

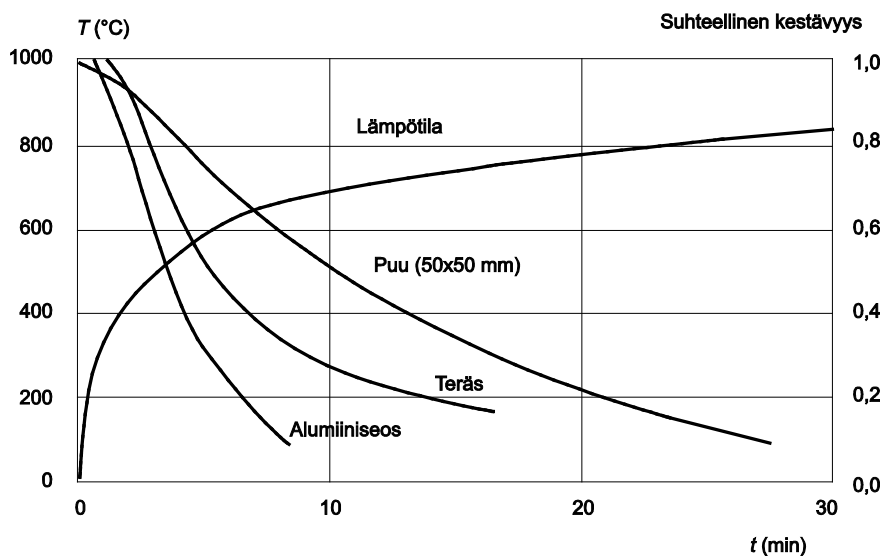
15	LIIMAPUU JA PALO	2
15.1	Puun palaminen ja käyttäytyminen tulipalossa	2
	Johdanto	2
	Puun hajoaminen lämmön vaikutuksesta	3
	Kuumuuden vaikutus puumateriaalin ominaisuuksiin	4
15.2	Palotekninen mitoitus	5
15.3	Palonkestävyyden laskeminen Eurokoodi 5:n mukaan	7
15.4	Liitosten palonkestävyys	10
15.5	Puurakenteiden palosuojaaminen	13
	Rakenneosien suojaaminen	13
	Liitosten suojaaminen	14
15.6	Mitoitus ja suunnittelu	18

15 LIIMAPUU JA PALO

15.1 Puun palaminen ja käyttäytyminen tulipalossa

Vaikka puu on palava materiaali, niin se soveltuu käytettäväksi rakenteisiin, joilta vaaditaan tietty palonkestävyys. Kuva 15-1 esittää eri materiaalien käyttäytymistä standardipalossa. Kuva esittää tietyn määritellyn rakenneosan kestävyden muuttumista lämpötilan ja ajan funktiona. Kaikkien muiden materiaalien paitsi puun käyttäytyminen on riippumaton rakennusosan mitoista. Näiden materiaalien lämpötilan voidaan olettaa olevan koko poikkileikkauksessa sama, hieman ympäristön lämpötilaa pienempi. Niiden kaikki ominaisuudet muuttuvat samalla tavalla koko poikkileikkauksessa. Puu sen sijaan ei lämpene merkittävästi ja sen materiaaliominaisuudet eivät siksi muutu hiiltyneen kerroksen alla.

Puulla näyttää siten olevan parempi palokäyttäytyminen. Kuvassa esitetään tietyn, poikkileikkaukseltaan alkuaan 50 x 50 mm suuruisen rakenneosan kestävyden pienenemistä palossa, ei puun materiaaliominaisuuksien muuttumista. Puun käytön etuna ei niinkään ole sen mekaanisten ominaisuuksien muuttumistapa vaan sen poikkileikkauksen hidas ja tietyssä määrin ennustettavissa oleva pieneneminen palossa.



KUVA 15-1

Eräiden rakennusaineiden suhteellisen kestävyden muutos palossa.

Johdanto

Kasvikunnasta peräisin olevana orgaanisena materiaalina puu on palavaa ja se voi täydellisesti tuhoutua palossa. Tarpeeksi pitkän paloajan jälkeen se kadottaa kaikki fyysiset ja mekaaniset ominaisuutensa. Tämä on seurausta sen kemiallisesta rakenteesta; puun koostumuksesta lähes puolet on hiiltä.

Puun palaessa sen ainesosat hajoavat lämmön vaikutuksesta. Tämän monimutkaisen prosessin tuloksena muodostuu yli 200 erilaista kemiallista yhdistettä. Mutta koska suurin osa puuainesta on selluloosaa, hemiselluloosaa (selluloosaa pienimolekyylisempiä polysakkarideja) ja ligniiniä, niin palaminen on riippuvainen näiden ainesosien lämpöhajoamisesta.



KUVA 15-2

Palossa kestävyytensä säilyttänyt liimapuupalkki.

Palokäyttäytymistä ei voida pelkästään selittää kemiallisen koostumuksen avulla. Materiaalin epähomogeenisuudella on suuri merkitys erityisesti rakenteen sortumisvaiheessa.

Tarkastellaan kahta samanlaista kuusilamelleista tehtyä liimapuupalkkia jotka altistettiin standardipalolle standardin SFS-EN 1363-1 (ISO 834) mukaisesti. Testi lopetettiin toisen palkin osalta, kun standardissa määritelty suurin muodonmuutos saavutettiin (kuva 15-2) ennen kuin palkki menetti kestävyytensä. Toinen palkki sen sijaan menetti kestävyytensä jo paljon aikaisemmin (kuva 15-3). Tämä johtui selvästikin palkin keskimmaisessä lamellissa olevasta oksasta. Ennen paloa oksalla ei ollut juuri mitään merkitystä. Palotilanteessa sen vaikutus oli kohtalokas ulkolamellien menettäessä kantokykyensä hiiltymisen vuoksi.



KUVA 15-3

Yhdessä lamellissa olevan suuren oksan vaikutus liimapuupalkin palamiseen.

Pyrolyysireaktio vaatii lämpöä. Reaktiotulokset joko oksidituvat kuumassa ympäristössä luovuttaen runsaasti energiaa, tai hajoavat edelleen hiilimonoksidiksi ja vedyksi. Nämä ovat puun palamisessa syntyvät pääasialliset hajoamistuotteet. Tämän seurauksena palamisprosessi on itseään ylläpitävä, kunhan tietty lämpötila on saavutettu.

Hiiltyneen materiaalin rakenteeseen vaikuttaa ligniiniä hieman alemmassa lämpötilassa hajoava selluloosa.

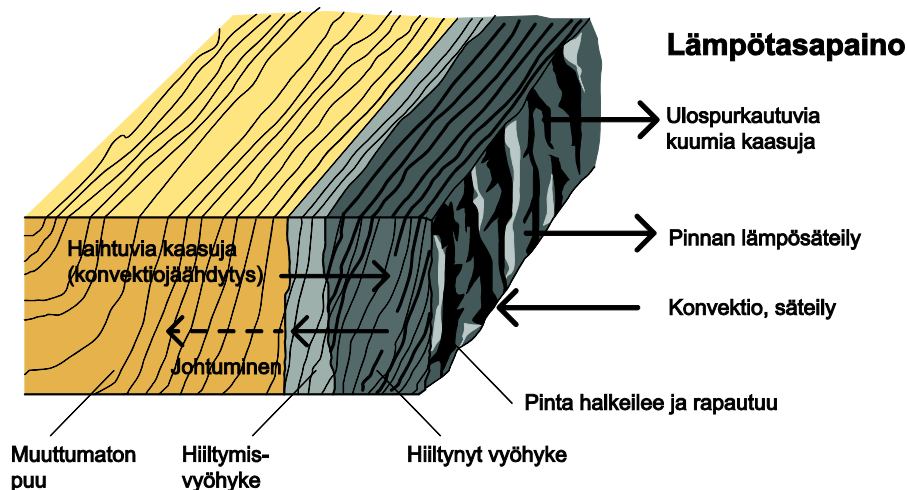
Puun hajoaminen lämmön vaikutuksesta

Taulukko 15-1 esittää kaavamaisesti, mitä tapahtuu palon edetessä lämpötilan noustessa. Eurokoodi 5:n mukaan 300 °C vastaava isotermi on hiiltyneen ja muuttumattoman materiaalin rajakohta.

