific value, pouvoir calorifique supérieur</i> (MJ/kg)
RHR	lämmönvapautumisnopeus; <i>rate of heat release</i> (kW/m ²)
SBI	yksittäisen palavan esineen koe; <i>single burning item test</i> (standardin SFS-EN 13823+A1 mukainen palotesti)
SMOGRA	savuntuoton kasvunopeus; <i>smoke growth rate index</i> (m ² /s ²)
SPR	savuntuoton vapautumisnopeus; <i>smoke production rate</i> (m ² /s)
THR	kokonaislämmöntuotto; <i>total heat release</i> (MJ)
TIG	syttymisaika; <i>time of ignition</i> (s)
TSP	kokonaissavuntuotto; <i>total smoke production</i> (m ²)

1 JOHDANTO

Suomessa rakentamista ohjataan maankäyttö- ja rakennuslailla (MRL, 132/1999). Paloturvallisuus on yksi rakentamisen oleellisista teknisistä vaatimuksista ja sitä koskevat säännökset ja ohjeet oli aiemmin koottu Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) osaan E1. Maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen (958/2012) myötä rakentamista koskevia asetuksia on uudistettu sääntelyn selkeyttämiseksi ja vähentämiseksi ja RakMK E1 on vuoden 2018 alusta lähtien korvattu ympäristöministeriön asetuksella rakennusten paloturvallisuudesta 848/2017. Rakentamismääräyskokoelman tekstiin oli aiemmin koottu sekä velvoittavat määräykset että ohjeet hyväksyttävillä ratkaisuille, mutta 1.1.2018 lähtien vain sitovat vaatimukset annetaan asetuksessa ja hyvää rakentamistapaa noudattavat ohjeet annetaan erikseen perustelumuiotiossa, joka noudattaa asetuksen rakennetta (Jantunen 2017). Uudessa asetuksessa on suunnittelijan vastuuta korostettu (YMA 848/2017, 3 §).

Myös maankäyttö- ja rakennuslaki on uudistumassa. Uudistuksen tavoitteena on kehittää rakentamisen ohjausta kiinnittäen huomiota erityisesti ilmasto- ja energiakysymyksiin, energiatehokkuuteen sekä rakentamisen elinkaari- ja vähähiilisyysnäkökohtiin (Ympäristöministeriö 2017). Rakentamisen hiilijalanjäljestä suuri osa syntyy rakennuksen käytön aikaisesta energian käytöstä, mutta rakennusmateriaalien osuus koko elinkaaren aikaisista päästöistä on merkittävä (Bionova Oy 2017). Puu sitoo kasvaessaan ilman hiilidioksidia ja toimii rakenteissa pitkäaikaisena hiilivarastona. Puurakennuksen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki onkin betonia pienempi (Vares ym. 2017). Ekologisen ja energiatehokkaan rakentamisen avulla on mahdollista päästä merkittäviin kasvihuonekaasupäästövähennyksiin, joihin Suomi on kansainvälisten ilmastositoumusten ja EU:n kautta sitoutunut. Teknologian tutkimuskeskus VTT:n ja Suomen ympäristökeskuksen tuoreen raportin mukaan Suomella voi olla mahdollisuudet saavuttaa hiilineutraalius jo 2040-luvulla ja puurakentaminen on yksi metsäteollisuuden rakennemuutoksen vähäpäästöisyyttä lisäävistä toimenpiteistä (Koljonen ym. 2019, 29).

Opinnäytetyö tehdään osana Euroopan aluekehitysrahaston vuosina 2016 – 2018 rahoittamaa hanketta ”Savolaisen ekopientalon modernit rakennusmateriaalit” (”EkoMateriaalit”), jonka tarkoituksena on ollut selvittää mahdollisuuksia rakennusmateriaaleja tuottavien yritysten ohjaamiseksi vähähiilisyys- ja energiatehokkuuteen sekä tarjota mahdollisuuksia modernien rakennusmateriaalien teknisten ominaisuuksien (mm. paloturvallisuuden) testaamiseen.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan rakennusmääräyksiä ja niiden muutoksia lähinnä puukerrostalo- ja puurakentamisen näkökulmasta (asuin-, majoitus-, työpaikka-, kokoontumis- ja liikerakennukset). Teolliseen toimintaan tai varastointiin liittyviä rakentamisen määräyksiä ei käsitellä. Työssä pohditaan, voidaanko palonestokemikaaleja käyttämällä saada puumateriaalien paloturvallisuutta parannettua, mikä voisi uusien rakentamismääräysten puitteissa mahdollistaa puun käytön lisäämisen rakentamisessa. Työssä tutkitaan kolmen eri palonestokemikaalin vaikutuksia viilupuun palamiseen ja alustavaan paloluokitukseen. Lisäksi tarkastellaan palonestokäsitellyn ja käsittelemättömän viilupuun haihtuvien orgaanisten aineiden päästöjä sisäilmaan verrattuna perinteiseen sahatavaraan.

2 PUUN KÄYTTÖ RAKENTAMISESSA

Suomi on Espanjan jälkeen Euroopan kerrostalovaltaisim maa: kerrostaloissa on 46 % kaikista Suomen asunnoista. Pientaloista 75 % ja vapaa-ajan asunnoista lähes kaikki rakennetaan puusta, mutta kerrostalorakentamista hallitsee betoni (Puuinfo 2018a). Lisäämällä puun käyttöä voidaan rakentamisen hiilijalanjälkeä pienentää. Ohjaamalla metsien käyttöä biomassan polttamisen sijaan rakentamiseen voidaan puun jalostusarvoa lisätä ja puurakenteita ja -tuotteita voidaan käyttää pitkäaikaiseen hiilen varastointiin. Puutuotteiden käyttö näkyykin viime vuosina lisääntyneenä kasvihuonekaasujen netto-poistumana osana Suomen maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous (LULUCF) -sektoria (Tilastokeskus 2019, 2). Ympäristöministeriön hallinnoiman puurakentamisen toimenpideohjelman (2016 – 2021) tavoitteena on lisätä puun käyttöä kaupunkirakentamisessa, julkisessa rakentamisessa ja suurissa puurakenteissa, kuten silloissa ja halleissa (Ympäristöministeriö 2018). Ohjelma on osa Suomen biotalousstrategiaa ja hallituksen ”Puu liikkeelle ja uusia tuotteita metsästä” -kärkihanketta.

Puukerrostalojen rakentaminen Suomessa on kasvussa ja puukerrostalojen määrän odotetaan tuplaantuvan vuoteen 2020 mennessä: vuosina 2018 – 2020 on suunniteltu aloitettavan 186 puukerrostaloa, mikä on kaksi kertaa enemmän kuin 2010-luvulla yhteensä (Rakennustutkimus RTS 2018). Tulvaisuudessa entistä useampi koulu, päiväkotiki tai palvelurakennus rakennetaan puusta. Tällä hetkellä rakenteilla tai suunnitteilla on 51 puukerrostalohanketta, joista 10 on varmasti toteutuvia. Yksi rakenteilla olevista hankkeista on Joensuuhun rakennettava Suomen korkein, 14-kerroksinen opiskelija-asuntoyhtiö Joensuun Ellin puukerrostalo ”Joensuu Lighthouse”, joka valmistuu syksyyn 2019 mennessä (Huusko 2018).

2.1 Uudet rakennusmateriaalit (ns. insinööripuu)

Puukerrostalorakentaminen on toistaiseksi kalliimpaa kuin betonirakentaminen, mutta erilaiset liimapuusta tai viilupuusta tehdyt massiivipuulevyelementit mahdollistavat tehokkaan rakentamisen ja kantavien puurunkorakenteiden käyttämisen myös korkeissa rakennuksissa. Puukerrostalon rakentaminen elementeistä on noin kolmasosan betonirakentamista nopeampaa, koska esimerkiksi betonin kuivumista ei tarvitse odottaa (Airaksela 2017). Toisaalta puukerrostalon suunnittelu vie toistaiseksi enemmän aikaa, koska kokemusta etenkin korkeista puurakennuksista ei vielä ole. Puukerrostalojen elementtirakentamisessa kantavina materiaaleina yleisimmin käytetyt puutuotteet ovat ristiinliimattu puu (CLT, *cross-laminated timber*; ks. 2.1.1) ja viilupuuta eli kertopuuta (LVL, *laminated veneer lumber*; ks. 2.1.2). CLT:ssä liimataan päällekkäin lautoja, LVL:ssä viiluja. Näitä massiivipuutuotteita voidaan käyttää joko tasoelementteinä eli suurina levyinä, jotka työstetään tehtaalla ja kootaan rakennuspaikalla, tai tilaelementteinä, jolloin ikkunat, LVIS-tekniikan ja kalusteet sisältävät asuntolohkot kootaan tehtaalla ja kuljetetaan valmiina rakennuspaikalle (Puuinfo 2018b). LVL soveltuu rakennusteknisesti vaativampaan rakentamiseen ja vaatii raaka-aineekseen järeää kuusitukkivuuta. CLT:n valmistukseen voidaan käyttää keskilaatuista mänty- ja kuusisahatavaraa eli huonompaa tukkipuuta ja sivulautoja, joille on tavallisesti vaikeampi löytää käyttöä (Skyttä 2017).

2.1.1 CLT

CLT (*cross-laminated timber*) eli ristiinlaminoitu massiivipuukko koostuu ristikkäin liimatuista lamelli- eli puulevykerroksista, joita voi olla 3 – 8 käyttökohteesta riippuen. Ristiin liimatut kerrokset jakavat kuormat kahteen suuntaan, jolloin levyt ovat kantavia, mutta kevyitä. CLT-levyjä voidaan käyttää sekä kantavina että jäykistävinä rakenteina seinissä ja välipohjissa (Puuinfo 2018b). Levyt voivat olla jopa 16 metriä pitkiä ja 3,5 m leveitä ja niitä voidaan työstää tarpeen ja arkkitehdin suunnitelmien mukaan. Suomessa on kolme CLT-tehdasta: Oy CrossLam Kuhmo Ltd, CLT Finland Hoiskossa ja viimeisimpänä syksyllä 2018 käynnistynyt CLT Plant Kauhajoella. Stora Ensolla on CLT-tehdas Itävallassa. Joensuun Lighthouse -puukerrostalon välipohjat ja portaat on tehty CLT-levystä, joka tulee Stora Enson Itävaltan-tehtaalta valmiiksi työstettynä (Huusko 2018). Rovaniemelle rakennettavan Domus Arctica -säätien 8-kerroksisen DAS Kelo -puukerrostalon asuinkerrokset puolestaan toteutetaan Kuhmon tehtaalla CLT:stä valmistetuista tilaelementeistä (Tolppanen 2018).

CLT:n käyttöä puurakentamisessa on esitelty samaan hankkeeseen tehdyssä opinnäytetyössä (Käsnänen 2018), joten sitä ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.

2.1.2 LVL

Viilupuukko eli LVL (*laminated veneer lumber*) on yleensä samansuuntaisesti ladotuista viiluista liimamalla tehtyä massiivipuuta. Puhtaassa suuntaisrakenteessa puun kosteuseläminen voi kuitenkin johtaa tuotteen käyrystymiseen tai kieroutumiseen, joten osa viiluista voidaan kääntää poikittain, jolloin rakenne stabiloituu ja leveitäkin laattoja voidaan valmistaa ilman käyrystymisriskiä. (Liski 2017.)

LVL:n valmistuksessa käytetään yleensä 3 mm:n paksuista havuvaneria, joka ladotaan jatkuvana laattana limittäin siten, että vierekkäisissä viilukerroksissa porrastus on noin 120 mm. Ennen ladontaa vanerilevyjen päät viistetään ja liima levitetään levyn toiselle puolelle verho- tai juovalevityksenä. Lopulliset tuotteet voivat olla paksuudeltaan 15 – 105 mm. Tavallisimmat tuotepaksuudet ovat 39 mm ja 45 mm. Valmiin tuotteen leveys riippuu valmistuslinjan leveydestä, mutta on yleensä 1200, 1800 tai 2500 mm. Tuotteen pituus ei riipu viilujen pituudesta, vaan maksimipituutta rajoittavat lähinnä valmistuslinjan pituus ja kuljetuksen aiheuttamat rajoitukset (Liski 2017.)

Liimoina käytetään lähes yksinomaan fenoliformaldehydihartseja. Kertopuun formaldehydipäästöt ovat kuitenkin pienet (0,017 ppm; MetsäWood 2017) ja alittavat siten luokan E1 vaatimuksen ($\leq 0,100$ ppm) ja täyttävät M1-rakennusmateriaalien päästöluokituksen. Liiman levityksen ja viilujen ladonnan jälkeen laatta puristetaan joko käyttämällä esipuristusta (kylmäpuristus 8 – 12 baarin paineessa) tai pelkästään kuumapuristuksella 14 – 18 baarin paineessa. Puristuksen jälkeen laatta katkaistaan lopulliseen pituuteen, tarvittaessa hiotaan ja lopuksi sahataan haluttuun kokoon. (Liski 2017.)

Viilupuuta voidaan käyttää kaikkeen rakentamiseen: tyypillisiä käyttökohteita ovat palkit, pilarit, ristikot, kehät ja ikkuna ja oviteollisuuden komponentit. LVL-palkit soveltuvat hyvin lattia- ja kattopalkeiksi pitkille jänneväleille: ne ovat rakenteeltaan hoikkia ja korkeita mutta jäykkiä. Palkin maksimipituus on 25 m. Viilupuuta voidaan käyttää myös jäykistävässä rakenteissa levyrakenteina, pilareina ja tolppina.

Kun tasorakenteissa tarvitaan jäykistystä, käytetään LVL-levyjä, joiden rakenteeseen on lisätty poikittaisia viiluja. (Liski 2017.)

Suomessa viilupuuta valmistavat Metsä Woodin tehtaot Lohjalla ja Punkaharjulla (Kerto®; tästä tulee viilupuusta myös usein käytetty nimi kertopuu) sekä Stora Enson tehdas Varkaudessa.

2.2 Puurakentamisen hiilijalanjälki

Puu sitoo kasvaessaan ilmakehän hiilidioksidia ja tämä hiili varastoituu puurakenteisiin ja puutuotteisiin tuotteen käyttöänsä ajaksi. Rakennuksen elinkaaren päätösvaiheessa puu poistuu käytöstä ja voidaan joko kierrättää, jolloin se pysyy hiilivarastona tai polttaa energiaksi, jolloin sen sisältämä hiili palaa hiilidioksidina takaisin ilmaan. Kuivassa puussa on noin puolet hiiltä, ja hiilidioksidiksi laskettaessa kuiva tukkipuu sisältää 1,83 kg CO₂ puukiloa kohti (Vares 2017, 4). Rakennustuotteeksi valmistetun sahatavaran ja CLT:n hiilivarasto on 1,55 kg CO₂/kg ja kertopuun (LVL-T) 1,79 kg CO₂/kg tuotetta (Nykänen ym. 2017, 59).