TAULUKKO 15-1 Palon kulku.

Lämpötila	Ilmiö
20 °C	Näytteen lämpötila ennen syttymistä
100 °C	Vesi irtoaa
120 °C	Hajoaminen alkaa (ligniini plastisoituu)
170 °C	Terminen hajoaminen alkaa
Yli 170 °C	Hajoamistuotteet palavat

Puun palaminen (ja terminen hajoaminen) etenee palolle alttiilta pinnoilta sisäänpäin määrätyl- lä äärellisellä nopeudella, joten prosessi ei ole räjähdysmäinen (kuva 15-4. Jos ulkoiset olosuhteet ja materiaaliin liittyvät tekijät ovat samanlaiset, niin hiiltymisnopeus on pääasiassa riippu- vainen puulajista. Ulkoisista tekijöistä suurin merkitys on lämpötilalla, lämmöntuotolla ja il- manvaihdolla. Materiaalin kosteuspitoisuus ja mahdollinen palosuojakäsittely ovat tärkeimmät materiaaliin liittyvät tekijät. Palotilanteessa hiiltymissyvyys on suunnilleen verrannollinen palo- aikaan, tai tarkemmin sanottuna siihen aikaan jona hiiltymistä on tapahtunut. Hiiltymättömän puun lämpötila on alle 100 °C lukuun ottamatta välittömästi hiiltymisvyöhykkeen alla olevaa ohutta, noin 10...20 mm paksua kerrosta.



KUVA 15-4

Hiiltymisprosessin ilmiöitä (Dinwoodie, 1981, mukaillen).

Kuumuuden vaikutus puumateriaalin ominaisuuksiin

Puu johtaa huonosti lämpöä. Palon aikana merkittävä osa lämmöstä siirtyy konvektion avulla kuumien palokaasujen kulkeutuessa puussa. Tämä on voitu todeta vertaamalla sellaisten puu- lajien erilaisia hiiltymisnopeuksia (esimerkiksi pyökki ja tammi), joilla on lähes sama tiheys, mutta merkittävästi erilainen kaasujen ja vesihöyryn läpäisevyys.

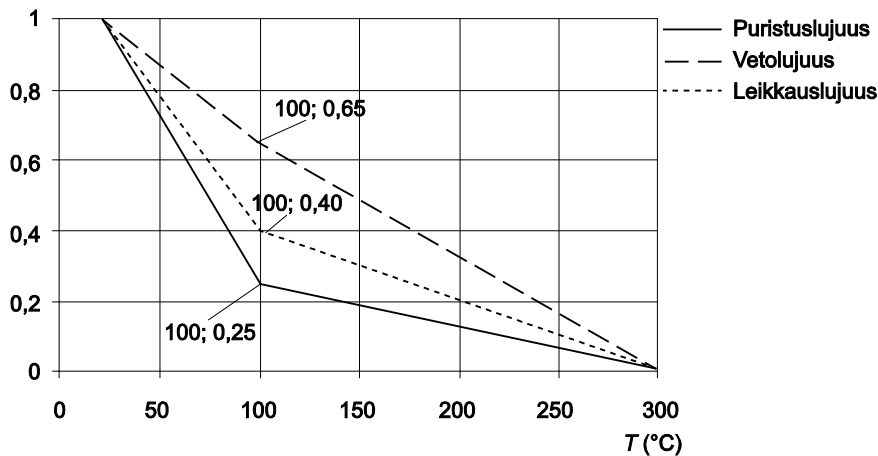
Kun kuumat palokaasut liikkuvat sisäänpäin, lämpötila nousee kunnes puu alkaa hajota ja hiiltä, kun taas ulospäin kulkeutuessaan samat kaasut vaimentavat hiiltyneen kerroksen läm- pötilan nousua.

Hiiltymisnopeutta pidetään puumateriaalin palonkestävyyden mittana. Koska puun lämpö- tila on melkein muuttumaton lähes välittömästi hiiltyneen kerroksen alla, niin voidaan päätellä että puun hyvän palokäyttäytymisen aiheuttaa

- jo mainittu mekaanisten ominaisuuksien pysyvyys aina lämpötilaan 110 °C-115 °C asti
- hiiltyneen kerroksen eristysvaikutus.

Aivan hiiltyneen kerroksen sisäpuolella on hyvin ohut kerros, missä puu ei ole riittävän kuumaa hiiltäkseen, mutta sen ominaisuudet ovat heikentyneet. Eri mitoitukset ottavat tä- män kerroksen huomioon eri tavoin. Tämän heikentyneen kerroksen ja tavanomaisissa käyttö- olosuhteissa olevan muuttumattoman puun raja on noin 120 °C isoterminä.

Eurokoodi 5 (EN 1995-1-2) esittää tietyille mekaanisille ominaisuuksille kuvan 15-5 mukaisia pienennyskertoimia. Nämä ovat tieteellisessä kirjallisuudessa esitettyihin verrattuna huomattavasti varmemmalla puolella. Tämä johtuu virheettömän puun ja todellisten rakenneosien erilaisesta käyttäytymisestä. Rakenneosia tarkasteltaessa puun epähomogeenisuus pitää ottaa huomioon, ja sen merkitys kasvaa lämpötilan mukana.



KUVA 15-5

EN 1995-1-2 mukaiset pienennyskertoimet puun syiden suuntaisille lujuusarvoille lämpötilan funktiona (Liite B, Kehittyneet laskentamenetelmät).

15.2 Palotekninen mitoitus

Paloa kestävä rakenne voidaan suunnitella kahdesta erilaisesta näkökulmasta:

- Rakenne suunnitellaan palon vaikutusta kestäväksi
- Rakenteen todellinen kestävyys palotilanteessa arvioidaan laskennallisesti.

Tässä luvussa tarkastellaan lähinnä jälkimmäistä.

Yleisin tapa mitoittaa palonkestäviä puurakenteita on toistaiseksi ollut ulkoisten suojarakenteiden ja pintakäsittelyjen käyttö. Tällaisia käytettäessä suojatun liimapuupalkin poikkileikkaus on palon jälkeen vahingoittumaton ja palonkestävyys on riippuvainen suojauksen materiaalista ja paksuudesta. Sen sijaan suojaamattomalla liimapuupoikkileikkauksella on palon jälkeen pienentynyt poikkileikkaus ja pienentynyt kestävyys. Murtorajatilan kestävyys pitää sen vuoksi laskea pienentyneelle poikkileikkaukselle.

Rakentamisen kehittyminen ja koetulosten määrän lisääntyminen on johtanut uusiin menetelmiin ja teknisiin ratkaisuihin, joissa suunnittelijalla on aikaisempaa selkeämpi vaikutusmahdollisuus. Suunnittelijan pitää tarkastella palolle alttiin rakenteen osia palotilanteen onnettomuuskuorman vaikuttaessa ja osoittaa että jokaisen osalta toteutuu mitoitusehto¹

$$A_{d,fi}(t) \leq R_{d,fi}(t)$$

15-1

$A_{d,fi}$ palotilanteen kuorman vaikutuksen mitoitusarvo
 $R_{d,fi}$ vastaavan kestävyysmitoitusarvo samoissa olosuhteissa

¹ On huomattava että merkityksessä "Mitoitettava kuorman vaikutus" standardi EN 1995-1-2 käyttää merkintää E_d , eikä tässä käytettyä merkintää A_d . Muutos on tarkoituksellinen, jottei lukija sekoita merkintää A_d ja merkintää E_d jota tässä julkaisussa käytetään puun kimmokertoimelle.

t palon kestoaika

Rakenteeseen välittömästi kohdistuvien kuormien vaikutus lasketaan poikkeuksellisen mitoitustilanteen kuormitusyhdistelmästä, ja se on lukujen 2 ja 6 mukaisesti

$$1,0 \cdot G_k + 1,0 \cdot P_k(t) + 1,0 \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + 1,0 \cdot \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad 15-2$$