Kerrostalorakentamisessa on perinteisesti käytetty betonia. Betoniin käytettävää sementtiä valmistetaan polttamalla kalkkikiveä, jolloin hiilen varastoitumisen sijaan hiilidioksidia vapautuu polttoaineen päästöt mukaan luettuina noin 700 - 800 kg sementtiklinkkeritonnia kohti (Finnsementti 2017). Toisaalta yli 40 % kalkkikivestä vapautuneesta hiilidioksidista sitoutuu takaisin betoniin sen kovettuessa (Xi ym. 2016). Betonin valmistamisessa tarvitaan sementin lisäksi hiekkaa, joka on yksi maapallon uusiutumattomista luonnonvaroista ja jonka tuottaminen rakennuskäyttöön lisää betonin ympäristökuormaa. Jokaista sementtitonnia varten tarvitaan 6 – 7-kertainen määrä hiekkaa. Vuonna 2012 maailmassa käytettiin betonintuotantoon noin 30 miljardia tonnia hiekkaa ja soraa (Peduzzi 2014), joka on 60 prosenttia kaikesta käytetystä hiekasta. Hiekan nostaminen on siirtynyt sisämaasta järvien, jokien ja merien rannoille. Rantojen ja järvien ruoppaus aiheuttaa eroosiota, muuttaa vesien virtauksia ja vaarantaa kokonaisia ekosysteemejä. Merestä nostettu hiekka pitää pestä puhtaaksi suolasta teräksen korroosion estämiseksi. Tulevaisuudessa käytetäänkin kasvavassa määrin teollisesti valmistettua kalliosta murskattua hiekkaa (esim. Metso 2019).

Puurakentamisen hiilijalanjälkeä laskettaessa selvitetään rakennusmateriaalien hankinta-, kuljetus- ja valmistusvaiheiden (A1 – A3; SFS-EN 15804 + A1) aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt. Hiilijalanjälki ilmoitetaan CO₂-ekvivalenteina kiloa rakennustuotetta kohti. Rakennustuotteen elinkaaren tuote- ja kuljetusvaiheiden kasvihuonekaasupäästöt (pois lukien tuotteen hiilivarasto) ovat sahatavaralle 0,09 kg ja CLT:lle ja LVL:lle 0,31 kg CO₂-e/kg rakennustuotetta (Nykänen ym. 2017, 59). LVL:n hiilijalanjälki on siten yli kaksi kertaa suurempi kuin valmiin betonin hiilijalanjälki (joka on keskimäärin 270 kg CO₂-e/m³ eli 0,115 kg CO₂-e/kg; Miller ym. 2016), mutta kun puutuotteisiin lasketaan mukaan niiden sisältämä hiilivarasto, puutuotteiden hiilijalanjälki muuttuu negatiiviseksi. Toisaalta lisäämällä betoniin erilaisia seosaineita (mm. lentotuhkaa, masuunikuonaa ja natriumsilikaattia) betonin hiilijalanjälkeä saadaan pienennettyä: esimerkiksi lisäämällä betoniin 70 % masuunikuonaa sideaineen kokonaismää-

rästä, kasvihuonekaasupäästöt voivat pienentyä yli 60 prosenttia verrattuna K45-lujuusluokan valmisbetoniin (Tulimaa ja Wirtanen 2006, 79). Tällöin myös teollisuuden jätevirtoja saadaan ohjattua hyötykäyttöön.

Kun verrattiin viiden erilaisen puukerrostaloratkaisun tuotevaiheen (A1 – A4; SFS-EN 15804 + A1) hiilijalanjälkeä vastaavaan betoniseen kerrostaloon, nelikerroksisen puukerrostalon hiilijalanjälki oli 40 % pienempi kuin betonikerrostalon (Vares ym. 2017, 19). Kun mukaan lasketaan rakentamisvaihe sekä käyttöaikainen kunnossapito ja energiankulutus 50 vuoden aikana, puukerrostalon hiilijalanjälki oli enää noin 11 % pienempi kuin betonikerrostalon, sillä käytön aikainen energiankulutus ja energian tuotannon päästöt muodostavat 70 – 80 % koko elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä. Rakentamalla 32 asuntoa sisältävä 4-kerroksinen talo puusta betonin sijaan muodostuu kasvihuonekaasupäästöjä hankintavaiheen, rakentamisen ja 50 vuoden käytön aikana noin 200 t vähemmän (Vares 2017, 21).

3 PALOSUOJAUS RAKENTAMISMÄÄRÄYKSISSÄ

Koska puu ja puupohjaiset tuotteet luokitellaan palaviksi materiaaleiksi, puun käyttöä rakentamisessa on vuoden 1827 Turun palosta lähtien rajoitettu ja säännelty palomääräyksillä (Siikanen 2008). EU:n rakennustuoteasetuksen (305/2011) liitteessä 1 määrätään rakennuskohteen perusvaatimuksista ja niiden paloturvallisuudesta seuraavaa:

” Rakennuskohde on suunniteltava ja rakennettava siten, että tulipalon sattuessa

- a) kantavien rakenteiden voidaan olettaa kestävän tietyn ajan;
- b) tulen ja savun kehittyminen ja leviäminen rakennuskohteen sisällä on rajoitettu;
- c) tulen leviäminen läheisyydessä sijaitseviin rakennuskohteisiin on rajoitettu;
- d) sen käyttäjät pääsevät poistumaan rakennuskohteesta tai heidät voidaan pelastaa muilla keinoilla;
- e) pelastushenkilöstön turvallisuus on otettu huomioon.”

Suomessa rakennusten paloturvallisuudesta annettuja maankäyttö- ja rakennuslakiin (132/1999) perustuvia määräyksiä ja ohjeita on julkaistu vuodesta 2002 lähtien Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 (viimeksi vuonna 2011; Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 3/11). Vuoden 2018 alusta lähtien RakMK E1:n korvaa maankäyttö- ja rakennuslain muutoksen 958/2012 mukaisesti **ympäristöministeriön asetus 848/2017 rakennusten paloturvallisuudesta**.

3.1 Rakennuksen paloturvallisuus

Rakennusten suunnittelusta ja rakentamisesta tulee huolehtia siten, että rakennus täyttää paloturvallisuudelle asetetut palotekniset vaatimukset. Vaatimusten täytyminen voidaan osoittaa rakennusten, rakennusosien ja rakennustarvikkeiden osalta ympäristöministeriön asetuksessa 848/2017 esitettyjen luokkien ja lukuarvojen mukaan, tai vaihtoehtoisesti perustuen oletettuun palonkehitykseen (toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu), joka kattaa rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet (YMA 848/2017, 3 §).

Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa suunnittelussa käytetyt menetelmät ja mallit on esitettävä rakennuslupamenettelyn yhteydessä. Seuraavassa esitellään tarkemmin asetuksessa 848/2017 esitettyihin luokkiin ja lukuarvoihin perustuva paloluokitus.

3.1.1 Eurokoodit rakentamisessa

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja, jotka Suomessa julkaisee Suomen Standardisoimisliitto SFS ry (SFS 2014). Ympäristöministeriö laatii kansalliset liitteet standardien soveltamista varten. Siirtyminen eurokoodeihin alkoi vuonna 2007 ja uudet eurokoodiyhteensopivat säädökset tulivat voimaan syyskuussa 2014. Puurakentamista koskee Eurokoodi 5 (SFS-EN 1995-1-2 + AC), ja standardien valmistelusta vastaa Rakennustuoteteollisuus RTT ry.

3.1.2 Rakennusten paloluokitus

Rakennukset jaetaan neljään paloluokkaan (P0, P1, P2 ja P3) riippuen rakennuksen kerrosluvusta, korkeudesta, kerrosalasta ja käyttötarkoituksesta. Paloluokkaa P0 käytetään silloin kun rakennus suunnitellaan käyttäen oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menettelyä (YMA 848/2017, 4 §). Esimerkiksi Joensuun Lighthouse -rakennus on Suomen korkein puukerrostalo, jonka kantavat rakenteet on tehty LVL- ja CLT-elementeistä. Koska rakennus on 14-kerroksinen, sen palotekninen suunnittelu perustuu toiminnalliseen palomitoitukseen. P1-paloluokan yli 8-kerroksisessa rakennuksessa kantavien rakenteiden tulisi olla palamattomia eli vähintään A2-s1, d0-luokkaa (ks. luku 3.1.4), johon puulla ei palosuojattunakaan päästä. Esimerkiksi Joensuu Lighthouse 14-kerroksisessa puukerrostalossa puupintoja ei voida jättää näkyviin, vaan välipohjat peitetään betonilla ja seinät kipsilevyillä, jolloin päästään automaattisen sammutuslaitteiston kanssa kantavien rakenteiden luokkavaatimukseen R 90 eli 90 minuutin palonkestoon (ks. luku 3.1.3; Huusko 2018; YMA 848/2017, Taulukko 3).

Paloluokkaan P1 kuuluvien rakennusten oletetaan kestävän sortumatta palon ja jäähtymisvaiheen aikana ilman että paloa sammutetaan, ja niiden kantavat rakenteet ovat yleensä palamattomia (esim. kiveä). Rakennusten kokoa tai henkilömäärää ei ole rajoitettu.

Paloluokkaan P2 kuuluvissa rakennuksissa voidaan käyttää kantavina rakenteina myös puuta, mutta tällöin vaaditaan paloturvallisuutta parantavia laitteita (sprinklerit) tai pintaverhoilua, jonka tulee kuulua luokkaan A2 (heikosti paloon osallistuva; Siikanen 2008, 168). Myös kerroslukua ja henkilömääriä voidaan rajoittaa rakennuksen käyttötavasta riippuen (Jantunen 2017, 9). P2-luokan rakennuksia ovat tyypillisesti enintään 8-kerroksiset asuinrakennukset, hoitolaitokset, majoitusrakennukset ja työpaikkarakennukset sekä enintään 4-kerroksiset kokoontumis- ja liikerakennukset (Lahtela 2018, 11).

Paloluokassa P3 kantaville rakenteille ei aseteta erityisvaatimuksia palonkestävyyden suhteen. Riittävä paloturvallisuustaso saavutetaan rakennuksen kokoa ja henkilömääriä rajoittamalla (Jantunen 2017, 9). Tyypillisiä P3-luokan rakennuksia ovat enintään 2-kerroksiset asuinrakennukset (jonka kerrokset kuuluvat samaan palo-osastoon, ns. kaupunkipientalot), majoitusrakennukset, työpaikkarakennukset, kokoontumis- ja liikerakennukset sekä enintään 1-kerroksiset hoitolaitokset (Lahtela 2018, 11).

3.1.3 Rakennusosien paloluokitus (kantavat rakenteet)

Rakennusosien luokitusjärjestelmästä säädetään komission päätöksissä 2000/367/EY ja 2003/629/EY. Kantavien ja osastoivien rakennusosien ja suojaverhousten palonkesto-ominaisuuksiin kohdistuvia vaatimuksia kuvataan seuraavilla merkinnöillä ja niiden yhdistelmillä:

R	kantavuus
E	tiiviyys
I	eristävyys
K	palosuojauskyky

Merkintöjen jälkeen ilmoitetaan palonkestävyysaika minuutteina (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 tai 360), jolloin merkinnästä muodostuu rakennusosan paloluokka. Seinän paloluokka voi olla esim. REI 60, jolloin seinärakenteen kantavuus, tiiviys ja eristävyys säilyvät palossa 60 min ajan.

Seinän tai sisäkaton suojaverhouksen luokka voi olla esim. K₂ 10, jolloin suojaverhousrakenne suojaaa sen takana olevaa rakennetta hiiltymiseltä 10 minuutin ajan (Puuinfo 2012). Suojaverhousluokkaa käytetään yleensä yhdessä rakennustarvikkeen paloluokkamerkinnän kanssa.

3.1.4 Rakennustuotteiden paloluokitus

Rakennuksessa käytettävät tarvikkeet eivät saa myötävaikuttaa palon kehittymiseen vaaraa aiheuttavalla tavalla (YMA 848/2017, 22 §). Rakennustarvikkeiden paloteknistä käyttäytymistä kuvaavat ns. euroluokat on määritelty alun perin EU:n komission päätöksessä 2000/147/EY, joka on kumottu ja korvattu komission delegoidulla säädöksellä (EU) 2016/364. Tarvikkeiden luokittelu perustuu siihen, miten ne vaikuttavat palon syttymiseen ja leviämiseen sekä savun ja palavien pisaroiden tuottoon. Muiden rakennustuotteiden kuin lattianpäällysteiden paloluokat määritellään seuraavien standardoitujen testausmenetelmien avulla (Taulukko 1):

- Palamattomuustesti (SFS-EN ISO 1182): menetelmässä koekappale asetetaan uuniin, jonka lämpötila on 750 °C, ja mitataan mahdollisesta palamisesta aiheutuva maksimilämpötilan ja loppulämpötilan ero (ΔT), liekehtimisaika (t_f) ja massan muutos (Δm).
- Lämpöarvon määrittäminen (SFS-EN ISO 1716): menetelmässä mitataan materiaalin luovuttama lämpömäärä (PCS) pommikalorimetrillä materiaalin palaessa täydellisesti vakioilavuudessa, puhtaassa hapessa ja n. 3 MPa:n paineessa.
- Yksittäisen palavan esineen koe, SBI (SFS-EN 13823): menetelmässä mitataan savunmuodostusta (SMOGR, $TSP_{600s} \rightarrow$ lisämääre s), lämmönvapautumista (FIGRA, THR_{600s}) ja havainnoidaan palavien pisaroiden ja osien muodostumista (lisämääre d) sekä palon leviämistä sivusuunnassa (LFS), kun kaksi eri kokoista seinäkappaletta asennetaan loppukäytön asennustavan mukaisesti koehuoneeseen ja sytytetään niiden muodostamassa nurkassa propaanikaasupolttimella.
- Syttyvyys pienestä liekistä (SFS-EN ISO 11925-2): menetelmässä pystysuora testikappale sytytetään pinta- tai reunasytytyksenä nestekaasuliekillä ja tarkkaillaan syttymistä ja liekin leviämismatkaa ja -nopeutta (F_s) sekä liekehtivien pisaroiden ja osien muodostumista.

Rakennustarvikkeet jaetaan paloluokkiin A – F, joista luokan A tuotteet ovat käytännössä palamattomia ja luokan F tuotteiden käyttäytyminen palossa ei ole käytännössä hyväksyttävissä (Taulukko 1). Luokkiin B – E liitetään lisämääreet s₁, s₂ ja s₃ sekä d₀, d₁ ja d₂, jotka kuvaavat savun tuottoa ja palavien pisaroiden muodostumista (Taulukko 2). Euroluokka muodostuu pääluokan ja lisämääreiden yhdistelmästä.

TAULUKKO 1. Rakennustuotteiden paloluokitus (EU 2016/364)

Luokka	Testausmenetelmät	Luokitusperusteet	Lisämääreet
A1 = tarvikkeet, jotka eivät osallistu lainkaan paloon	SFS-EN ISO 1182 ja	$\Delta T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta m \leq 50 \%$; $t_f = 0$ (ei jatkuvaa liekehtimistä)	
	SFS-EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0 \text{ MJkg}^{-1}$ *	
A2 = tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu	SFS-EN ISO 1182 tai	$\Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta m \leq 50 \%$; $t_f \leq 20 \text{ s}$	
	SFS-EN ISO 1716 ja	$PCS \leq 3,0 \text{ MJkg}^{-1}$ *	
	SFS-EN 13823	$FIGRA \leq 120 \text{ Ws}^{-1}$; $LFS < \text{näytteen reuna}$; $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	s, d
B = tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettu	SFS-EN 13823 ja	$FIGRA \leq 120 \text{ Ws}^{-1}$; $LFS < \text{näytteen reuna}$; $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	s, d
	SFS-EN ISO 11925-2, altistusaika 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ (60 s kuluessa)	
C = tarvikkeet, jotka osallistuvat paloon rajoitetusti	SFS-EN 13823 ja	$FIGRA \leq 250 \text{ Ws}^{-1}$; $LFS < \text{näytteen reuna}$; $THR_{600s} \leq 15 \text{ MJ}$	s, d
	SFS-EN ISO 11925-2, altistusaika 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ (60 s kuluessa)	
D = tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyväksyttävissä	SFS-EN 13823 ja	$FIGRA \leq 750 \text{ Ws}^{-1}$;	s, d
	SFS-EN ISO 11925-2, altistusaika 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ (60 s kuluessa)	
E = tarvikkeet, joiden käyttäytymisen palossa on hyväksyttävissä	SFS-EN ISO 11925-2, altistusaika 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ (20 s kuluessa)	d
F = tarvikkeet, jotka eivät saavuta luokan E paloteknistä käyttäytymistä	SFS-EN ISO 11925-2, altistusaika 15 s	$F_s \geq 150 \text{ mm}$ (20 s kuluessa)	

* Homogeenisten tuotteiden ja epähomogeenisten tuotteiden oleellisten komponenttien osalta.

ΔT lämpötilan nousu

Δm massan menetys

t_f liekehtimisen kesto aika

PCS ylempi lämpöarvo

FIGRA lämmöntuoton kasvunopeus

LFS liekin sivusuuntainen leviäminen

THR_{600s} kokonaislämmöntuotto ensimmäisen 600 s:n aikana

F_s liekin leviäminen

TAULUKKO 2. Paloluokituksen lisämääreet: savuntuotto (s) ja liekehtivien pisaroiden tai osien esiintyminen (d) testausmenetelmän SFS-EN 13823 (SBI) mukaan. Liekehtivien pisaroiden esiintyminen todennetaan kameralla kuvaamalla.

Savuntuotto (s)	Luokitusperusteet
s1 = savuntuotto on erittäin vähäistä	SMOGRA $\leq 30 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$; TSP _{600s} $\leq 50 \text{ m}^2$
s2 = savuntuotto on vähäistä	SMOGRA $\leq 180 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$; TSP _{600s} $\leq 200 \text{ m}^2$
s3 = savuntuotto ei täytä s1 eikä s2 vaatimuksia	ei s1 eikä s2

Liekehtivät pisarat/osat (d)	Luokitusperusteet
d0 = palavia pisaroita tai osia ei esiinny	ei liekehtiviä pisaroita/osia 600 s:n kuluessa
d1 = palavat pisarat tai osat sammuvat nopeasti	pisaroiden/osien liekehtimisen kesto aika enintään 10 s 600 s:n kuluessa
d2 = palavien pisaroiden tai osien tuotto ei täytä d0 tai d1 vaatimuksia	ei d0 eikä d1

SMOGRA savuntuoton kasvunopeus
TSP_{600s} kokonaissavuntuotto ensimmäisen 600 s:n aikana

3.2 Rakentamismääräykset Suomessa ja niiden muutokset

Tässä osiossa listataan oleelliset muutokset ympäristöministeriön asetuksessa 848/2017 verrattuna E1 rakentamismääräyskokoelmaan (suluissa viittaukset asetuksen 848/2017 yksityiskohtiin).

3.2.1 Rakennuksen paloluokat ja olennaiset vaatimukset

Ensimmäisessä luvussa (YMA 848/2017, 1 § - 10 §) määrätään rakennusten paloluokituksista, käyttötarkoituksesta, palokuormista sekä rakennuksen koon, henkilömäärän ja käyttötarkoituksen rajoituksista.

- Uutena rakennuksen paloluokkana otetaan käyttöön **paloluokka P0**, johon kuuluva rakennus on suunniteltu pääosin tai kokonaan toiminnallisen palomitoituksen mukaan (YMA 848/2017, 4 §). P0-paloluokassa palokuorma tulee aina määrittää (YMA 848/2017, 6 §).
- **P3-paloluokan asuinrakennusta, jonka päällekkäiset kerrokset kuuluvat eri huoneistoihin, ei sallita**, sillä tällaisen rakennuksen paloturvallisuus on heikko ja vahinkoriski naapurille merkittävä (YMA 848/2017, Taulukko 1 a).
- **1 – 2-kerroksisten P3-paloluokan rakennusten enimmäiskerrosalat** silloin, kun rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla, **esitetään tarkasti** (aiemmin sallittiin lievennyksiä, jos rakennuksessa oli automaattinen paloilmoitin, savunpoistolaitteisto tai sammutuslaitteisto) (YMA 848/2017, Taulukko 1 a). Esimerkiksi 1-kerroksisen rakennuksen enimmäiskerrosala on yleensä $2\,400 \text{ m}^2$, mutta voi olla $4\,800 \text{ m}^2$ silloin, kun rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla.

- **P2-paloluokkaan kuuluvia yli 2-kerroksisia rakennuksia** voivat olla **asuinrakennuksen** ja **työpaikkarakennuksen** lisäksi **majoitusrakennus** ja **hoitolaitos** (pois lukien suljettu rangaistuslaitos) tai **kokoontumis- ja liikerakennus** (YMA 848/2017, Taulukko 1 b). Ympäri vuorokautiset päiväkodit lasketaan hoitolaitoksiin (YMA 848/2017, 5 §). P2-paloluokkaan kuuluvat rakennukset voivat olla enintään 8-kerroksisia ja niihin voi sisältyä myös kokoontumis- tai liiketiloja, mutta pelkästään kokoontumis- tai liikekäyttöön tarkoitettussa rakennuksessa (esim. koulu, päiväkotiki, kirjasto) voi olla enintään neljä kerrosta. P2-paloluokkaan kuuluvassa asuintalossa, jonka kerrokset kuuluvat samaan palo-osastoon (ns. kaupunkipiennälo), sallitaan enintään neljä kerrosta. (YMA 848/2017, Taulukko 1 b.)
- **P2-paloluokkaan kuuluvat 3 – 8-kerroksiset rakennukset** tulee varustaa automaattisella sammutuslaitteistolla paitsi silloin, kun yli 2-kerroksisen rakennuksen kerrokset kuuluvat samaan asuinhuoneistoon (YMA 848/2017, Taulukko 1b).
- **P2-paloluokan** yli 2-kerroksisen rakennuksen **korkeus voi olla 28 m** (aiemmin 26 m; YMA 848/2017, Taulukko 1 b). Tämä mahdollistaa esimerkiksi 8-kerroksisen toimistorakennuksen rakentamisen. Näissä rakennuksissa tiloja, joissa palokuorma on >1200 MJ/m² ei sallita (YMA 848/2017, Taulukko 1 b).
- **P2-paloluokan yli 2-kerroksisten rakennusten** kantaville rakenteille ja osastoiville rakennusosille ei enää anneta palokuormaryhmittelyä (YMA 848/2017, 6 §).
- **P2-paloluokan yli 2-kerroksisille rakennuksille** annetaan **henkilömäärä- tai paikkalukurajoitukset** (aiemmin henkilömäärärajoituksia ei ollut). 1 – 2-kerroksisten rakennusten henkilömääriä on täsmennetty ja lisäksi esitetään henkilömäärät silloin, kun rakennukseen on asennettu automaattinen sammutusjärjestelmä. Esimerkiksi 2-kerroksisen majoitusrakennuksen suurin sallittu henkilömäärä on yleensä 50, mutta 100 silloin, kun tilat on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. Yli 2-kerroksisen majoitusrakennuksen suurin sallittu henkilömäärä on 1000. (YMA 848/2017, Taulukko 2.)

3.2.2 Rakennuksen kantavuus ja osastoivuus

Toisessa ja kolmannessa luvussa (YMA 848/2017, 11 § - 21 §) määrätään rakenteiden kantavuutta koskevista luokkavaatimuksista ja rakennuksen palo-osastoinnista (sisältäen osastoivat rakennusosat, läpiviennit, ilmanvaihtojärjestelmät, ullakot ja ontelot sekä ulkoseinät ja parvekkeet). Muutoksena aikaisempaan annetaan mitoitusperusteet ja vähimmäispalokuormat kantaville rakenteille silloin, kun mitoitus perustuu oletettuun palonkehitykseen (YMA 848/2017, Taulukko 4.)

- **P1-paloluokan yli 8-kerroksinen rakennus** tulee varustaa **automaattisella sammutuslaitteistolla** (YMA 848/2017, Taulukko 3).
- **P1-paloluokan 1 – 2-kerroksisen rakennusten** (muiden kuin hoitolaitosten ja majoitus-tilojen) **kantavilta rakenteilta ei enää vaadita A2-s1, d0 -luokkaa**, vaikka lämmöneristeet eivät täytä A2-s1, d0 -luokkaa (YMA 848/2017, Taulukko 3).
- **P1-paloluokan yli 2-kerroksiseen** rakennukseen voi tehdä **yhden lisäkerroksen** ilman automaattista sammutusjärjestelmää, kun kantavuus on R 60 ja tarvikkeet vähintään D-s2, d2 -luokkaa. **Kaksi lisäkerrosta** voi tehdä, jos eristeet ovat A2-s1, d0 -luokkaa ja kolme

ylintä kerrosta varustetaan automaattisella sammutusjärjestelmällä. (YMA 848/2017, Taulukko 3.) Lisäkerrokset mukaan lukien rakennuksen korkeus saa olla enintään 28 metriä.

- **Yli 56-metrinen rakennus** osastoivilta rakennusosilta edellytetään **A2-s1, d0 -luokkaa**, koska palon hallintaan saaminen korkeissa rakennuksissa on hidasta (YMA 848/2017, Taulukko 6). Yli 56-metrisissä asuinrakennuksissa osastovien ovien lisäksi myös kerrostasovien tulee olla itsestään sulkeutuvia ja salpautuvia (YMA 848/2017, 17 §).

3.2.3 Sisä- ja ulkopuolisten pintojen luokkavaatimukset

Viidennessä luvussa (YMA 848/2017, 22 § - 28 §) käsitellään sisäpintojen, ulkoseinien, yläpohjan ja katteen luokkavaatimuksia paljon kehittymisen rajoittamisessa.

Lähtökohtaisesti **P2-paloluokan 1 – 2-kerroksisen rakennuksen** sisäpuoliset seinä- ja kattopinnot tulee verhota vähintään B-s1, d0 -luokan tarvikkeista tehdyllä K₂ 10 -luokan suojaverhouksella.

Suojaverhousta ei kuitenkaan vaadita

- jos lämmöneristeet ovat vähintään B-s1, d0 -luokkaa,
- jos kokoontumis-, työpaikka- tai liikerakennuksen seinän sisäpinta kuuluu B-s1, d0 -luokkaan ja seinä rakennusosana EI 15 -luokkaan,
- asunnon pinnoilta, jos lämmöneristeet ovat vähintään D-s2, d2 -luokkaa,
- palkeilta ja pilareilta, jotka täyttävät luokkavaatimukset D-s2, d2 ja R 30. (YMA 848/2017, 24 § 1 mom.)

P2-paloluokan yli 2-kerroksisen rakennuksen **porrashuoneen** rakenteiden tulee olla varustettu vähintään A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista tehdyllä vähintään K₂ 30 -luokan suojaverhouksella lukuun ottamatta vähäisiä rakennusosia. Vähäisiksi osiksi lasketaan esimerkiksi portaan askelmien etupinnat, kaidarakenteen pinnat ja portaita kannattavien palkkien pinnat, ja jos porrashuone on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla, näiden pintojen luokkavaatimus on B-s1, d0 (YMA 848/2017, Taulukko 7).

P2-paloluokan 3 – 8-kerroksisen rakennuksen **sisäpuolisten seinien tai katon pinnolta ei edellytetä suojaverhousta** silloin kun niiden yhteenlaskettu osuus palo-osaston kantavien ja osastovien seinien, ulkoseinien ja katon kokonaispinta-alasta (johon lasketaan mukaan myös aukkojen pinta-alat) on enintään **20 %**. Suojaverhoamatonta pintaa voi myös olla **80 %**, jolloin kantavien ja osastovien rakennusosien palonkestävyyssaijaa täytyy pidentää 30 minuutilla (REI 90) tai jopa **yli 80 %**, jolloin palonkestävyyssaijaa täytyy pidentää 60 minuutilla (REI 120). Suojaverhousta ei myöskään vaadita ei-kantavien väliseinien pinnoilta, eikä rakennusosilta, jotka täyttävät A2-s1, d0 -luokkavaatimuksen. (YMA 848/2017, 24 § 3 mom.)

P1-paloluokan yli 2-kerroksisen asuinrakennuksen kantavien rakenteiden ollessa muuta kuin A2-s1, d0 -luokkaa tulee pinnat suojaverhota A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista tehdyllä K₂ 10 -luokan suojaverhouksella lukuun ottamatta ei-kantavia väliseiniä (YMA 848/2017, 24 § 5 mom.) Puurunkoisissa P1-paloluokan kerrostaloissa ei siis voi jättää sisäpinnoissa puuta näkyviin.

3.2.4 Ulkoseinät

Tiukennuksena E1-vaatimukseen **P1-paloluokan yli 56-metrinen rakennuksen** lämmöneristeen, ulkopinnan verhouksen ja tuuletusvälin pintojen tulee olla vähintään A2-s1, d0 -luokkaa, jotta estetään eristeiden aiheuttama palon leviäminen silloin kun ulkoapäin sammuttamisen mahdollisuudet ovat rajalliset (YMA 848/2017, 25 ja 26 §).

P1-paloluokan enintään 56 metriä korkean rakennuksen **kantamattoman ulkoseinän** runko voidaan tehdä puusta eli D-s2, d2 -luokan tarvikkeesta (YMA 848/2017, 25 §). Tällöin lämmöneristeen tulee olla vähintään B-s1, d0 -luokan tarvikkeesta, kun aiemmin vaadittiin A-s1, d0 -luokka.

Parvekerakenteita ei enää edellytetä suojaverhottaviksi. Enintään 28 metriä korkean rakennuksen varatiekäyttöön tarkoitettun parvekkeen pintojen vaatimus (pois lukien lattiat) on B-s2, d0. Jos parveke on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla, P2-paloluokan yli 2-kerroksisen rakennuksen parvekkeen palkit ja pilarit voivat olla D-s2, d0-luokkaa. (YMA 848/2017, Taulukko 8.)

4 PUUN PALAMINEN JA PALOSUOJAUS

Palamisreaktiossa syttyvä aine reagoi ilmassa olevan hapen kanssa ja riittävän lämpöenergian läsnä ollessa syttyy palamaan. Palavan aineen koostumuksen muuttuessa syntyy palokaasuja, jotka palaessaan hehkuvat. Palaminen on eksoterminen reaktio, joka lämmittää palavaa aluetta ja sen ympäristöä mahdollistaen syttymisen ja palamisen jatkumisen ja leviämisen. Epätäydellisessä palamisessa muodostuu erilaisia näkyviä hiukkasia eli savua.

Avoimessa ympäristössä palon intensiteetti kasvaa nopeasti huippuunsa, minkä jälkeen palaminen hidastuu, kunnes kaikki polttoaine on palanut loppuun. Suljetussa tilassa lieskahduksen jälkeisen täyden palamisvaiheen aikana palon intensiteetti pysyy vakiona, mutta palamisnopeus riippuu pääasiassa saatavilla olevan hapen määrästä eli käytännössä tilan ilmanvaihdesta (Buchanan ja Abu 2017).