G_k pysyvien kuormien ominaisarvo
 $P_k(t)$ esijännitysvoiman ominaisarvo (palotilanteessa yleensä muuttuva ajan funktiona)
 $Q_{k,1}$ määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
 $Q_{k,i}$ muiden muuttuvien kuormien ominaisarvot
 $\psi_{1,1}$ määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
 $\psi_{2,i}$ muiden muuttuvien kuormien yleinen yhdistelykerroin

Yhdistelykertoimien ψ arvot on annettu standardissa EN 1991-1-1 rakenteen eri kuormille ja osille ja ne ovat yleensä välillä 0...0,7. Erytystä harkintaa pitää noudattaa kun palotilanteessa voi esiintyä hyötykuorman suurin arvo, kuten kirjastoissa, arkistoissa ja varastorakennuksissa. $A_{d,fi}$ voidaan laskea yksinkertaistetulla menettelyllä normaalilämpötilamitoituksen kuormista

$$A_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot A_d \quad 15-3$$

A_d normaalilämpötilan kuormien aiheuttama vaikutus
 η_{fi} kuorman mitoitusarvon pienennyskerroin palotilanteessa

Kerroin η_{fi} on riippuvainen pysyvien ja muuttuvien kuormien osavarmuuskertoimista γ_G ja γ_Q ja muuttuvien kuormien palotilanteessa käytettävästä yhdistelykertoimesta ψ_{fi} , joka on joko $\psi_{1,1}$ tai $\psi_{2,1}$ (EN 1991-1-2), ja se on

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}} \quad 15-4$$

γ_G pysyvien kuormien osavarmuuskerroin
 $\gamma_{Q,1}$ määräävän muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin

Tämä voidaan myös esittää muodossa

$$\eta_{fi} = \frac{1 + \psi_{fi} \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_{Q,1} \cdot \xi} \quad 15-5$$

η_{fi} on siis riippuvainen suhteesta $\xi = Q_{k,1}/G_k$.

Suomessa pienennyskerroinena käytetään Ympäristöministeriön eurokoodien soveltamista koskevan asetuksen mukaisesti η_{fi} arvoa 0,6, paitsi standardin EN 1991-1-1 luokan E hyötykuormille käytetään η_{fi} arvoa 0,7.

15.3 Palonkestävyyden laskeminen Eurokoodi 5:n mukaan

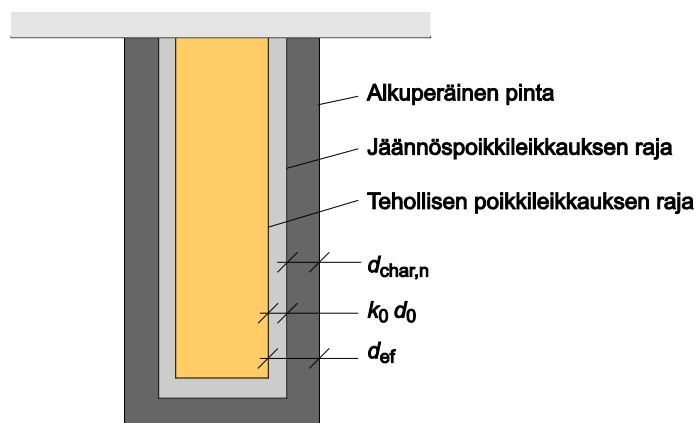
Puun lämpöhajoamisen yksinkertaistaminen tekee mahdolliseksi muodostaa riittävän tarkkoja mitoitusehtoja. Tätä varten on määritelty käsitteet

- *hiilymissyvyys*, joka on hiiltyneen kerroksen paksuus
- *jäännöspoikkileikkaus*, joka on poikkileikkaus josta on vähennetty hiiltyneen kerroksen paksuus
- *tehollinen poikkileikkaus*, joka on poikkileikkaus josta on vähennetty hiiltyneen kerroksen paksuuden lisäksi sen alla oleva kerros jossa oletetaan kimmokertoimen ja lujuuden olevan nolla.

Eurokoodi 5 (EN 1995-1-2) esittää kolme laskentatapaa:

- *tehollisen poikkileikkauksen menetelmä*, EN 1995-1-2 kohta 4.2.2
- *muunnettujen ominaisuuksien käyttäminen* (pienempi lujuus ja kimmokerroin), EN 1995-1-2 kohta 4.2.3
- *kehittyneet laskentamenetelmät* jolloin hiilymismallit, lämpötilan kehittyminen ja poikkileikkauksen kosteussuhteen muuttuminen ja näiden muutosten vaikutus puun ominaisuuksiin otetaan huomioon, EN 1995-1-2 liite B.

Suomessa käytetään yleensä tehollisen poikkileikkauksen menetelmää, joka esitellään seuraavassa yksityiskohtaisemmin. Myös EN 1995-1-2 liitteen B menetelmää voidaan käyttää.



KUVA 15-6

Jäännöspoikkileikkaus ja tehollinen poikkileikkaus EN 1995-1-2 mukaan.

Eurokoodin mukaan voidaan tehdä erilaisia yksinkertaistuksia:

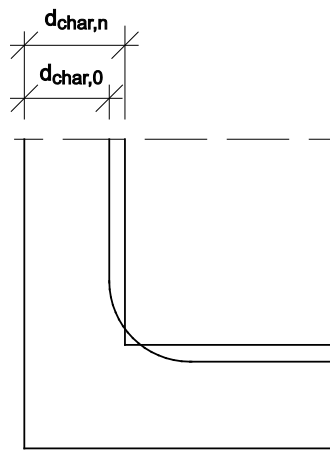
- *Koko rakenne analysoidaan* ja osoitetaan ehdon $A_{d,fi} \leq R_{d,fi}$ olevan voimassa. Kun kuorman vaikutus ei yleensä kasva palon edetessä, voidaan olettaa että $\eta_{fi} = 0,6$ paitsi luokan E (varastotilat) muuttuvien kuormien osalta jolloin käytetään arvoa $\eta_{fi} = 0,7$.
- *Rakenteen osia analysoidaan* ja arvioidaan niiden välinen vuorovaikutus likimääräisesti.
- *Yksittäisiä rakenneseosia analysoidaan* ja oletetaan että palon alkutilanne vastaa tavallisia käyttöolosuhteita.

Tehollisen poikkileikkauksen menetelmää käytettäessä tehollinen poikkileikkaus lasketaan pienentämällä alkuperäistä poikkileikkausta kuvan 15-6 mukaisella tehollisella hiilymissyvyydellä d_{ef}

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 \cdot d_0$$

15-6

d_{ef}	tehollinen hiiltemissyvvyys (joka vhennetan poikkileikkauksen mitoista)
$d_{\text{char},n}$	“todellinen” hiiltemissyvvyys, $d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t$, missa β_n on todellinen hiiltemisnopeus, joka ottaa huomioon halkeilun ja kulmien pyoristymisen vaikutuksen (Taulukko 15-2, standardista EN 1995-1-2)
k_0	kerroin jonka arvo on 0 ja 1 vallilla (maritetillan myohemmin);
d_0	7 mm, jaennospoikkileikkauksen ja tehollisen poikkileikkauksen mittojen suurin poikkeama toisistaan



KUVA 15-7

Poikkileikkauksen pieneneminen kulmissa (standardista EN 1995-1-2).

Kun palo vaikuttaa kulman kummallakin puolella, niin nurkan pyoristymisen huomioonottamiseksi voidaan kyttaa hiiltemisnopeutta β_0 (kuva 15-7). Yksidimensionaalisessa palotilanteessa (jollainen liimapuupalkin palaminen on) voidaan hiiltemissyvvyys laskea hiiltemisnopeuden β_0 avulla. Tama vastaa hyvin tehtyja polttokokeita.

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 \cdot t$$

15-7

Pyoristysateen voidaan olettaa olevan hiiltemissyvvyden $d_{\text{char},0}$ suuruinen. Nain voidaan tehdä jos poikkileikkauksen pienempi mitta on vahintaan b_{min}

$$b_{\text{min}} = \begin{cases} 2 \cdot d_{\text{char},0} + 80 & \text{jos } d_{\text{char},0} \geq 13 \text{ mm} \\ 8,15 \cdot d_{\text{char},0} & \text{jos } d_{\text{char},0} < 13 \text{ mm} \end{cases}$$

15-8

Hiiltemissyvvyden laskennassa pitaa kyttaa hiiltemisnopeutena β_n arvoa, jos poikkileikkauksen pienempi mitta on pienempi kuin b_{min} .

Kertoimen k_0 arvoksi voidaan olettaa 1, jos palo kestaa kauemmin kuin 20 min, ja se muuttuu lineaarisesti arvosta 0 arvoon 1 kun aika muuttuu arvosta 0 arvoon 20 minuuttia. Jos rakenneosaa on suojattu, niin arvoa $k_0 = 1$ vastaava aika on lyhyempi seuraavista ajoista:

- ajankohta jolloin rakennusosa alkaa palaa
- ajankohta jolloin suojarakenne menettaa suojaavan vaikutuksensa.

Seuraavia yhtälöitä voidaan käyttää poikkileikkauksen lujuuden, kimmokertoimen ja liitosten kestävyuden mitoitusarvojen laskennassa:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_k \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad 15-9$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{S_{05} \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad 15-10$$

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_k \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \quad 15-11$$

f_k	lujuuden ominaisarvo
S_{05}	kimmokertoimen E tai liukumoduulin G ominaisarvo, normaalilämpötilan 5 % fraktiili
R_k	liitoksen kestävyuden ominaisarvo, normaalilämpötilan 5 % fraktiili
k_{fi}	muuntaa 5 %-fraktiilin arvon 20 %-fraktiilin arvoksi massivipuulle 1,25, liimapuulle ja puulevyille 1,15, puuosien välisissä liitoksissa 1,15 ja puun ja teräksen välisissä liitoksissa 1,05
$\gamma_{M,fi}$	ominaisvarmuuskerroin palotilanteessa, 1,0
$k_{mod,fi}$	muunnoskerroin joka korvaa palotilanteessa normaalilämpötilassa käytettävän muunnoskerroimen k_{mod} ; tässä laskentamenettelyssä $k_{mod,fi} = 1$
η	paloajasta t riippuvainen muunnoskerroin (selitetään myöhemmin yksityiskohtaisemmin)

TAULUKKO 15-2

Puulle ja puumateriaaleille käytettävät hiililymisnopeuden mitoitusarvot β_0 ja β_n EN 1995-1-2 mukaan.

Materiaali	β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
a) Havupuu ja pyökki		
Liimapuu jonka ominaistiheys on $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
Sahatavara jonka ominaistiheys on $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,80
b) Lehtipuu		
Sahatavara tai liimapuu jonka ominaistiheys on 290 kg/m^3	0,65	0,70
Sahatavara tai liimapuu jonka ominaistiheys on $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL		
jonka ominaistiheys on $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,70
d) Levyt ja lautatavara *		
Lautaverhous	0,90	-
Vaneri	1,00	-
Muut puulevyt paitsi vaneri	0,90	-

* Arvot on annettu tuotteille joiden ominaistiheys on 450 kg/m^3 ja paksuus 20 mm. EN 1995-1-2 antaa laskentamenetelmän arvojen korjaamiseksi jos tiheys ja paksuus on joku muu.

Liimapuun hiiltymisnopeus on pienempi kuin samasta puulajista tehdyn sahatavaran. Ilmeinen syy tähän on materiaalin suurempi homogeenisuus. Yleensä liimapuuta ei saa valmistaa termoplastisia liimoja käyttämällä. Jotkut kuumakovettuvat liimat saavuttavat kuitenkin lasituslämpötilansa noin 150–160 °C:ssa, alkavat hajota kemiallisesti lämmön vaikutuksesta ja menettävät tartuntansa alustaan ja mahdollisesti myös leikkauslujuutensa. Liimasauman heikkeneminen hiiltyneen kerroksen sisäpuolella voi aiheuttaa

- leikkausjännityksen kasvamisen alueessa joka sekä jäännöspoikkileikkausmenetelmän että tehollisen poikkileikkauksen menetelmän mukaan lasketaan mukaan palkin kanta-vaan osaan
- tämän seurauksena lamellien irtoamisen toisistaan jolloin liimasauma jää avoimeksi lämmön vaikutukselle, mikä nopeuttaa edellä kuvattua prosessia ja aiheuttaa kuoppia liimasaumojen kohdalla. Tämä ilmiö voi olla syynä muutamien tutkijoiden havaitsemaan suurempaan hiiltymisnopeuteen alueessa, missä leikkausjännitykset ovat suurimmat.

15.4 Liitosten palonkestävyys

Puurakenteet kootaan mekaanisiin liittimiin ja liitososin. Erilaisia liitososia käytetään varsinkin kehittyneissä liimapuukurakenteissa. Liitokset ovat oleellisia rakenteen staattiselle toiminnalle. Rakenteen kestävyuden laskeminen palotilanteessa edellyttää, että liitosten käyttäytyminen voidaan arvioida ja niiden kestävyys laskea.

Metalliset rakenteen osat, myös liitososat, ovat usein palotekniseltä kannalta rakenteen heikoimmat kohdat. Metallinen liitos edistää rakenteen lämpenemistä, sillä se johtaa hyvin lämpöä. Lisäksi metalli laajenee lämmitessään ja sen muoto muuttuu, mikä voi johtaa rakenteen vakauden menetykseen.

Eurokoodin mukaan suojaamattomien liitoksien paloluokka on R15 tai R20 (taulukko 15-3). Jos halutaan parempi paloluokka, on mitoituksessa otettava huomioon lisävaatimuksia. Näistä tärkeimmät ovat yhteen liitettävien puuosien paksuus ja liittimien (naulojen, vaarnojen) keskinäiset ja reunaetäisyydet. Näin varmistetaan että liitos kestää aiotun palonkestoajan t_{req} .

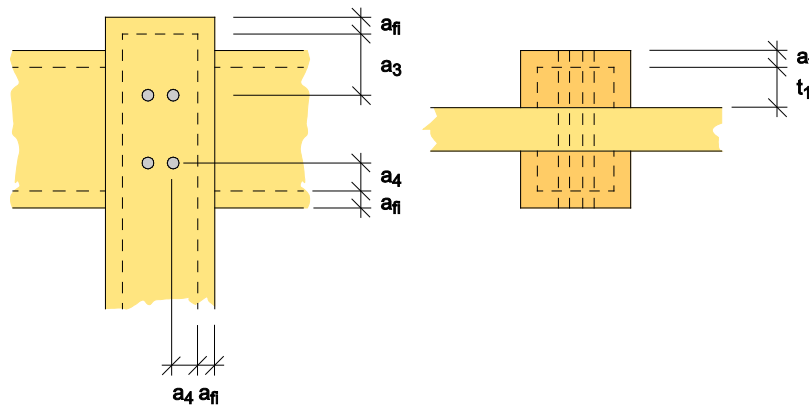
TAULUKKO 15-3

Suojaamattomien liitosten palonkestävyys kun sivukappaleet ovat puuta (EN 1995-1-2).

Liittimet	$t_{d,fi}$ (min)	Ehto
Naulat	15	$d \geq 2,8$ mm
Puuruuvit	15	$d \geq 3,5$ mm
Ruuvit	15	$t_1 \geq 45$ mm
Vaarnat	20	$t_1 \geq 45$ mm
Sidelevyt (hammasvaarnat ja vastaavat EN 912 mukaiset sidelevyt)	15	$t_1 \geq 45$ mm

t_1 sivukappaleen paksuus

d liittimen halkaisija



KUVA 15-8

Kokonaan puun sisässä olevin puikkoliittimin tehtyjen liitosten vaatimukset paloluokassa $t_{req} \leq 30$ min EN 1995-1-2 mukaan.

TAULUKKO 15-4 Yhtälön 15-15 parametrin k arvo EN 1995-1-2 mukaan.