Huoneistopalo on nelivaiheinen. Alkuvaiheessa ulkopuolinen lämmön lähde saa aikaan palavan materiaalin lämpenemisen syttymislämpötilaan. Syttymisvaiheessa lämpötilan kohottua noin 400 °C:seen, palavasta aineesta vapautuvat palavat kaasut syttyvät ja siirtyään palon kasvamisvaiheeseen. Palamisessa muodostuu kuumia savukaasuja, jotka nousevat tilassa ylöspäin muodostaen katonrajaan kerroksen, joka säteilee lämpöä huoneeseen. Tämä vaihe on kriittinen rakenteiden pintakerrosten syttymisessä. Kun lämpötila yläkerroksessa on noussut 600 °C:seen, kaikki palamattomat savukaasut ja tilassa olevat palamattomat pinnat syttyvät. Tätä sanotaan lieskahdukseksi: lämpötila nousee nopeasti noin 1000 °C:seen ja alkaa täyden palamisen vaihe. Kun kaikki palava aines on palanut, tai kun happi suljetusta tilasta on loppunut, palo sammuu ja seuraa palon hiipumisvaihe, jolloin lämpötila laskee nopeasti. (Buchanan ja Abu 2017.)

4.1 Puun palaminen

Rakennusaineena käytetty puu koostuu lähinnä selluloosasta (40 – 45 %), hemiselluloosasta (15 – 25 %) ja ligniinistä (20 – 35 %; Rowell ym. 2005). Palon alkuvaiheessa nämä polymeerit alkavat hajota ja muodostuu palamattomia kaasuja. Puusta haihtuu vesi ja 130 °C:ssa alkaa tapahtua dehydraatiota, jolloin hiilihydraatti- ja ligniinipolymeerien kemialliset sidokset katkeavat ja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä alkaa poistua puusta. Puun lämpökemiallista hajoamista sanotaan pyrolyysiksi. Hiilihydraattien dehydraatiossa muodostuu häkää, hiilidioksidia ja vettä, ja puu alkaa hiiltä. (Dietenberger ja Hasburgh 2016, 1 – 2.)

Lämpötilan noustua yli 200 °C:seen hemiselluloosa ja ligniini alkavat hajota ja hiilen lisäksi muodostuu runsaasti häkää ja tervamaisia yhdisteitä. Puun hemiselluloosa hajoaa 200 - 300 °C:ssa ja ligniini hitaammin 225 – 400 °C:ssa. Tämä vaihe on endoterminen, mutta hapen ja haihtuvien kaasujen läsnä ollessa hiili palaa eksotermisessä reaktiossa hehkuen. (Dietenberger ja Hasburgh 2016, 1 – 2.)

Lämpötilan noustessa yli 300 °C:seen selluloosa alkaa nopeasti depolymerisoitua ja muodostuu anhydromonosakkarideja kuten levoglukosaania. Tervan muodostuminen suhteessa hiilen muodostumiseen lisääntyy ja loppu selluloosa hajoaa nopeasti 370 °C:ssa ja sen yläpuolella. Kun kaikki haihtuvat kaasut

ovat poistuneet puusta ja lämmenneet syttymislämpötilaan noin 450 °C:ssa, alkaa eksoterminen liekipalo, joka kuumentaa edelleen kiinteitä rakenteita ja edistää palon leviämistä johtaen lieskahdukseen ja varsinaiseen palamisvaiheeseen (Dieterberger ja Hasburgh 2016, 1 - 2). Puun jälkipalamisessa yli 450 °C:ssa puusta on jäljellä aktiivista hiiltä, joka palaessaan muodostaa vettä, hiilidioksidia ja häkää, kunnes jäljelle jää pelkkää tuhkaa (Rowell ym. 2005, 18-9).

Palonkestävyyden parantamiseksi puurakenteita voidaan suojata palolta erillisellä suojaverhouksella tai käsittelemällä puuta palonestokemikaaleilla. Suojaverhoukslevyissä käytetään usein palamattomia materiaaleja, kuten kipsilevyä, jolloin päästään rakennusmateriaalin paloluokkaan A2-s1, d0. Puu kuuluu lähtökohtaisesti luokkaan D-s2, d0, mutta palonestokemikaaleilla käsitellyllä puulla voidaan päästä luokkaan B-s1, d0 (esim. Teknos 2019).

4.2 Puurakenteiden palonkestävyys

Vaikka puu on palava materiaali, se yleensä säilyttää kantavuutensa palossa, sillä puun palaessa sen pinta hiiltyy (noin 300 °C:ssa), ja tämä hiilikerros hidastaa lämmön siirtymistä syvemmälle puuhun ja toimii siten luonnollisena eristeenä paloa vastaan. Nimellisellä hiililymisellä tarkoitetaan kappaleen hiililymistä useammasta suunnasta yhtä aikaa esimerkiksi palkeissa. Yksidimensionaalista hiililymistä tapahtuu esimerkiksi rakennuslevyissä, jolloin kappale hiiltyy vain yhdestä suunnasta (Puuinfo 2013). Hiilikerroksen alla on kuumentuneen puun muodostama ns. pyrolyysivyöhyke, jossa lämpötila nousee noin 200 °C:seen, ja sen alla on muuttumaton puurakenne (Barber ja Gerard 2015, 2). Puurakenteen palonkestävyys voidaan määrittää rakenteen hiililymämitoituksen avulla. Mitoitusta varten tulee tietää materiaalin hiililymisnopeus, rakenteen koko ja vaadittu palonkesto aika.

Hiililymisnopeus riippuu käytetystä puumateriaalista. Havupuusta tehdyn sahatavaran (tiheys ≥ 290 kg/m³) ja LVL:n (≥ 480 kg/m³) yksidimensionoinen hiililymissyvyys on 0,65 mm/min, lehtipuulla (≥ 450 kg/m³) 0,50 mm/min. Nimellinen hiililymissyvyys havupuulla on 0,8 mm/min, LVL:llä 0,7 m/min ja lehtipuulla 0,55 mm/min (SFS-EN 1995-1-2 + AC).

Palosuojausmitoitusta varten tulee tietää hiililymisen alkamishetki sekä suojauksen murtumishetki. Palosuojalevy suojaa puurakennetta hiililymiseltä, kunnes se murtuu ja sen takana oleva puurakenne paljastuu. Koska puurakenne on lämmennyt palosuojauksen takana, hiililyminen tapahtuu palosuojan murtumisen jälkeen aluksi nopeammin 25 mm:n syvyyteen saakka, minkä jälkeen se jatkuu puutuotteelle ominaisena. Palonkestoajan lopussa puurakenteesta on jäljellä jäännöspoikkileikkaus, joka mitoitetaan palotilanteen rasitukselle. Puurakenteen kokoa suurentamalla voidaan rakenteen kantokykyä palotilanteessa parantaa. (Lahtela 2018, 81.) Palomitoitusta tehtäessä tulee huomioida myös esimerkiksi puurungon jälkijännityksessä käytettyjen teräsrakenteiden riittävä suojaaminen. Teräs on materiaalina palamatonta, mutta se menettää lujuuttaan lämpötilan noustessa. Esimerkiksi Joensuun Lighthouse -puukerrostalossa LVL-puurungon jälkijännitys tehdään puurakenteiden sisään asennettavilla jännetangoilla, joitka ankkuroidaan ensimmäisen kerroksen betonirakenteisiin (Huusko 2018). Myös erilaisten metallisten kiinnitysten (naulat, ruuvit, pultit, erilaiset teräksiset liitoselimet) käyttäytyminen palossa ja niiden palosuojaus tulee suunnittelussa ottaa huomioon (Barber ja Gerard 2015,

5). Esimerkiksi tappivaarnaliitoksissa teräslevyt kannattaa asentaa rakenteen sisään, jolloin niitä ympäröivä puu suojaa niitä kuumentumiselta. Ulkopuolisten teräksisten liitoslevyjen suojaamisen 16 mm:n kipsilevyllä havaittiin kaksinkertaistavan rakenteen palonkestoajan, ja vastaavasti suojaaminen kaksinkertaisella vanerilevyllä lisäsi palonkestoaikaa 50 prosenttia (Peng ym. 2012).

4.2.1 Suojaverhous

Suojaverhouksella tarkoitetaan verhousta, joka suojaa tietyn ajan sen takana olevaa rakennetta syttymiseltä, hiiltymiseltä tai muulta vaurioitumiselta. Suojaverhous ei ole sama kuin palosuojaus: suoja-verhouksessa ei saa esiintyä suojaverhousajan kuluessa vaurioita, joiden kautta palo pääsee vaurioitamaan suojattavaa rakennetta. Palosuojauksessa sen sijaan lievää vaurioitumista saa esiintyä. Suojaverhouksen takana lämpötila ei saa nousta tiettyä lämpötilaa korkeammaksi ja nämä lämpötilat ovat matalammat kuin palosuojauksessa. Esimerkiksi 13 mm:n kipsikartonkilevy toimii palosuojauksena seinässä 15 minuuttia, mutta suojaverhouksena 10 min. Samaan K₂ 10 -suojaverhousluokkaan päästään myös esimerkiksi 12 mm:n vanerilevyllä tai 10 mm:n OSB-levyllä (D-s2, d2 -luokan rakennustarvikkeita), mutta joissakin tapauksissa suojaverhoukselta vaaditaan A2-s1, d0 -luokkaa, jolloin puumateriaaleja ei voida käyttää. (Puuinfo 2017, 36.)

4.2.2 Palonestokemikaalit

Palonestokemikaaleilla pyritään vaikuttamaan puun palamiseen hidastamalla syttymistä tai vähentämällä palamisen lämmöntuottoa ja liekkien leviämistä palavilla pinnoilla. Palosuoja-aine voidaan imeyttää puuhun tai levittää puurakenteen pinnalle. Palonestokemikaalien toiminta voidaan jakaa seuraaviin mekanismeihin (Rowell ja Dietenberger 2013, 141):

1. Hiilen muodostumisen lisääminen matalammissa lämpötiloissa
2. Vapaiden radikaalien muodostumisen estäminen liekissä
3. Fysikaalisen suojakerroksen muodostaminen puun pinnalle
4. Puun lämmönjohtavuuden lisääminen
5. Palavien kaasujen laimentaminen lisäämällä palamattomien kaasujen tuotantoa
6. Haihtuvien kaasujen lämpösisällön alentaminen

Puun palaessa syntyvä hiiltymäkerros toimii eristeenä suojaten sen alla olevaa puuta palamiselta: hiiltymän hiili-hiilidokset eivät hajoa alle 3000 °C:n lämpötiloissa, ja hiilikerros toimii esteenä pyrolyysikaasujen vapautumiselle palamattomasta puusta samalla kun se estää ilman hapen pääsyn hiilikerroksen alle (Lowden ja Hull 2013, 3). Monien palonestoaineiden toiminta perustuukin hiilen muodostumisen lisäämiseen ja lämmöntuoton alentamiseen, koska hiiltymistä tapahtuu nimenomaan alemmissa lämpötiloissa. Kun enemmän selluloosaa dehydroituu alemmissa lämpötiloissa, helposti palavien kaasujen määrä vähenee ja muodostuu enemmän hiiltä suhteessa helposti syttyvään paljon levoglukosaania sisältävään terva.

Palonestokemikaalien toiminta voi perustua useaan edellä mainittuun mekanismiin. Esimerkiksi palonestokemikaalina käytetty ammoniumdivetyfosfaatti eli monoammoniumfosfaatti ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) hajoaa kuumentuessaan ammoniakiksi ja fosforihapoksi. Fosforihappo katalysoi selluloosan dehydraatiota ja edistää hiiltymistä. Fosforihapon hajotessa muodostuu epästabiileja fosfaattiestereitä, jotka puolestaan hajotessaan muodostavat hiilidioksidia. Hiilidioksidi laimentaa helposti syttyvien kaasujen ja hapen määrää ilmassa. Yhdessä tärkkelyspohjaisten materiaalien kanssa voidaan saada aikaan kuumuudessa paisuva suojakerros. (NPTEL 2018.) Fosforihapon kondensoituessa pyrofosfaatiksi endotermisessä reaktiossa vapautuu vettä, joka viilentää puuta ja osaltaan laimentaa pyrolyysikaasuja (Lowden ja Hull 2012, 9). Monoammoniumfosfaatin käyttö voi lisätä puun vesipitoisuutta kosteissa olosuhteissa tai heikentää puun rakennetta kohonneissa lämpötiloissa esimerkiksi kattorakenteissa, joten se sopii paremmin sisäkäyttöön (Lowden ja Hull 2013, 9 ja 12). Vesiliukoisena yhdisteenä se myös liukenee rakenteesta kosteissa oloissa, minkä vuoksi käsittely pitää toistaa säännöllisin väliajoin. Ammoniumpolyfosfaatin käyttö palonestokemikaalina vähentää savuntuotantoa, mutta voi aiheuttaa metallikiinnikkeiden korroosiota (Rowell ja Dietenberger 2013, 147).

Halogeenien, kuten bromin ja kloorin, käyttö palonestokemikaaleina perustuu niiden kykyyn estää hydroksyyli- ja happiradikaalien muodostumista ilmassa (Rowell ja Dietenberger 2013, 144). Halogenoitua tuotteita saattavat kuitenkin palossa lisätä savunmuodostusta ja aiheuttaa myrkyllisten kaasujen muodostumista ja korroosiota, ja niiden käyttöä pyritään korvaamaan muilla aineilla.

Epäorgaanisten hydroksidien ja karbonaattien (alumiinihydroksidi, magnesiumhydroksidi ja magnesiumkarbonaatti) toiminta perustuu niiden endotermiseen hajoamiseen ja sen tuloksena syntyneiden veden ja karbonaattien kohdalla hiilidioksidin viilentävään ja palokaasuja laimentavaan vaikutukseen (Lowden ja Hull 2013, 14). Alumiinihydroksidista vapautuu vettä matalammassa lämpötilassa (180 – 200 °C) kuin magnesiumhydroksidista (320 – 340 °C). Kalsiumkarbonaattia voidaan käyttää palamattomana täyteaineena. Näiden mineraalisten yhdisteiden käytön huonona puolena on se, että niitä täytyy palosuojauksessa käyttää suuria määriä, mikä voi puolestaan vaikuttaa puun mekaanisiin ominaisuuksiin.

Suojaavan kerroksen puun pinnalle muodostavien kemikaalien tarkoitus on estää syttyvien kaasujen haihtuminen puusta ja hapen pääsy palavaan kohtaan. Esimerkiksi piitä sisältävät yhdisteet muodostavat pintaan kovan, sileän kerroksen kuumuutta, syttymistä, hankautumista ja korroosiota vastaan. Hapettumisen seurauksena syntyy epäorgaanista piioksidia, joka estää syttyvien kaasujen haihtumista ja suojaa lämpösäteilyltä (Lowden ja Hull 2013, 13). Käyttämällä piitä, fosforia ja typpeä sisältäviä yhdisteitä samanaikaisesti saadaan aikaan yhteisvaikutus, jossa fosfori edistää hiiltymistä, typpi laimentaa palavia kaasuja ja pii muodostaa hiiltymän päälle suojakerroksen lämpösäteilyä ja liekkejä vastaan (Lowden ja Hull 2013, 13). Puun palonestokemikaaleina käytettäviä typpeä sisältäviä yhdisteitä ovat ammoniumpolyfosfaattien lisäksi esimerkiksi guanidiinifosfaatit ja guanyyliureafosfaatti (Lowden ja Hull 2013, 12).

Boorihappo ja booraksi (boorihapon natriumsuola) ovat yleisesti käytettyjä palonestokemikaaleja. Boori toimii piin tavoin muodostaen sulaessaan lasimaisen kerroksen rakenteen pinnalle. Booraksi

hidastaa liekin leviämistä, mutta edistää hehkuvaa ja kytevää paloa. Boorihappo puolestaan vähentää kytemistä, minkä vuoksi boorihappoa ja booraksia käytetään yleensä yhdessä (Rowell ja Dietenberger 2013, 147).

Paisuvien palosuojamaalien toiminta perustuu reaktioon, jossa maali paisuu korkeassa lämpötilassa ja muodostaa puun pinnalle eristävän hiiltymän. Palosuoja-aineen hiiltyvänä komponenttina voidaan käyttää polyoleja, joiden hiiltyminen tapahtuu matalammassa lämpötilassa kuin puulla. Yhdessä epäorgaanisen hapon kanssa polyolit voivat muodostaa estereitä ja katalysoida selluloosan dehydraatiota. Paisuva yhdiste (esim. melamiini, urea tai guanidiini) tuottaa hajotessaan kaasuja, jotka paisuttavat muodostunutta eristävää hiilikerrosta. Lisäksi tarvitaan kemikaaleja (esimerkiksi hartseja), jotka stabiloivat paisuneen hiiltymärakenteen. (Rowell ja Dietenberger 2013, 145.)

Nanokomposiittien käyttöä puun palosuojauksessa on toistaiseksi tutkittu melko vähän, vaikka niitä käytetäänkin esimerkiksi polymeerien ja teräksen palosuojaukseen (Lowden ja Hull 2013, 15). Nanopartikkelit tunkeutuvat puun rakenteeseen tukkien putkiloita, huokosia ja soluvälejä. Nanokolokuokan piidioksidia voidaan käyttää yhdessä ammoniumfosfaattiyhdisteiden kanssa, jolloin näiden liukeminen puusta hidastuu ja palamisen aikainen lämmöntuotto ja savun ja myrkyllisten kaasujen muodostuminen vähenee (Zhu ym. 2014).

Taulukossa 3 on esitetty esimerkkejä Suomessa saatavilla olevista palonestokemikaaleista ja niiden vaikuttavista aineista ja toimintaperiaatteista. Näistä kolmea ensimmäistä testattiin käytännön palokokeissa (ks. 5.1.1). Aineiden tarkat koostumukset ovat yleensä liikesalaisuuksia ja taulukossa esitetään vain tiedot, jotka ovat julkisesti löydettävissä valmistajien tai maahantuojien nettisivuilta.

TAULUKKO 3. Suomessa saatavilla olevia palonestokemikaaleja

Kemikaali	Valmistaja / maahantuoja	Vaikuttava aine	Toimintaperiaate / ominaisuudet
Firefain 5875 (5875 FAIN Fire Protection Liquid)	http://www.faintend.fi/index.php/en-products/en-special-products Oy Faintend Ltd, Salo	modifioitu fosfaattisuola, tyyppi, pinta-aktiiviset aineet	- tyypen ja fosforin yhteisvaikutus (hiiltymisen edistäminen, palokaasujen laimentaminen)
Palonot F1	http://palonot.com Palonot Oy, Vantaa	1-hydroksi etylideeni-1,1-difosfonaattihappo ("sisältää myös stabilointi- ja neutralointiaineita, jotka toimivat lisäksi palonestoaineina")	- levitysmäärä 200 g/m ² - paloluokka B-s1, d0
Exolit AP 420	https://www.clariant.com/en/Solutions/Products/2014/03/18/16/31/Exolit-AP-420 Clariant plastics & coatings (Deutschland) GmbH	ammoniumpolyfosfaatti	
Burnblock	https://novenberg.fi/burnblock/ Novenberg Oy	"- elintarvikkeista tuttuja aineita, esimerkiksi ruokasuolaa" - natriumbentsoaatti	- estää tehokkaasti hapen pääsyn käsiteltyyn kohteeseen - vesiohenteinen, myrkytön, biohajoava, neutraali pH (7,2) - paloluokka B-s1, d0 (LVL)
FIRE SAFE	http://www.palonsuojaus.com/fire_safe.htm T:mi Fire Safe Seppo Saari, Mustasaari	"- nestettä, joka fysikaalisilta ominaisuuksiltaan muistuttaa vettä - myrkytön, hajuton ja väritön happamalle haiseva neste"	" Käsitellyn materiaalin pinnassa aine alkaa kiehua 110°C lämpötilassa ja reagoi palavan materiaalin kuumentuessa syntyvien kaasujen kanssa kehittäen tyypeä ja hiilidioksidia, mikä estää palamisen. Puun

			huokosiin ja kuituihin tarttunut suoja-aine kuplii ja muodostaa lämpöä eristävän ja kaasujen kulkua estävän alueen, joka myös vastustaa syttymistä."
Firewall Biopaint	http://biopaint.fi/tuotteet/		
	BioPaint Oy		"- ekologinen, myrkytön, hajuton ja sävytettävissä oleva palosuojamaali" - korkea pH suojaa myös homeelta - sisäkäyttöön - palosuojaa EI 15
Fontefire WF	https://new.tikkurila.fi/teollinen_maalaus/tuotteet/fontefire_wf		
	Tikkurila Oyj		- vesiohenteinen, paisuva, palamista hidastava maali sisä- ja ulkokäyttöön - sisältää biosideja, jotka suojaavat maali-pintaa homehtumiselta - levitysmäärä 2*175 g/m ² - paloluokka B-s1, d0
HR-Prof	http://hrprof.eu		
	HR PROF Oy, Karjaa	- rauta(III)fosfaatti	- palamattomana aineena hidastaa syttymistä ja liekin leviämistä - paloluokka B-s1, d0 - levitysmäärä 3*100 g/m ² - sisä- ja ulkokäyttöön - myrkytön, ei hygroskooppinen, fungisidinen
Inwood Fire B	https://www.renotech.fi/uploads/1/0/7/6/107635591/inwood_fire_b_palonestokyllaste.pdf		
	Vincents Polyline / Renotech Oy, Turku	- booraksi, kaliumhydroksidi	- paloluokka B-s1, d0 - levitysmäärä ≥300 ml/m ²
MP FR Texterior	https://www.renotech.fi/uploads/1/0/7/6/107635591/mp_fr_esite.pdf		
	Renotech Oy, Turku	- rautadivetyfosfaatti	- vesiohenteinen, sävytettävä palosuojaa ulkokäyttöön - paloluokka B-s1, d0 - levitysmäärä ≥300 g/m ² - myrkytön, biosidinen, ei hygroskooppinen
MP FR Ultra	https://docplayer.fi/20249864-Www-renotech-fi-b-s1-d0-luokan-puunsuoja.html		
	Renotech Oy, Turku	- karbamidin ja kaliumkarbonaatin yhdistelmä, lisäaineita	- vesiohenteinen, kirkas palosuojaa sisäkäyttöön - paloluokka B-s1, d0 - levitysmäärä ≥300 g/m ² - myrkytön
NT Deco	https://www.nordtreat.com/fi/palonsuoja-aineet/nt-deco		
	Nordtreat	- kaliumyhdisteet, sideaineet, pigmentit, lisäaineet	- sisä- ja ulkokäyttöön - vesiohenteinen, kirkas tai kuultava (sävytetty) - paloluokka B-s1, d0 - levitysmäärä ≥300 g/m ² - M1-päästöluokka, suojaaa hometta, lahoa ja termittejä vastaan
NT Neutra	https://www.nordtreat.com/fi/palonsuoja-aineet/nt-neutra		
	Nordtreat	- kaliumyhdisteet, sideaineet, pigmentit, lisäaineet	- sisäkäyttöön - vesiohenteinen, kirkas - soveltuu erityisesti kuusen, lehtikuusen ja setrin teolliseen painekäsittelyyn - paloluokka B-s1, d0 - levitysmäärä ≥300 g/m ² - M1-päästöluokka, suojaaa hometta, lahoa ja termittejä vastaan
TEKNOSAFE 2407	https://www.teknos.com/fi-FI/teollisuus/erikoispinnoitteet/puun-palosuojamaalaus/teknosafe-2407/		
	Teknos, Helsinki		- paisuva, peittävä palosuojapohjamaali ulko- ja sisäkäyttöön - levitysmäärä 250 – 350 g/m ² - paloluokka B-s1, d0
TEKNOSAFE 2467	https://www.teknos.com/fi-FI/teollisuus/erikoispinnoitteet/puun-palosuojamaalaus/teknosafe-2467-palosuojalakkajärjestelmä/		
	Teknos, Helsinki		- paisuva, kuultava palosuojalakka sisäkäyttöön - levitysmäärä 200 g/m ² - paloluokka B-s1, d0

5 PALOSUOJATUN RAKENNUSMATERIAALIN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN

5.1 Rakennusmateriaalin palo-ominaisuuksien tutkiminen

LVL ja CLT ovat puutuotteita ja ne luokitellaan siten palavaksi materiaaliksi. LVL:n syttymislämpötila on noin 270 °C eikä spontaania syttymistä tapahdu alle 400 °C:n lämpötilassa (Liski 2017). LVL:n valmistuksessa käytettävä fenolipohjainen liima ei vaikuta puutuotteen hiiltymiseen, joten LVL-tuotteita käsitellään hiiltymämitoituksissa kuten sahatavaraa (Barber ja Gerard 2015, 3). CLT-levyissä käytetty polyuretaaniliima sen sijaan aiheuttaa lamellien irtoamista eli delaminaatiota siinä vaiheessa, kun hiiltyminen on edennyt liimasaumaan saakka. Irronneen lamellin alta paljastuva lämmennyt puupinta on altis nopeammalle hiiltymälle (jopa 1,67 mm/min, kun normaali hiiltymisnopeus on keskimäärin 0,65 mm/min; Barber ja Gerard 2015, 7) eli tällaisissa tuotteissa hiiltyminen tapahtuu usealla hiiltymisnopeudella. Delaminaatio tapahtuu helpommin vaakarakenteissa kuin pystyrakenteissa. (Lahtela 2018, 80.) CLT:n lamellien irtoaminen ja putoaminen huonetilaan lisäävät tilan palokuormaa, ja pudonneen kerroksen alta paljastuneen hiiltymättömän kerroksen palaminen kasvattaa palon intensiteettiä ja kestoa ja voi jopa johtaa uuteen lieskahdukseen (Barber ja Gerard 2015, 7). CLT-rakenteet voidaan suojata kipsilevyillä palonkestoajan kasvattamiseksi (Barber ja Gerard 2015, 4).

Materiaalin palo-ominaisuuksiin vaikuttavia muuttujia ovat

- syttymisherkyys
- liekin leviämisenopeus materiaalin pinnalla
- lämmöntuotto (tuotetun lämmön määrä ja lämmöntuoton nopeus)
- sammumisherkyys
- savun tai myrkyllisten kaasujen tuotto (Lowden ja Hull 2013, 5)

5.1.1 Kartiokalorimetrikoe

Kartiokalorimetrikokeessa (ISO 5660) mitataan erilaisia lämmön- ja savuntuottoon liittyviä parametreja palotilanteessa ja sen avulla voidaan ennustaa tuotteen käyttäytymistä suuremman kokoluokan SBI-kokeessa (SFS-EN 13823, ks. luku 5.1.2) ja arvoida suuntaa antavasti materiaalin paloluokka (käytännössä luokat B, C ja D) käyttämällä syttymisaikaan ja lämmöntuottoon liittyviä yksinkertaistettuja raja-arvoja (Östman ym. 2006, 61; Taulukko 4).

Kokeessa pieni koekappale (100 mm x 100 mm, maksimipaksuus 50 mm) altistetaan 50 kW/m²:n lämpösäteilylle ja sytytetään kipinän avulla. Kalorimetrikokeet perustuvat siihen, että kaikki hiilihydraattipohjaiset materiaalit tuottavat noin 13 MJ lämpöä happikiloa kohti, eli noin 3 MJ ilmakiloa kohti. Lämmöntuotto voidaan siten mitata mittaamalla palokaasujen hapen pitoisuutta. Savuntuottonopeus määritetään mittaamalla savun tiheydestä riippuvaa lasersäteen vaimenemista palokaasujen poistokanavassa.

Kartiokalorimetrikokeen avulla voidaan ennustaa, miten materiaali käyttäytyy palossa silloin kun ilmanvaihto ei rajoita paloa, ja koekappaleen ollessa pieni palon etenemistä voidaan seurata vain syvyyssuunnassa, ei sivusuunnassa. Tämän takia tulokset eivät päde kaikissa palotilanteissa. Varsinainen materiaalin paloluokitus tehdään luvussa 3.1.4 mainittujen standardoitujen testien avulla.

Tärkeimmät kartiokalorimetrikokeessa määritettävät materiaalin palokäyttäytymisen vaikuttavat muuttujat ovat syttymisaika, lämmöntuoton huippuarvo ja keskimääräinen savuntuottonopeus. Kartiokalorimetrikokeessa määritetyn syttymisajan tai lämmöntuoton huippuarvon perusteella voidaan suuntaa-antavasti ennustaa materiaalin paloluokka (Taulukko 4; Östman ym. 2006).

TAULUKKO 4. Kartiokalorimetrikokeessa syttymisajan ja lämmöntuoton huippuarvon perusteella ennustettu materiaalin paloluokitus (Östman ym. 2006).

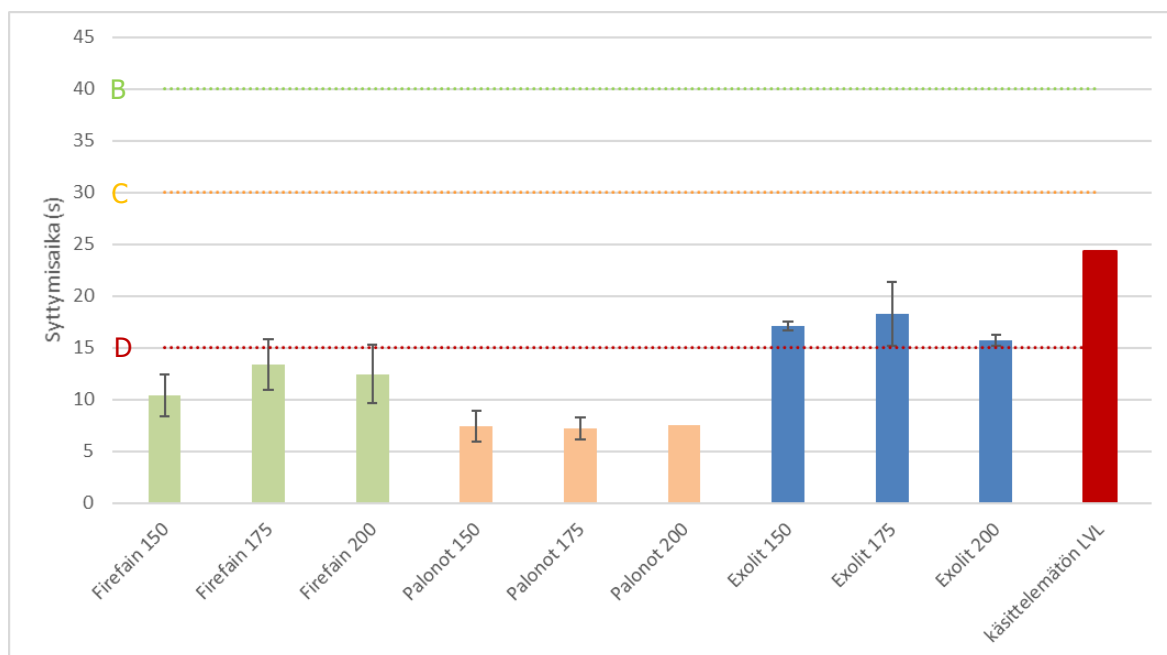
Euroluokka	Syttymisaika (s)	Lämmöntuoton huippuarvo (kW/m²)
B	≥ 40	≤ 100
C	≥ 30	≤ 180
D	≥ 15	≤ 250

Kartiokalorimetrikokeet suoritettiin Savonia AMK:n palolaboratoriossa ISO 5660-1:2002(E) -standardin mukaan. Kokeissa käytettiin kolmen eri palonestoaineen (Firefain 5785, Palonot F1 ja Exolit AP 420; Taulukko 3) kolmella eri pitoisuudella (150, 175 ja 200 g/m²) käsiteltyjä 100 mm x 100 mm x 40 mm kokoisia LVL:n (Stora Enso) kappaleita. Kustakin käsittelystä tehtiin kaksi rinnakkaista koetta. Lisäksi tehtiin yksi koe käsittelemättömällä LVL:llä. Kokeen kesto oli noin 600 s (601 – 607 s) eli noin 10 minuuttia. Kokeiden kaikki tulokset on esitetty liitteessä 1. Tulosten tulkinnat ovat suuntaa-antavia, koska rinnakkaisia kokeita oli vain kaksi kutakin käsittelyä kohti ja käsittelemättömästä LVL:stä oli saatavilla vain yksi testitulos.