Liitostyyppi	k	kerrointa k vastaava suojaamattoman liitoksen suurin palonkesto aika (min)
Naulat ja puuruuvit	0,080	20
Puu ruuvattu puuta vastaan ($d \geq 12$ mm)	0,065	30
Teräs ruuvattu puuta vastaan ($d \geq 12$ mm)	0,085	30
Puu tappivaarnaliitoksella puuta vastaan * ($d \geq 12$ mm)	0,040	40
Teräs tappivaarnaliitoksella puuta vastaan * ($d \geq 12$ mm)	0,085	30
Muut liittimet (EN 912 mukaiset)	0,065	30

* Tappivaarnaliitosten arvoa saa käyttää jos neljää vaarnaa kohti on yksi ruuvi. Jos vaarnojen päät tulevat puusta ulos enemmän kuin 5 mm pitää käyttää ruuvien k -arvoja.

Jos palonkesto aika t_{req} on pienempi kuin 30 min sallitaan suojaamattomien, kokonaan puun sisässä olevin puikkoliittimin tehtyjen liitosten mitoituksessa yksinkertaistuksia. Tällöin riittää että sivukappaleiden paksuutta ja jokaisen liittimen kuvassa 15-8 esitettyjä reunaetäisyyksiä kasvatetaan seuraavasti:

$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - t_{d,fi}) \quad 15-12$$

k_{flux} ottaa huomioon metallisen liittimen aiheuttaman lisääntyneen lämmönsiirron, yleensä oletetaan $k_{flux} = 1,5$.

β_n hiiltymisnopeus, taulukon 15-2 mukaisesti liimapuulle $\beta_n = 0,70$ mm/min

Leikkausrasitetun liittimen palonkestävyys voidaan myös laskea pienennetyn kestävyuden menetelmällä. Liittimen kestävyuden mitoitusarvo palossa $R_{v,k,fi}$ voidaan laskea kestävyuden arvosta normaaliolosuhteissa $R_{v,k}$ (laskettu EN 1995-1-1 mukaisesti):

$$R_{v,k,fi} = \eta \cdot R_{v,k} \quad 15-13$$

$$\eta = e^{-k \cdot t_{d,fi}}$$

15-14

k liitoksen tyyppistä taulukon 15-4 mukaan riippuvainen parametri

Suojaamattoman leikkausliitoksen palonkestävyys voidaan siten laskea seuraavasti:

$$t_{d,fi} = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{\eta_{fi} \cdot \gamma_{M,fi}}{\gamma_M \cdot k_{fi}} \right)$$

15-15

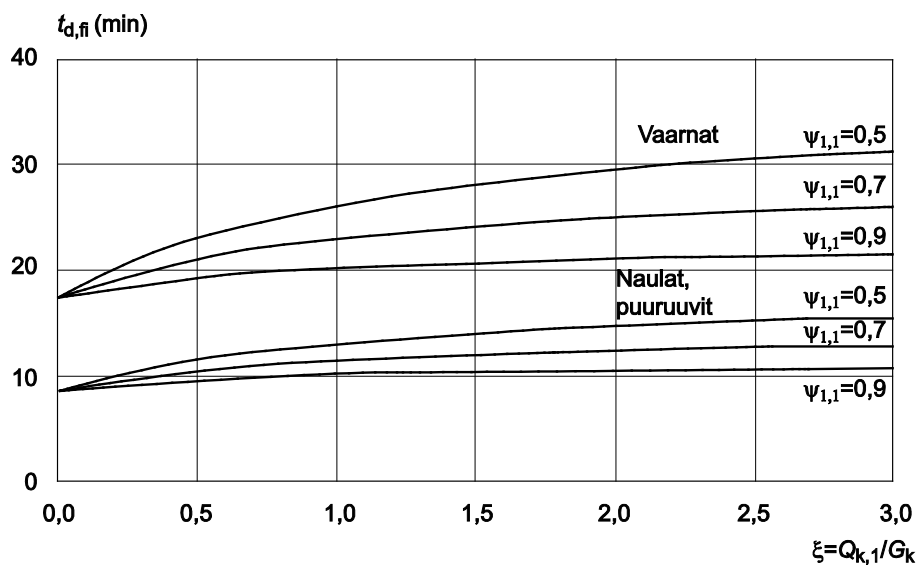
γ_M EN 1995-1-1 mukainen liitoksen kestävyden varmuuskerroin normaaliolosuhteissa

$\gamma_{M,fi}$ liitoksen kestävyden varmuuskerroin palotilanteessa

η_{fi} yhtälön 15-5 mukainen palotilanteen mitoituskuorman kerroin

Suojaamattomalla liitoksella ei juuri koskaan voi saada 30 minuuttia parempaa palonkestävyyttä. Kuvassa 15-9 esitetään suojaamattomien leikkausrasitettujen liitosten palonkestävyys, kun liitoksissa on puiset sivukappaleet. Ne on laskettu taulukossa 15-4 annettujen k -arvojen perusteella yhtälöstä 15-15 käyttämällä arvoja² $\gamma_M = 1,3$ ja $k_{fi} = 1,15$. Palonkestävyys on esitetty suureen ξ funktiona ja kuva vahvistaa että luokkaa R30 parempi luokka saavutetaan vain harvoin.

Tämä liitosten yleistarkastelu osoittaa, että jos liitoksien palonkestävyyden pitää olla R45 tai R60, niin suunnittelijan pitää jo varhaisessa vaiheessa ottaa tämä huomioon ja joko suunnitella liitokset suojattaviksi tai käyttää piiloliitoksia.



KUVA 15-9

Suojaamattomien leikkausrasitettujen liitosten palonkestävyys suureen ξ funktiona, kun liitoksen sivukappaleet ovat puuta.

² Suomessa liitosten mitoituksessa käytettävä γ_M arvo on riippuvainen liitoksen materiaaleista. Liimapuun ja teräksen välisessä liitoksessa se on 1,25 ja sahatavaran ja teräksen välisessä liitoksessa 1,4. $\gamma_{M,fi}$ on 1,0.

15.5 Puurakenteiden palosuojaaminen

Rakenneosien suojaaminen

Yleisimmät tavat suojata puuta paloa vastaan on käsitellä koko puuosa tai käyttää suojaverhusta:

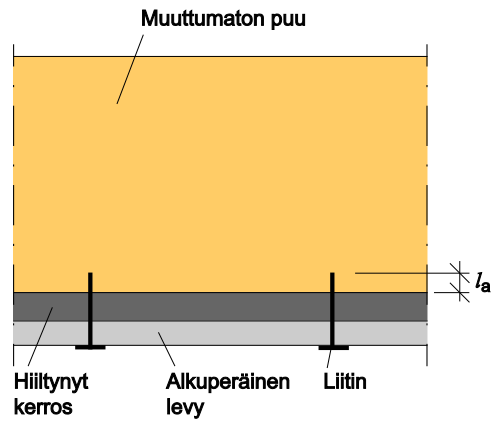
- Passiivinen suojaus tarkoittaa tavallisesti tiivistä palamattomasta materiaalista tehtyä suojaverhusta, jonka ainoa tehtävä on eristää puuosa lämmön vaikutukselta.
 - Materiaalin palamisprosessiin vaikuttava suojaus tarkoittaa, että puuhun tai sen pintoihin lisätään syttymistä estäviä tai viivyttäviä palonsuojakemikaaleja.
- Puuhun lisättävät palonsuojakemikaalit sisältävät tavallisesti sellaisia aineita jotka voivat
- estää hapettumista neutralisoimalla sellaisia vapaita radikaaleja, jotka muuten ovat taipuvaisia reagoimaan hapen kanssa (esimerkiksi H-, OH- tai vastaavia), tai vapauttamalla reagoimattomia radikaaleja kuten halogeeniyhdisteitä (pääasiassa Br-yhdisteitä)
 - kehittää palamattomia kaasuja jotka laimentavat puun termisen hajoamisen yhteydessä syntyviä kaasuja ja estävät siten niiden syttymisen. Tällaisia ovat ammoniumfosfaatit, jotka tietyssä lämpötilassa kehittävät ammoniakkia ja muuttavat siten ilman ja palavien kaasujen suhdetta ja estävät liekkien leviämistä.