Kartiokalorimetrikokeessa mitatut muuttujat ovat

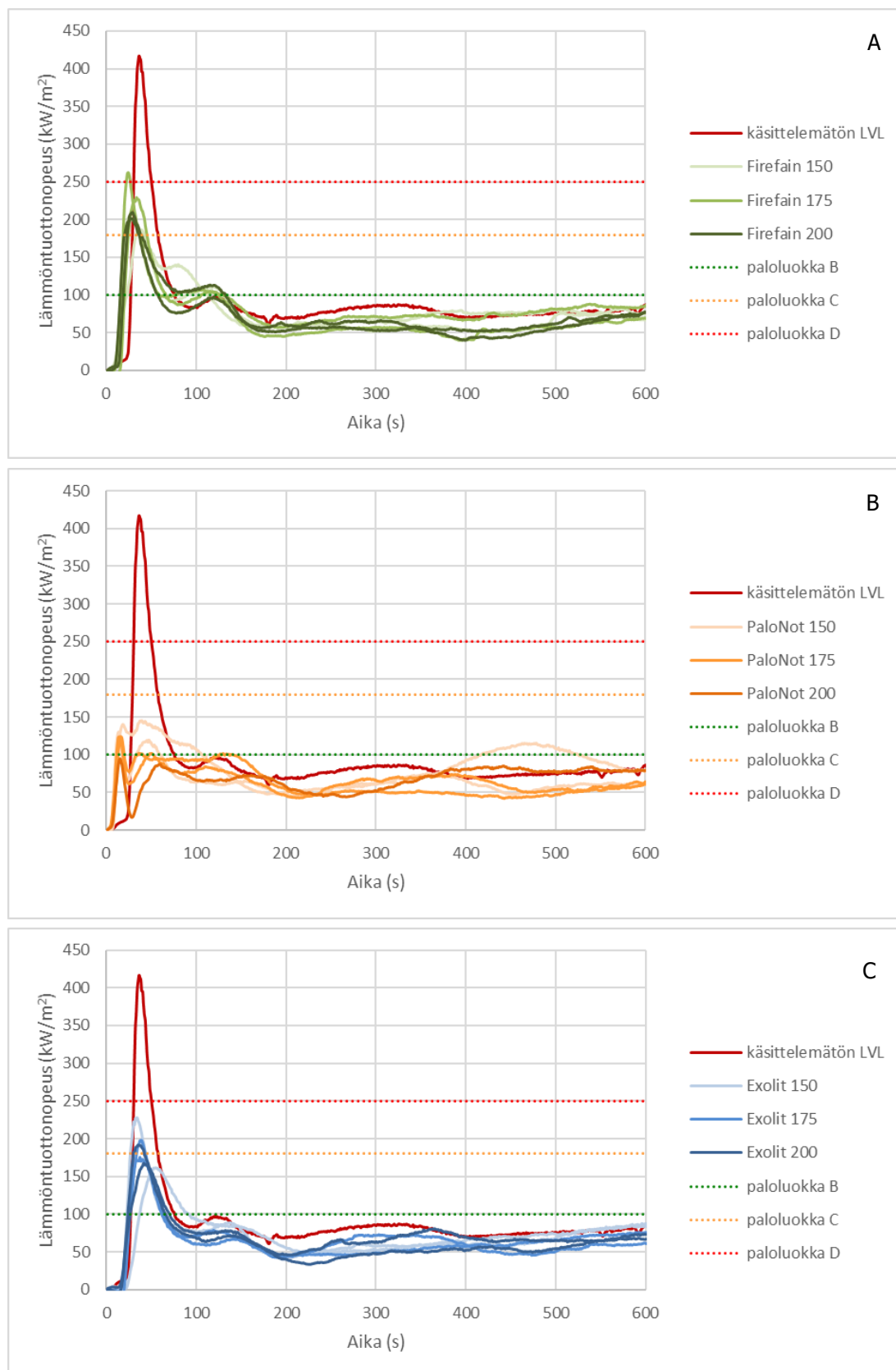
- syttymishetki: materiaalin katsotaan syttyneen, kun liekin kesto on yli 10 s (s)
- lämmönvapautumisnopeuden huippuarvo, 180/300 sekunnin keskiarvot (kW/m²)
- hetki, jolloin lämmönvapautumisnopeus on suurimmillaan (s)
- kokonaislämmöntuotto (MJ/m²)
- tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)
- massa alussa, syttymishetkellä ja lopussa (g)
- massahäviö (g/m²)
- massan häviämismuutos (g/m²s)
- savuntuotto ennen syttymistä ja syttymisen jälkeen (m²/m²)
- savuntuoton huippuarvon hetki ennen syttymistä ja syttymisen jälkeen (s)
- hiilimonoksidin (CO) tuotto (kg/kg)
- hiilidioksidin (CO₂) tuotto (kg/kg)

Kaikki palonestoainekäsittelyt lyhensivät **syttymisaikaa** verrattuna käsittelemättömään puuhun. Palonestokemikaaleilla käsitellyistä koekappaleista Palonot-käsitelty LVL syttyi nopeimmin (alle 10 sekunnissa) ja Exolit hitaimmin (15 – 20 sekunnissa; Kuvio 1). Käsittelemättömällä LVL-koekappaleella oli pisin syttymisaika (lähes 25 s). Pelkän syttymisajan perusteella sekä Firefain- että Palonot-käsitelty LVL kuuluisivat paloluokkaan D ja Exolit-palosuojaj-aineella käsitelty LVL luokkaan C yhdessä käsittelemättömän viilupuun kanssa.



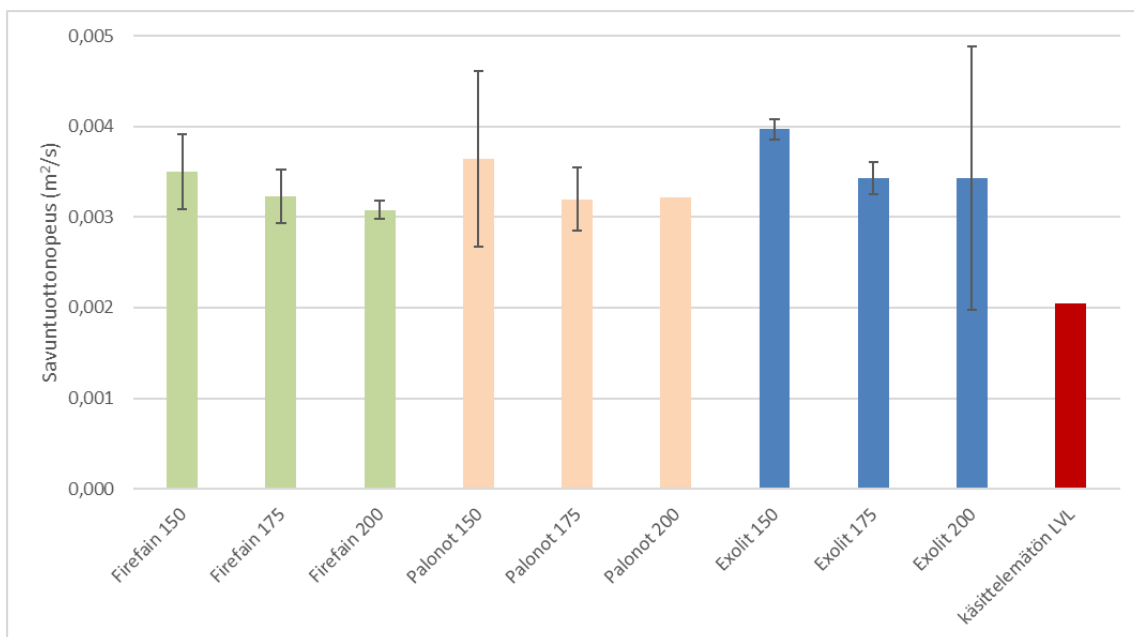
KUVIO 1. Syttymisaika eri palonestokemikaaleilla käsitellyissä koekappaleissa kartiokalorimetrikokeessa. Katkoviivoilla on esitetty syttymisaikaan perustuvat suuntaa-antavat raja-arvot (Östman ym. 2006) materiaalin paloluokille.

Kaikki palonestokäsittelyt pienensivät **lämmöntuottonopeuden huippuarvoa** selvästi. Käsittelemättömän LVL:n lämmöntuottonopeuden huippuarvo oli yli 400 kW/m² (Kuvio 2). Lämmöntuottonopeus oli pienin Palonot-käsitellyissä näytteissä. Kemikaalien levitysmäärällä ei ollut suurta vaikutusta. Lämmöntuottonopeuden perusteella Palonot-käsiteltyjen (levitysmäärä ≥ 200 g/m²) LVL-tuotteiden voidaan ennustaa asettuvan B-paloluokkaan (Kuvio 2 B). Firefain- ja Exolit-käsitellyt tuotteet (levitysmäärä 175 – 200 g/m²) asettuisivat lämmöntuoton perusteella paloluokkaan C (Kuvio 2 A ja C).



KUVIO 2. Lämmöntuotto eri palonestokemikaaleilla käsitellyissä koekappaleissa kartiokalorimetrikokeessa. A: Firefain 5875, B: Palonot F1, C: Exolit AP 420. Kemikaalikäsittelyt olivat 150, 175 ja 200 g/m². Katkoviivoilla on merkitty ennustettu paloluokka SBI-kokeessa.

Savuntuottonopeudessa ei ollut eroja eri palonestokemikaalikäsittelyjen välillä. Palonestokäsittely näytti lisäävän savuntuotantoa, sillä savuntuottonopeus oli selvästi pienin käsittelemättömässä viilu-
puussa (Kuvio 3).



KUVIO 3. Savuntuottonopeus eri palonestokemikaaleilla käsitellyissä koekappaleissa kartiokalorimetrikokeessa.

5.1.2 Yksittäisen palavan esineen koe (SBI-koe)

Yksittäisen palavan esineen kokeessa (SFS-EN 13823) testataan materiaalin palonlevittämismomenteja ja savunmuodostusta tilanteessa, jossa yksittäinen palava esine sytyttää palon. Testattavan materiaalin koekappaleet (495 mm x 1500 mm ja 1000 mm x 1500 mm) kiinnitetään kulmittain taustatelineeseen ja sytytetään niiden muodostamassa nurkassa olevalla propaanikaasupolttimella, jonka teho on 30 kW. Savukaasut johdetaan poistoputkistoon, jossa mitataan palon lämmöntuottoa ja savunmuodostusta. Koe kestää 20 minuuttia ja sen aikana seurataan liekin leviämistä sivusuunnassa ja liekehtivien pisaroiden ja osien muodostumista. Menetelmää käytetään yhtenä osana rakennustuotteiden paloluokitusta (ks. Taulukko 1).

SBI-kokeen simuloinnit tehtiin Kuopion Pelastusopistolla 8.6.2018. Kokeissa testattiin paneeli- ja LVL-seinärakenteita, joista osa oli käsitelty palonestokemikaaleilla. Kokeita ei kuitenkaan pystytty järjestämään standardin mukaisiksi, ja lämpötilaa ja savuntuottoa ei pystytty mittaamaan. Simulaatioissa pystyttiin siis seuraamaan lähinnä liekin leviämistä ja rakenteen hiiltymistä ja vaurioitumista videomateriaalin ja valokuvien perusteella.

Palonestokemikaalilla käsitelty LVL-rakenne syttyi palamaan ja hiiltyi, mutta ei palanut puhki toisin kuin paneeliseinärakenne (Kuva 1). Lämmöntuottoa ja savunmuodostusta ei pystytty mittaamaan, mutta koska myös palonestokäsitellyssä LVL-rakenteessa liekki näytti leviävän sivusuunnassa pitemmän seinän reunan saakka (Kuva 1 C), tuote ei voisi LFS-arvon perusteella saada D-luokkaa parempaa luokitusta (Taulukko 1). Sivuttainen liekin leviäminen määritellään vähintään 5 sekunnin ajan pysyväksi liekiksi tuotteen pinnalla (SFS-EN 13823) ja tämän havaitseminen liekkien alta pelkästä videokuvasta oli haastavaa. Kuvan 1 C perusteella tuote oli kuitenkin hiiltynyt pitkän seinän reunaan asti.



KUVA 1. Kuopion pelastusopistolla tehdyt SBI-kokeet. A – C: LVL, käsitelty kaksi kertaa Palonot-palonestokemikaalilla (levitysmäärä 200 g/m²), D – E: Paneeliseinärakenne. (Kuvat: Kalle Kiviranta 8.6.2018 [A – C], 15.12.2017 [D – E].)

5.2 Palosuojatun rakennusmateriaalin vaikutukset sisäympäristöön

Suomessa rakennusmateriaaleille on laadittu päästöluokitus, joka esittää vaatimukset työ- ja asuintiloissa käytettäville materiaaleille hyvän sisäilman laadun kannalta. Luokituksen myöntää Rakennustietosäätiö RTS sr ja siinä rakennusmateriaalit jaetaan kolmeen luokkaan M1 – M3, joista M1 on paras. Luokituksessa annetaan vaatimukset rakennusmateriaalien epäpuhtauspäästöille, näistä tärkeimpinä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC), formaldehydin ja ammoniakkin päästöille. M1-luokassa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispäästön (TVOC) tulee olla alle 0,2 mg/m²h ja formaldehydin 0,05 mg/m²h (Rakennustietosäätiö RTS sr 2019). Esimerkiksi Stora Enson Kerto-LVL on VTT:n testissä luokiteltu vähäpäästöiseksi M1-luokan tuotteeksi (TVOC-emissio 0,062 mg/m²h, formaldehydi 0,008 mg/m²h; Metsäwood 2017). Käsittelemättömästä puusta (pois lukien kovapuulajit) tehdyt laudat ja hirret rinnastetaan M1-luokkaan, vaikka tuoreena niiden VOC-päästöt voivat olla raja-arvoja suuremmat (Rakennustietosäätiö RTS sr 2019). Yksittäisten VOC-yhdisteiden kohdalla käytetään EU:n ns. LCI (*Lowest Concentration of Interest*) -arvoa (EU-LCI Working Group 2019). EU:ssa on kuitenkin valmisteltu kansallisten päästöluokitusten korvaamista CE-merkinnässä ilmoitetuilla sisäilmaan vapautuvilla

VOC-päästöillä, joissa ei huomioitaisi esimerkiksi suomalaisessa rakennusmateriaalin päästoluokituksessa tai sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksessa (545/2015) käytettyä TVOC-emissiota lainkaan (Kukkonen 2017).

Itä-Suomen yliopiston ympäristö- ja biotieteiden laitoksella tutkittiin käsittelemättömän ja palonestoaineella (Palonot, 270 g/m²; ks. 5.1.1) käsitellyn Varkauden Stora Enson LVL:n sekä puhtaan puun haihtuvien orgaanisten aineiden päästöjä huoneen lämpötilassa toukokuussa 2018 (Hyttinen 2018). Kokeessa pienet koekappaleet (18 x 18 x 80 mm, n. 13 g) laitettiin 1 litran lasikammioihin ja näytteen annettiin vakioitua 24 tuntia 21 °C:ssa. Koekappaleet asetettiin kammion pohjalle pitkittäin, jolloin emissioita voitiin laskea tulevan muilta paitsi yhdeltä pinnalta eli yhteensä noin 0,005 m²:n pinta-alalta. Ilmasta kerättiin näytteet Tenax TA -adsorbenttiputkiiin 5 minuutin ajan tilavuusvirralla 120 ml/min ja analysoitiin kaasukromatografilla, johon oli yhdistetty massaselektiivinen detektor (TD-GC-MS). Yhdisteet tunnistettiin ja niiden pitoisuudet laskettiin ns. tolueeniekvivalenteina (Hyttinen 2018). Pitoisuudet ilmassa muutettiin pinta-alaspesifisiksi emissionopeuksiksi (SFS-EN ISO 16000-9; Taulukko 5).

TAULUKKO 5. Palonestokemikaaleilla käsitellyn LVL:n, käsittelemättömän LVL:n ja käsittelemättömän puun orgaanisten haihtuvien aineiden emissiot huoneenlämpötilassa. Asumisterveysasetuksen (545/2015) toimenpideraja-arvot tai EU-LCI -raja-arvot (EU-LCI Working Group 2019) ylittävät yhdisteet ja niiden pitoisuudet on lihavoitu.

	palonestokäsitelty LVL (µg/m ² h)	käsittelemätön LVL (µg/m ² h)	käsittelemätön puu (µg/m ² h)
TVOC	11 500 (7 950 µg/m³)	2 320 (1600 µg/m³)	740 (510 µg/m³)
ALDEHYDIT			
butanaali	19	10	16
pentanaali	-	77	72
heksanaali	435	523	328
nonanaali	19	43	-
ALKOHOLIT			
1-butanoli	13	9	9
1-pentanoli	57	36	16
1-heksanoli	6 180 (4 260 µg/m³)	4	-
2-etyyli-1-heksanoli	193 (133 µg/m³)	-	-
1-oktanoli	183	-	-
3-oktanoli	171	-	-
TERPEENIT			
α-pineeni	441	680	120
β-pineeni	109	258	13
δ-kareeni	10	22	-
limoneeni	41	100	14
MUUT			
2-pentyyli-furaani	19	33	4
4,8-dimetyyliundekaani	1 190	-	-
n-heksyylietteri	430	-	-
asetoni	87	135	146
2-butanoni	17	-	-
heksaani	-	28	-

Palonestokemikaalilla käsitellystä LVL:stä emittoitui selvästi eniten VOC-yhdisteitä. Käsittely lisäsi erityisesti pitempiketjuisten alkoholien (heksanoli, oktanoli) päästöjä, joita ei ollut käsittelemättömässä LVL:ssä ja puhtaassa puussa käytännössä lainkaan. Erikoista on, että LVL:stä haihtui enemmän α - ja β -pineeniä kuin puhtaasta sahatavarasta. Nämä yhdisteet ovat luontaisesti erityisesti männystä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, joilla on havaittu myönteisiä vaikutuksia mm. immuunipuolustuksen aktivoitumiseen, mutta jotka voivat suurina pitoisuuksina myös ärsyttää hengitysteitä (Muilu-Mäkelä ym. 2014, 8-9).

Asumisterveysasetuksessa (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 545/2015) haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tolueneivasteella lasketun kokonaispitoisuuden toimenpideraja huoneilmassa on $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja yksittäisellä VOC:lla $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Palonestokemikaaleilla käsitellyn LVL:n TVOC-päästöt olivat suuret: ne olivat viisinkertaiset verrattuna käsittelemättömään LVL:ään ja yli 15-kertaiset verrattuna puhtaaseen puuhun ja 20-kertaiset verrattuna asumisterveysasetuksen toimenpiderajaan (Taulukko 5). Useiden VOC-yhdisteiden päästöt ylittivät yksittäisen yhdisteen raja-arvon $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Asumisterveysasetuksessa (545/2015) on asetettu erikseen raja-arvo $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 2-etyyli-1-heksanolille, jota syntyy yleensä muovimattojen pehmittiminä käytettyjen ftalaattien hajotessa ja jonka on usein raportoitu olevan yhteydessä koettuihin sisäilmaoireisiin (Järnström ym. 2017, 23). Sen pitoisuus käsitellyssä LVL:ssä oli $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Käsittelemättömässä LVL:ssä ja puhtaassa puussa yhdistettä ei havaittu (Taulukko 5).

EU-LCI-päästöarvot (terveysvaikutusten kannalta kiinnostavat alimmat pitoisuudet) ylittyivät ainoastaan 1-heksanolin kohdalla palonestokemikaalilla käsitellyssä LVL:ssä pitoisuuden ollessa yli kaksinkertainen EU-LCI -raja-arvoon $2100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nähden (EU-LCI Working Group 2019).

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Vuoden 2018 alusta voimaan tulleessa uudessa asetuksessa rakennusten paloturvallisuudesta on pyritty selkeyttämään ja vähentämään rakentamisen sääntelyä verrattuna aikaisempiin määräyksiin. Uudistuksen tavoitteena on ollut ohjata rakentamista kohti vähähiilisyttä ja lisätä mahdollisuuksia puurakentamiseen. Puun käytön lisääntyminen rakentamisessa voi auttaa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä ja ilmastotavoitteisiin pääsemisessä.

Uusi asetus rakennusten paloturvallisuudesta laajentaa P2-paloluokan yli 2-kerroksisten rakennusten käyttötarkoitusta ja mahdollistaa esimerkiksi 8-kerroksisten sairaaloiden ja hotellien tai 4-kerroksisten päiväkotien, koulujen ja liikerakennusten rakentamisen puurakenteisina. Tulevaisuudessa päiväkodit, koulut ja palvelurakennukset rakennetaankin entistä todennäköisemmin puusta. P2-paloluokan rakennuksen enimmäiskorkeuden nostaminen 28 metriin voi helpottaa esimerkiksi 8-kerroksisten toimistorakennusten toteuttamista. Puun käyttäminen lisäkerrosrakentamisessa voi asetuksen tuomien muutosten kautta helpottaa. Uudessa asetuksessa on myös lievennyksiä sisäpuolisten seinä- ja kattopinnojen suojaverhousvaatimuksiin: puurakenteita voi jättää näkyviin jopa 100 % edellyttäen, että kantavien ja osastoivien rakennusosien palonkestoaikaa pidennetään vastaavasti. Ulkopinnan suojaverhousvaatimusten keventäminen voi säästää rakennuskustannuksissa ja parantaa ulkoseinän rakennusfysikaalista toimintaa.

Uuden asetuksen tiukennukset verrattuna RakMK E1:n määräyksiin (esimerkiksi eri asuntoihin kuuluvien päällekkäisten kerrosten kieltäminen P3-paloluokassa tai yli 56 metriä korkean rakennuksen ulkopinnan ja lämmöneristeen tekeminen palamattomasta materiaalista) lisäävät paloturvallisuutta eivätkä juurikaan vaikuta rakentamisen kustannuksiin.

Puu on palava materiaali ja vaikka se massiivisena rakenteena säilyttääkin kantavuutensa palossa, se ei saa lisätä rakennuksen palokuormaa. Niin sanottu insinööripuu eli sahatavarasta liimaamalla valmistettu massiivipuu mahdollistaa vaativien kantavien rakenteiden toteuttamisen ja samalla nopean ja tehokkaan elementtirakentamisen, mikä parantaa puun kilpailuasemaa perinteiseen betonikerrostalorakentamiseen verrattuna. Erilaisten palonestokemikaalien avulla pyritään muokkaamaan puun palo-ominaisuuksia hidastamalla puun syttymistä ja vähentämällä lämmöntuottoa palamisen aikana. Rakennuksen ulkopinnat ovat alttiina kosteudelle ja auringonvalolle, jolloin etenkin vesiliukoisilla epäorgaanisilla suoloilla tehtyjä palosuojakäsittelyjä saatetaan joutua määräjain uusimaan tai pinnat pitää palosuojauksen lisäksi käsitellä maalaamalla tai muuten pinnoittamalla, mikä voi lisätä rakentamisen kustannuksia.

Savonia AMK:n kartiokalorimetrikokeissa testattiin puun pintaan levitettävien palosuojakemikaalien vaikutuksia viilupuun palosuojaukseen kolmella eri kemikaalilla ja eri levitysmäärillä. Palosuojakemikaalien käyttö lyhensi syttymisaikaa ja näytti lisäävän savuntuottoa. Lämmöntuotto kuitenkin pieneni keskimäärin puoleen ja parhaimmillaan jopa 75 % käsittelemättömään viilupuuhun verrattuna. Palosuojakäsittelyn avulla voidaan siten parantaa puun paloluokitusta ja mahdollistaa puun käyttäminen

myös vaativissa rakennuskohteissa. Alustavissa kokeissa palosuojakäsittelyn viilupuun haihtuvien orgaanisten aineiden emissiot ilmaan huoneen lämpötilassa ylittivät asumisterveysasetuksen ja rakennusmateriaalien M1-päästöluokituksen raja-arvot, ja sisäpinnoissa käytettäessä tuleekin varmistua palonestoaineiden myrkyttömyydestä ja tuotteet tulee tutkia etenkin haihtuvien orgaanisten aineiden osalta.

LÄHTEET

- AIRAKSELA, Mikko 2017. Kuusikymmentäviisi vuotta tulevaisuuden rakentajana. Puu- ja betonirakentamisen vertailu -hanke (Kuninkaantammi, Helsinki). Rakennusliike Reponen Oy. Seminaariesitys 21.11.2017. [Viitattu 2019-03-13.] Saatavissa: https://www.hel.fi/static/liitteet/kanslia/aluerakentaminen/kehittyvakerrostalo/Seminaari_2017/mika-airaksela_puu-ja-betonirakentamisen-vertailu.pdf
- BARBER, David ja GERARD, Robert 2015. Summary of the fire protection foundation report – fire safety challenges of tall wood buildings. *Fire Science Reviews* 4:5.
- BIONOVA OY 2017. Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomiomiseksi rakentamisen ohjauksessa. [Viitattu 2019-01-09.] Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Vahahiilinen_rakentaminen/Tiekartta_rakennuksen_elinkaaren_hiilijalanjaljen_huomioimiseksi
- BUCHANAN, Andrew H. ja ABU, Anthony K. 2017. Structural design for fire safety. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc. 415 s.
- DIETENBERGER, M. A. ja HASBURGH, L. E. 2016. Wood Products: Thermal Degradation and Fire. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 8 s. [Viitattu 2018-03-13.] Saatavissa: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2016/fpl_2016_dietenberger001.pdf
- EU-LCI WORKING GROUP 2019. EU-LCI Values. [Viitattu 2019-02-12.] Saatavissa: https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/eu-lci/values_en
- FINNSEMENTTI 2017. Myönteinen kehitys päästöjen alentamisessa jatkuu Finnsementillä. Lehdistö-tiedote 4.4.2017. [Viitattu 2019-01-15.] Saatavissa: <https://www.sttinfo.fi/data/attachments/00458/45877c59-4a23-4619-8862-9fbbb1eef0e0.pdf>
- FOREST PRODUCTS LABORATORY 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 s.
- HUUSKO, Tuulikki 2018. Suomen korkein puukerrostalo pian harjakorkeudessa Joensuussa. *RIA* 4/2018: 24–29.
- HYTTINEN, Marko 2018. Puunäytteiden VOC-emissiot. Mittausraportti 8.5.2018. Itä-Suomen yliopisto, Kuopion kampus, Ympäristö- ja biotieteiden laitos. Tilaja: Aku-Ville Paulman, Savonia AMK.
- JANTUNEN, Jorma. 2017. Perustelumuoisto ympäristöministeriön asetukseen rakennusten paloturvallisuudesta. Muistio, 28.11.2017. Ympäristöministeriö. 50 s. [Viitattu 2018-03-28.] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B68F439B3-9D6E-44C4-8618-34FE9387FCE8%7D/132701>
- JÄRNSTRÖM, Helena, KOIVUSAARI, Risto ja SAARI, Mikko 2017. Sisäilman laadun hallinta rakennushankkeen eri vaiheissa. Raportti VTT-S-06675-17. Espoo: VTT Expert Services Oy. 43 s. [Viitattu 2019-02-12.] Saatavissa: <https://cdnmedia.euofins.com/european-east/media/2847906/vtt-s-06675-17-rt-sisailman-laadun-hallinta-191217.pdf>
- KÄSNÄNEN, Iiro 2018. Katsaus puurakenteiden palosuojauksikäytänteisiin. Savonia-ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2019-01-17.] Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/149028>
- LAHTELA, Tero. 2018. Paloturvallinen puutalo. Asuin- ja toimitilarakentaminen. Helsinki: Puuinfo Oy. 103 s.
- LISKI, Kari 2017. LVL-teollisuus. Teoksessa: VARIS, Ritva (toim.) Puulevyteollisuus. Suomen Puuteollisuusinsinöörien Yhdistys ry. Bookwell Oy, Porvoo. Ss. 160-191.
- LOWDEN, Laura A. ja HULL, Terence R. 2013. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews* 2:4.