Pintakäsittelyyn voidaan käyttää paisumattomia tuotteita, joiden komponentit kehittävät lämmön vaikutuksesta syttymättömiä kaasuja tai kaasufaasin hapettumisen estäviä radikaaleja ja sammuttavat siten palon. Voidaan myös käyttää paisuvia tuotteita, jotka muodostuvat pinta-kerroksen muodostavasta sideaineesta, johon varsinaiset paloa estävät kemialliset yhdisteet kiinnittyvät. Nämä hajoavat lämmön vaikutuksesta palamattomaksi jäännökseksi, vedeksi ja kaasuiksi jotka lämpö muuttaa reagoimattomiksi. Muodostuvat kaasut eivät ainoastaan muuta ilman ja polttoaineen seossuhdetta ja estä siten liekkien leviämistä, vaan myös paisuttavat palamattoman jäännöksen. Näin muodostuu "vaahtoa", joka kemiallisen koostumuksensa mukaisesti jähmettyy joko kevyeksi tai kovaksi kerrokseksi. Tällaisella kerroksella on huono lämmönjohtokyky ja se toimii siten lämmöneristeenä.

Eristyslevyjen avulla tehty passiivinen suojaus pitää sekä mitoittaa oikein että rakentaa huolellisesti, ettei puutteellinen tai löyhä kiinnitys vaaranna suojauksen toimivuutta.

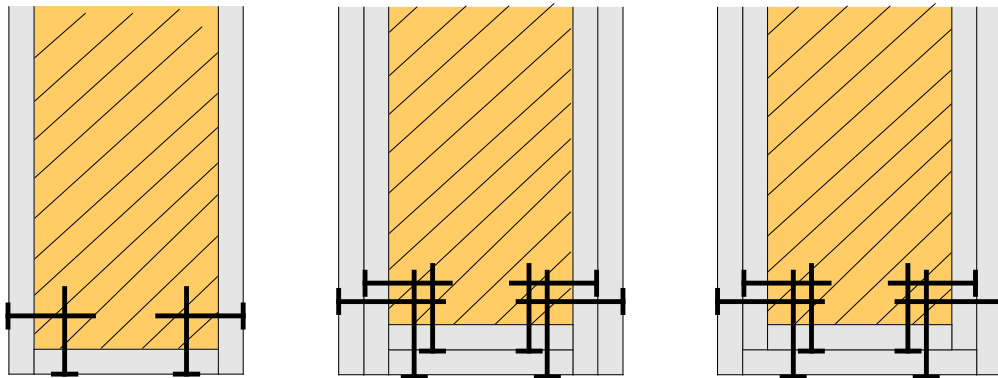
Suojalevyinä voidaan käyttää puulevyjä tai standardin EN 520 tyyppi A:n tai H:n mukaisia kipsikartonkilevyjä. Eristys pitää tehdä levynvalmistajan ohjeiden mukaisesti. Rakenneosan tai liitoksen palonkestävyyttä voidaan parantaa oleellisesti käyttämällä kuituvahvistettuja kalsiumsilikaattilevyjä tai standardin EN 520 tyyppi F:n mukaisia palokipsikartonkilevyjä. Nämä levyt pitää kiinnittää niin, että liittimien tunkeutumissyvyys jäännöspoikkileikkauksessa l_a on kuvan 15-10 mukaisesti vähintään 10 mm.

Kukin monikerroksisen suojauksen osana käytettävä suojalevy pitää kiinnittää kuvien 15-10 ja 15-11 mukaisesti puuhun (eikä pelkästään muihin levyihin) niin, että aiemmin esitetty minimivaatimus täyttyy. Liittimien keskinäisen etäisyyden pitää olla vähintään 60 mm ja se saa olla enintään pienempi arvoista 200 mm tai $17 h_p$ missä h_p on suojalevyn paksuus. Liittimien reuna-etäisyyden pitää olla vähintään pienempi arvoista 15 mm tai $1,5 h_p$ ja se saa olla enintään $3h_p$.



KUVA 15-10

Kipsikartonkilevyjen kiinnitys puuhun, liittimen tunkeuma jäännöspoikkileikkauksessa l_a (EN 1995-1-2).



KUVA 15-11

Esimerkki useampikerroksisen palosuojauksen kiinnittämisestä (EN 1995-1-2).

Liitosten suojaaminen

Aikaisemmin on jo mainittu että liitokset ovat palotilanteessa puurakenteen heikoimmat kohdat. Palonkestävyydeksi voidaan aina olettaa suojaamattoman liitoksen palonkestävyys, mikä kappaleen 15.4 mukaan on tavallisesti alle 30 minuuttia. Liitosten muotoilu ja niiden suojausten mitoittaminen on siten äärimmäisen tärkeää.

Kun liitokset suojataan puulevyillä tai standardin EN 520 tyyppi A:n tai H:n mukaisilla kipsikartonkilevyillä, suojaverhouksen pitää viivyttää hiiltymisen alkamista yhtälön 15-16 mukaisella ajalla t_{ch}

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5 t_{d,fi} \quad 15-16$$

t_{req} liitoksen vaadittu palonkesto aika
 $t_{d,fi}$ suojaamattoman liitoksen palonkesto aika

Jos suojaus on tehty standardin EN 520 mukaisen tyyppin F kipsikartonkilevyillä, niin suojakerroksen palonkestoajan tarvitsee olla huomattavasti lyhyempi

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2 t_{d,fi} \quad 15-17$$

Suojauksen pitää pysyä paikoillaan ainakin niin kauan että puun hiiltyminen alkaa, siis tyyppin A ja H kipsikartonkilevyille ajan t_{ch} ja luokan F levyille ajan t_{req} . Levyjen ja niiden kiinnikkeiden pitää siksi täyttää kuvan 15-12. minimivaatimukset.

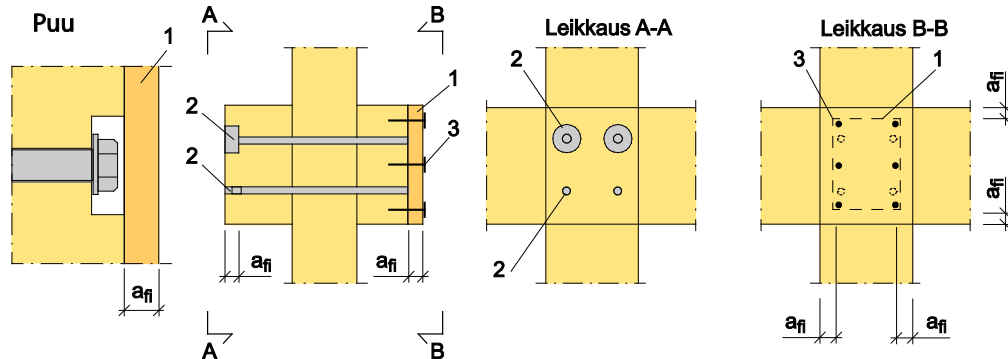
Ruuvien kantojen ja muttereiden suojausten paksuuden pitää olla ainakin yhtälön 15-12 mukaisesti laskettu a_{fi} . Liittimien reunaetäisyyksien pitää olla vähintään a_{fi} , ja reunarivissä olevien liittimien välinen etäisyys ei saa olla suurempi kuin 100 mm ja keskirivissä olevien 300 mm. Puuruuvien ja naulojen tunkeuman pitää tyyppin A ja H kipsikartonkilevyille olla vähintään niiden kuusinkertainen paksuus. Tyyppin F kipsikartonkilevyille pitää tunkeuman palossa muuttumattomaan puuhun (jäännöspoikkileikkaukseen) olla vähintään 10 mm ajankohtana t_{req} .

Kun liitoksissa on käytetty uriin asennettuja vähintään 2 mm paksuja teräslevyjä, jotka eivät ulotu mistään puun pintojen ulkopuolelle (katso kuva Kuva 15-13 a), niin levyjen leveyden pitää täyttää vähintään taulukossa 15-5 annettu vaatimus.

TAULUKKO 15-5

Reunasuojaamattomien teräslevyjien vaadittu leveys.

		b_{min} (mm)
Suojaamattomat reunat (yleensä)	R 30	200
	R 60	280
Suojaamattomat reunat (yhdelta tai kahdelta sivulta)	R 30	120
	R 60	280



KUVA 15-12

Ruuvien ja vaarujen suojaus: 1) Liitintä suojaa levy; 2) Uputettu liitin on suojattu päälle liimatulla puutapilla; 3) Suojalevyjen kiinnittäminen (standardista EN 1995-1-2 mukailtu).

Puuosia kapeampien teräslevyjien katsotaan olevan suojattuja ja niiden leveyden ei tarvitse täyttää taulukossa 15-5 annettuja vaatimuksia jos:

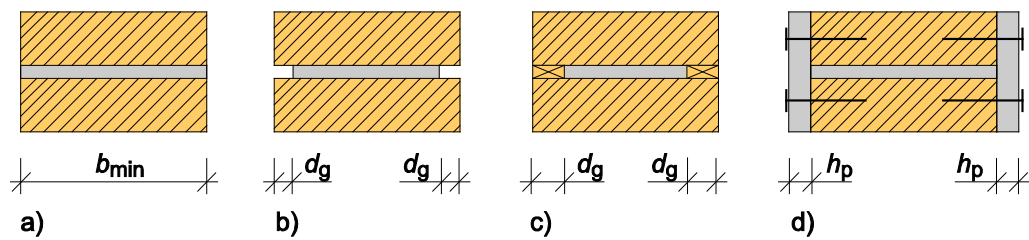
- alle 3 mm paksun levyn reunat ovat suojaamattomat; kun kuvan 15-13 b) mitta d_g ylittää 20 mm luokassa R30 tai 60 mm luokassa R60
- levyn reunat on suojattu puulla tai puulevyllä; kun kuvan 15-13 c) tai d) mitta d_g tai h_p ylittää 10 mm luokassa R30 tai 30 mm luokassa R 60.

Eurokoodi 3:n (EN 1993-1-2) mukaan mitoitettun liitoksen ulkopuolisin teräslevyin tehdyllä suo-
jauksella on hyvin huono palonkestävyys. Vaikka niiden puuta vastaan olevan pinnan voidaan
katsoa olevan suojassa palolta, niin palonkestävyys on aina enintään noin 20-30 min. Sen vuoksi
suojaukseen on parempi käyttää puuta tai puulevyjä. Teräslevyjen käyttöä voidaan harkita
vain, jos ne sekä pinnoiltaan että reunoistaan peittyvät rakennusosilla joiden vähimmäispak-
suus a_{fi} on

$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - 5)$$

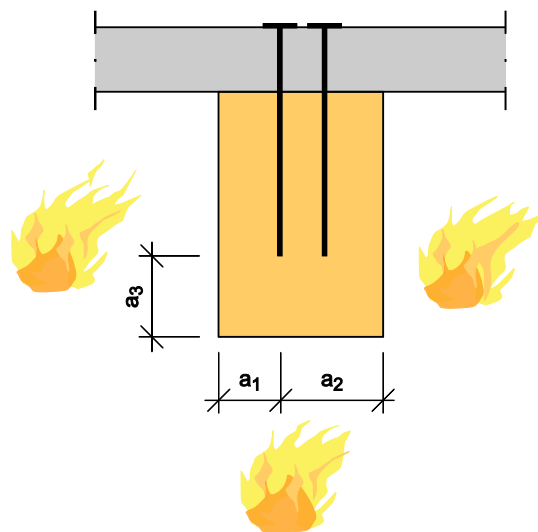
15-18

Tämä yhtälö on analoginen yhtälön 15-12 kanssa, jos teräslevyn palonkestävydeksi oletetaan
5 minuuttia.



KUVA 15-13

Urassa olevan teräslevyn reunojen suojaaminen (a) suojaamaton levy (b) reunaan suojaaa ilmarako (c) reunaan
suojaava levy kohdalle liimattu täytelista (d) reuna on suojattu ulkopuolisin levyin. EN 1995-1-2 mukaan.



KUVA 15-14

Liitos missä on käytetty aksiaalisesti kuormitettuja ruuveja (EN 1995-1-2).

EN 1995-1-2 esittää aksiaalisesti kuormitettujen ruuvien suojaamisen puulla (kuva 15-14). Puun
suojavaikutusta voidaan tarkastella yhtälöiden 15-19 avulla. Yhtälön 15-11 parametriksi η voi-
daan olettaa 1 ja puun suojavaikutus on riittävä kun yhtälöt 15-19 (a)...(c) ovat voimassa

$$a_2 \geq a_1 + 40$$

15-19 (a)

$$a_3 \geq a_1 + 20$$

15-19 (b)

$$a_1 \geq \beta \cdot t_{fi,d} + 28$$

15-19 (c)

a_1, a_2, a_3 kuvassa 15-14 määritellyjä mittoja, yksikkö mm
 β arvoksi oletetaan tavallisesti 1 mm/min

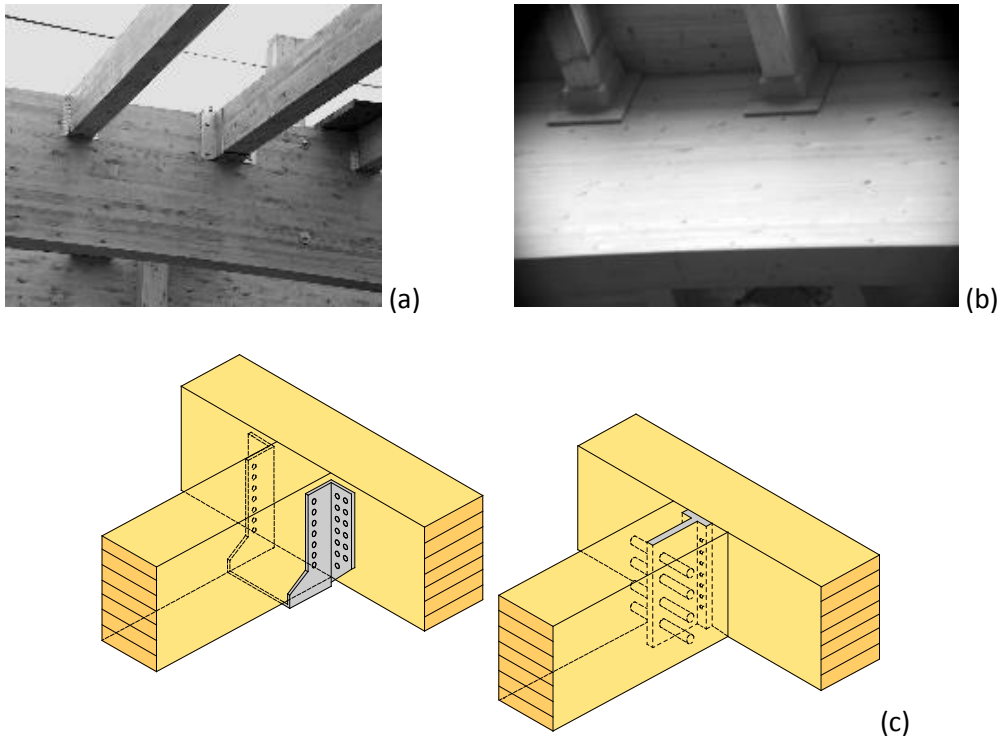
Puuosilla pitää olla riittävä palonkestävyys puurakenteen liitosten suojaamiseksi. Suojavaikutus voidaan saada aikaan verhouksella, mikä on hyvin tehokas tapa joko silloin, kun liitososa ei voida sijoittaa kuvan 15-15 mukaisesti puuosien sisäpuolelle, tai kun on suojattava palolle alttiita T-teräksen avulla tehtyjä liitoksia. Kuvien 15-15 ja 15-16 b) liitokset täyttävät paloluokan R60 vaatimukset.