- KOLJONEN, Tiina, SOIMAKALLIO, Sampo, LEHTILÄ, Antti, SIMILÄ, Lassi, HONKATUKIA, Juha, HILDÉN, Mikael, REHUNEN, Antti, SAIKKU, Laura, SALO, Marja, SAVOLAHTI, Mikko, TUOMINEN, Pekka ja VAINIO, Terttu. Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019. 162 s. [Viitattu 2019-03-20.]. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161409>
- KUKKONEN, Esko 2017. EU voi kieltää materiaalien M1-päästöluokituksen – halpatuonti uhkasi terveyttä. Rakennuslehti 2.6.2017. [Viitattu 2019-02-13.] Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2017/06/eu-voi-kieltaa-materiaalien-paastoluokituksen-halpatuonti-uhkasi-terveytta/>
- METSO 2019. Murskatussa hiekassa piilee tuottoisa mahdollisuus. [Viitattu 2019-02-22.] Saatavissa: <https://www.metso.com/fi/showroom/kivenmurskaus/murskatussa-hiekassa-piilee-tuottoisa-mahdollisuus/>
- METSÄWOOD 2017. Kerto-käsikirja. Emissiot ja ympäristövaikutukset. [Viitattu 2019-01-17.] Saatavissa: <https://www.metsawood.com/global/tools/materialarchive/materialarchive/kerto-kasikirja-lvl-emissiot.pdf>
- MILLER, Sabbie A., HORVATH, Arpad ja MONTEIRO, Paulo J. M. 2016. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production on concrete by over 20%. Environmental Research Letters 11: 074029.
- MUILU-MÄKELÄ, Riina, HAAVISTO, Maarit ja UUSITALO, Jori 2014. Puumateriaalien terveysvaikutukset sisäkäytössä – kirjallisuuskatsaus. Metlan työraportteja 320. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos. 10 s.
- NPTel 2018. National Program on Technology Enhanced Learning 1999 – 2003. Fertilizer Engineering – Web course. Phosphorus Fertilizers. Lecture 22. Ammonium phosphates. [Viitattu 2019-01-31.] Saatavissa: <https://nptel.ac.in/courses/103107086/22>
- NYKÄNEN, Esa, HÄKKINEN, Tarja, KIVINIEMI, Markku, LAHDENPERÄ, Pertti, PULAKKA, Sakari, RUUSKA, Antti, SAARI, Mikko, VARES, Sirje, CRONHJORT, Yrsa, HEIKKINEN, Pekka, TULAMO, Tomi ja TIDWELL, Philip 2017. Puurakentaminen Euroopassa. LeanWOOD. VTT Technology 297. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.
- PEDUZZI, Pascal 2014. Sand, rarer than one thinks. UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS). March 2014. [Viitattu 2019-02-22.] Saatavissa: http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf
- PENG, Lei, HADJISOPHOCLEOUS, George, MEHAFFEY, Jim ja MOHAMMAD, Mohammad 2012. Fire Performance of Timber Connections, Part 1: Fire Resistance Tests on Bolted Wood-Steel-Wood and Steel-Wood-Steel Connections. Journal of Structural Fire Engineering 3: 107-132.
- PUUINFO 2012. Suojaverhoukset. Tekninen tiedote 13.4.2012. 7 s.
- PUUINFO 2013. Puurakenteen palomitoitus. Tekninen tiedote. 26.2.2013. 33 s.
- PUUINFO 2017. Tulta päin. Puu 1/17, 32 - 36. [Viitattu 2018-03-16.] Saatavissa: https://isu-su.com/puuinfo/docs/puulehti_1_2017_low
- PUUINFO 2018a. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa. [Viitattu 2019-01-09.] Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakentaminen/puurakentamisen-asema-ja-mahdollisuudet-suomessa>
- PUUINFO 2018b. Yleisimmät rakennejärjestelmät. [Viitattu 2019-01-17.] Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puusta-rakentaminen/yleisimmat-rakennejarjestelmät>
- RAKENNUSTIETOSÄÄTIÖ RTS sr 2019. M1-vaatimukset ja luokiteltujen tuotteiden käyttö. [Viitattu 2019-02-12.] Saatavissa: <https://m1.rts.fi/m1-vaatimukset-ja-luokiteltujen-tuotteiden-kaytto>
- RAKENNETUTKIMUS RTS 2018. Asunto- ja palvelurakentaminen kunnissa 2018 – 2020. Raportti 1. tutkimusyhenteenveto. Helsinki: Rakennustutkimus RTS Oy. 34 s. [Viitattu 2019-01-10.] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BA73C81E3-DA1E-4838-B067-6E55AB89BD23%7D/139890>

ROWELL, Roger M. ja DIETENBERGER, Mark A. 2013. Thermal Properties, Combustion, and Fire Retardancy of Wood. Teoksessa: Rowell, Roger M. (toim.): Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Toinen painos. CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S. Ss. 127-149.

ROWELL, Roger M., PETTERSEN, Roger, HAN, James S., ROWELL, Jeffrey S. ja TSHABALALA, Mandla A. 2005. Cell Wall Chemistry. Teoksessa: Rowell, Roger M. (toim.): Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S. Ss. 35-74.

SFS 2014. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Rakentamismääräyksistä eurokoodeihin. [Viitattu 2018-03-16.] Saatavissa: [https://www.sfs.fi/files/309/SFSEuroKesite27062014_\(2\)1.9.2014.pdf](https://www.sfs.fi/files/309/SFSEuroKesite27062014_(2)1.9.2014.pdf)

SIIKANEN, Unto 2008. Puurakentaminen. Helsinki: Rakennustieto Oy. 332 s.

SKYTÄ, Valtteri 2017. CLT & LVL – puurakentamisen tulevaisuus. Metsälehti 23/2017. [Viitattu 2019-01-21.] Saatavissa: <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/clt-lvl-puurakentamisen-tulevaisuus/>

TEKNOS 2019. Teknosafe 2407. Palosuojamaalausjärjestelmät sisä- ja ulkokäyttöön. [Viitattu 2019-01-25.]. Saatavissa: <https://www.teknos.com/fi-FI/teollisuus/erikoispinnoitteet/puun-palosuojamaalaus/teknosafe-2407/>

TILASTOKESKUS 2019. Kasvihuonekaasut. 2017, maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous, ennako. Suomen virallinen tilasto. Ympäristö ja luonnonvarat 2019. [Viitattu 2019-03-20.] Saatavissa: https://www.stat.fi/til/khki/2017/01/khki_2017_01_2019-01-15_fi.pdf

TOLPPANEN, Janne 2018. Suomalainen puukerrostalohankekanta. Suunnitteilla ja rakenteilla olevat suomalaiset puukerrostalohankkeet 11/2018. Ympäristöministeriö & Puuinfo. [Viitattu 2019-01-17.] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B5761EA4A-3A5B-42AF-84FE-F1CDDF891A52%7D/141116>

TULIMAA, Mika ja WIRTANEN, Leif 2006. Ympäristöystävälliset betonit ESCS-2006 symposiumissa. Betoni 3/2006: 78-80. [Viitattu 2019-01-21.] Saatavissa: https://issuu.com/kivirakentamisen/docs/bet0603_koko_lehti/71

VARES, Sirje, HÄKKINEN, Tarja ja VAINIO, Terttu 2017. Rakentamisen hiilivarasto. VTT Asiakasraportti VTT-CR-04958-17. Espoo: VTT. 44 s. [Viitattu 2019-01-09.] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B2859F537-ECD2-479D-A62B-F13AD75403F2%7D/136827>

VTT 2016. Sertifikaatti 184/03. Myönnetty 24.3.2004. Päivitetty 17.5.2016. VTT Expert Services Oy.

WECKMAN, Henry 2001. Rakennustarvikkeiden uudet eurooppalaiset paloluokitukset Suomen rakentamismääräyksissä. Suomen ympäristö 519. Helsinki: Ympäristöministeriö. 52 s.

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ 2017. Maankäyttö- ja rakennuslain uudistus. [Viitattu 2019-01-09.] Saatavissa: [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Maankayton_ja_rakentamisen_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Maankaytto_ja_rakennuslain_uudistus/Maankaytto_ja_rakennuslain_uudistus\(42391\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Maankayton_ja_rakentamisen_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Maankaytto_ja_rakennuslain_uudistus/Maankaytto_ja_rakennuslain_uudistus(42391))

YMPÄRISTÖMINISTERIÖ 2018. Puurakentamisen ohjelma. [Viitattu 2019-01-10.] Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Ohjelmat_ja_strategiat/Puurakentamisen_toimenpideohjelma

XI, Fengming, DAVIS, Steven, J., CIAIS, Philippe, CRAWFORD-BROWN, Douglas, GUAN, Dabo, PADE, Claus, SHI, Tiemao, SYDDALL, Mark, LV, Jie, JI, Lanzhu, BING, Lonfei, WANG, Jiaoyue, WEI, Wei, YANG, Keun-Hyeok, LAGERBLAD, Björn, GALAN, Isabel, ANDRADE, Carmen, ZHANG, Ying ja LIU, Zhu 2016. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. Nature Geoscience 9: 880-883.

ZHU, Xiaodan, WU, Yiqian, TIAN, Cuihua, QING, Yan ja YAO, Chunhua 2014. Synergistic effect of nanosilica aerogel with phosphorus flame retardants on improving flame retardancy and leaching resistance of wood. Journal of Nanomaterials 867106: 1-8.

ÖSTMAN, Birgit, TSANTARIDIS, Lazaros, MIKKOLA, Esko, HAKKARAINEN, Tuula, BELLONI, Kaisa, BRUMER, Harry ja PIISPANEN, Peter 2006. Innovative ecoefficient high fire performance wood products for demanding applications. Final report for Vinnova Tekes project InnoFireWood. SP Report 2006:30. Stockholm: SP Wood Technology. SP Swedish National Testing and Research Institute. 98 s. [Viitattu 2019-01-30.] Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/finalreport/sp_rapp_2006_30_innofirewood.pdf

SÄÄDÖKSET

E1 SUOMEN RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMA. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 3/11.

KOMISSIION PÄÄTÖS 2000/367/EY, tehty 3 päivänä toukokuuta 2000, direktiivin 89/106/ETY täytäntöönpanemisesta rakennustuotteiden, rakennuskohteiden ja niiden osien palonkestävyyden luokituksen osalta. Euroopan unionin virallinen lehti L 133, 6.6.2000, 26 - 32.

KOMISSIION PÄÄTÖS 2003/629/EY, tehty 27 päivänä elokuuta 2003, rakennustuotteiden palonkestävyyden luokitusta koskevan päätöksen 2000/367/EY muuttamisesta savun- ja lämmönhallintatuotteiden sisällyttämiseksi päätökseen. Euroopan unionin virallinen lehti L 218, 30.8.2003, 51 - 54.

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 305/2011, annettu 9 päivänä maaliskuuta 2011, rakennustuotteiden kaupan pitämistä koskevien ehtojen yhdenmukaistamisesta ja neuvoston direktiivin 89/106/ETY kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti L 88, 4.4.2011, 5 - 43.

LAKI MAANKÄYTTÖ- JA RAKENNUSLAIN MUUTTAMISESTA 958/2012. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2018-03-28.] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120958>

MAANKÄYTTÖ- JA RAKENNUSLAKI 132/1999. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2018-02-22.] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990132>

SOSIAALI- JA TERVEYSMINISTERIÖN ASETUS ASUNNON JA MUUN OLESKELUTILAN TERVEYDELLISISTÄ OLOSUHTEISTA SEKÄ ULKOPUOLISTEN ASIANTUNTIJOIDEN PÄTEVYYSVAATIMUKSISTA 545/2015. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2019-02-12.] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>

YMPÄRISTÖMINISTERIÖN ASETUS RAKENNUSTEN PALOTURVALLISUUDESTA 848/2017. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2018-02-22.] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170848>

STANDARDIT

ISO 5660-1:2002(E). Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). International standard. Second edition 2002-12-15.

SFS-EN ISO 1716. Reaction to fire tests for products. Determination of the gross heat of combustion (calorific value) (ISO 1716:2010). Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2011-01-24.

SFS-EN ISO 1182. Reaction to fire tests for products. Non-combustibility test (ISO 1182:2010). Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2011-01-24.

SFS-EN ISO 11925-2. Reaction to fire test. Ignitability of products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single-flame source test (ISO 11925-2:2010). Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2011-06-20.

SFS-EN 13501-1 + A1. Rakennustuotteiden ja rakennusosien paloluokitus. Osa 1: Palokäyttäytymiskokeiden tuloksiin perustuva luokitus. Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2010-04-20.

SFS-EN 13823 + A1. Reaction to fire tests for building products. Building product excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2014-12-15.

SFS-EN 15804 + A1. Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2014-01-27.

SFS-EN 15978. Sustainability of construction works. Assessment of environmental Performance of buildings. Calculation method. Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2012-04-16.

SFS-EN 1995-1-2 + AC. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus. Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Vahvistettu 2004-12-21.

LIITE 1. SAVONIAN PALOLABORATORIOSSA TEHTYJEN KARTIOKALORIMETRIKOKEIDEN TULOKSET

		LVL				Firefain 5875				Palonot F1				Exolit					
		0 g/m ²	150 g/m ²	175 g/m ²	200 g/m ²	0 g/m ²	150 g/m ²	175 g/m ²	200 g/m ²	0 g/m ²	150 g/m ²	175 g/m ²	200 g/m ²	0 g/m ²	150 g/m ²	175 g/m ²	200 g/m ²		
Irradiance level from cone	kW/m ²	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		
Specimen orientation	H/V	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal		
Specimen mass	g	230,93	162,62	166,36	162,24	163,34	156,59	163,11	161,33	166,34	167,79	163,02	170,00	161,95	160,55	161,23	167,82	167,66	154,06
Specimen surface area	m ²	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Time to ignition	s	24,31	9,0	11,9	15,1	11,6	14,4	10,5	6,38	8,44	6,50	7,94	7,50	16,81	17,44	16,06	20,44	15,31	16,13
Duration of test	s	1801	602	602	602	602	602	602	602	602	602	602	602	603	603	602	604	601	601
Mass remaining after test	g	133,98	125,21	129,38	124,75	125,26	120,51	128,06	126,64	127,09	132,97	129,39	137,04	126,82	125,38	125,67	133,43	131,98	121,56
Total mass loss (g)	g	96,95	37,41	36,98	37,49	38,08	36,08	35,05	34,69	39,25	34,82	33,63	32,96	35,13	35,17	35,56	34,39	35,68	32,50
Mass loss per square meter	g/m ²	10740	4150	4100	4150	4220	4000	3880	3840	4350	3860	3730	3650	3890	3900	3940	3810	3950	3600
Mass loss rate per square meter	g/m ² s	6,0	7,0	7,0	7,1	7,2	6,8	6,6	6,50	7,30	6,50	6,20	6,20	6,70	6,70	6,70	6,50	6,80	6,20
Total heat released	MJ/m ²	141,4	48,0	44,1	40,3	49,7	43,2	41,0	38,4	51,2	38,6	37,9	40,7	42,1	42,9	38,9	38,2	41,9	36,8
Maximum heat release rate (HRR _{max})	kW/m ²	416,5	187,0	205,4	229,1	262,2	209,4	202,2	129,9	145,7	123,8	124,7	94,4	227,8	161,1	198,4	174,7	167,7	192,1
Av. heat release rate 60 s after ignition	kW/m ²	206,2	132,8	142,3	147,1	148,0	146,2	134,2	98,8	128,4	85,7	93,8	62,2	135,1	107,1	118,5	121,9	118,2	128,4
Av. heat release rate 180 s after ignition	kW/m ²	122,5	103,4	104,3	99,3	108,3	105,4	95,1	75,8	97,5	77,5	91,3	67,2	92,1	91,4	83,6	79,5	85,8	85,7
Av. heat release rate 300 s after ignition	kW/m ²	105,2	87,1	85,6	80,7	91,4	85,5	82,2	67,0	80,8	68,5	75,2	60,3	76,3	75,4	69,1	72,3	74,5	68,1
Total heat released 300 s after ignition	MJ/m ²	29,7	25,6	25,1	23,4	26,7	25,0	24,1	19,8	23,8	20,2	22,2	17,7	22,0	21,8	19,9	20,3	21,4	19,7
Max heat release rate, 30 s sliding average	kW/m ²	141,4	48,0	44,1	40,3	49,7	43,2	41,0	38,4	51,2	38,6	37,9	40,7	42,1	42,9	38,9	38,2	41,9	36,8
Effective net heat of combustion	MJ/kg	13,2	11,6	10,8	9,7	11,8	10,8	10,6	10,0	11,8	10,0	10,2	11,1	10,8	11,0	9,9	10,0	10,6	10,2
Total smoke production	m ²	3,68	2,28	1,93	2,06	1,81	1,89	1,81	1,78	2,60	1,77	2,08	1,93	2,34	2,44	2,14	1,99	2,68	1,44
Average smoke production	m ² /s	0,00205	0,00379	0,00321	0,00343	0,00301	0,00315	0,00301	0,00296	0,00433	0,00295	0,00344	0,00321	0,00389	0,00405	0,00356	0,00330	0,00446	0,00240
Average specific smoke production	m ² /kg	38,3	60,9	52,1	55,0	47,6	52,5	51,6	51,3	66,3	51,0	62,0	58,6	66,7	69,3	60,1	57,9	75,0	44,4
Total CO ₂ -production	g	0,009	0,012	0,019	0,023	0,007	0,021	0,021	0,022	0,010	0,022	0,026	0,016	0,018	0,015	0,019	0,018	0,017	0,030
Total CO ₂ produced per mass unit burnt	g/g	0,83	0,76	0,66	0,65	0,77	0,66	0,68	0,71	0,80	0,69	0,68	0,77	0,67	0,75	0,65	0,66	0,68	0,65