Kuvan 15-16 c) mukaista pääpalkkien ja sekundääripalkkien välistä liitosta varten on tarjolla erilaisia T-muotoisia liitoskappaleita, jotka on tarkoitettu asennettavaksi rakennusosan sisään, jotta saadaan esteettisempi liitos; katso enemmän luvusta 14.



KUVA 15-15

Asbestivapaiden kalsiumsilikaattilevyjen käyttäminen niveltapillisen kiinnityksen suojaamiseen.

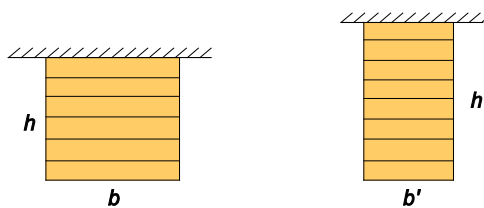


KUVA 15-16

Pääpalkin ja sekundääripalkin välinen liitos (a) suojaamaton liitos (b) kalsiumsiliikaattilevyin suojattuna (c) esteettisempi vaihtoehto missä on käytetty T-muotoista liitoskappaletta.

15.6 Mitoitus ja suunnittelu

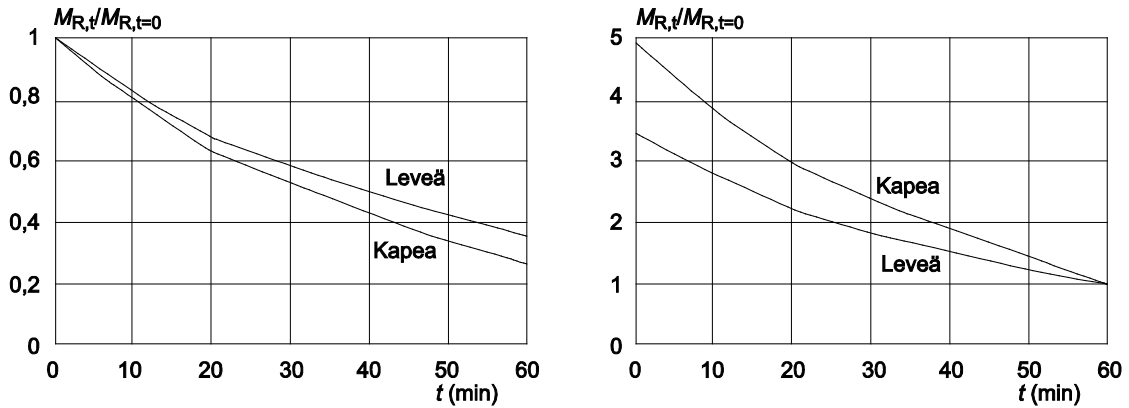
Palotilanne vaikuttaa puupalkkien ja pilareiden mittojen valintaan. Tarkastellaan kuvassa 15-17 esitettyä kahta taivutusmomentin rasittamaa poikkileikkausta ("leveä" ja "kapea"), jotka ovat palolle alttiina kolmelta sivulta ja joilla on sama taivutusvastus, mutta eri korkeus. Ne kestävät silloin normaalitilanteessa saman taivutusmomentin. Liimapuupalkkien poikkileikkaus vastaa yleensä kapeaa vaihtoehtoa.



KUVA 15-17

"Leveä" ja "kapea" liimapuupopikkileikkaus.

Kuva 15-18 esittää näiden poikkileikkausten palokäyttäytymistä. Leveämmillä poikkileikkauksilla kestävyys pienenee jonkin verran hitaammin kuin kapeilla (kuva 15-18, ylempi kuva). Esimerkin leveän palkin koko on 220 x 240 mm ja kapean 160 x 280 mm. Laskelma on tehty tehollisen poikkileikkauksen menetelmällä (laskelmassa on otettu huomioon, että poikkileikkausten alkuperäinen kestävyys eroaa toisistaan noin 1 %).



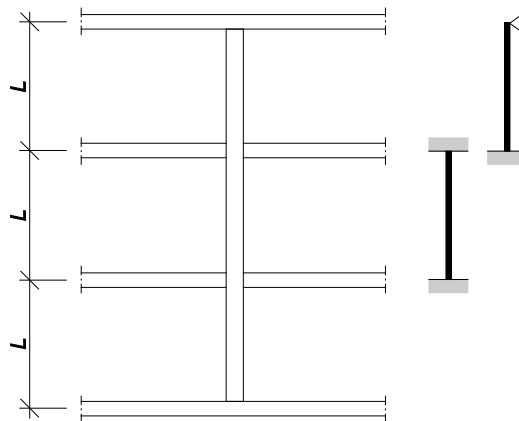
KUVA 15-18

Leveän ja kapean liimapuupoikkileikkauksen taivutusmomentinkestävyyden pieneneminen.

Jos vastaavasti tarkastellaan kahta poikkileikkausta, joiden pitää tietyllä ajan hetkellä t (esimerkissä 60 min) kestää sama taivutusmomentti, niin kapeammalla poikkileikkauksella on koko ajan ennen hetkeä t parempi kestävyys. Kuva 15-18, alempi kuva, esittää leveän palkin, jonka koko on 200 x 200 mm ja kapean 140 x 280 mm, ja joilla on sama kestävyys 60 min palon jälkeen. (Tässäkin tapauksessa laskelmassa on otettu huomioon, että poikkileikkausten kestävyys 60 min palon jälkeen eroaa toisistaan noin 1 %).

Aksiaalisesti puristetut liimapuupilarit ovat usein palolle alttiina kaikilta neljältä sivultaan. Palon edetessä niiden nurjahdus tulee kriittiseksi.

Jos pilari jatkuu useamman kerroksen (ja useamman palo-osaston) yli ja muodostaa jäykistävän rakenteen, niin sille voidaan olettaa edullisemmat reunaehdot kuin normaalilämpötilan mitoituksessa. Kuvan 15-19 mukaisesti keskellä olevissa kerroksissa voidaan olettaa pilari olevan jäykästi kiinni molemmista päistään ja ylimmässä kerroksessa voidaan olettaa pilarin alapää jäykästi kiinnitetyksi. Käytettävä pilarin pituus L on esitetty samassa kuvassa.



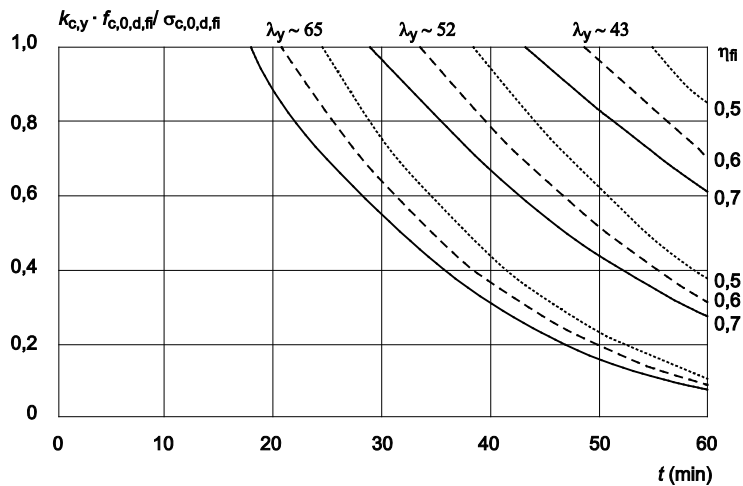
KUVA 15-19

Jatkuvan pilarin nurjahduspituus palotilanteessa (EN 1995-1-2 mukaan).

Pilarin nurjahdus tulee kriittiseksi myös silloin kun sen hoikkuusluku on pieni ja vaadittava palonkestävyys on kohtuullinen. Kuvassa 15-20 on muutamia esimerkkejä luokan GL 24h liimapuupilareista, joiden poikkileikkaus on neliö, sivujen pituudet ovat 160, 200 ja 240 mm ja korkeus $l_0 = 3000$ mm. Hoikkuusluvut λ_y ovat siten noin 65, 52 ja 43. Yhtälössä 15-5 esiintyväksi kuorman mitoitusarvon kertoimeksi η_{fi} on oletettu 0,5, 0,6 ja 0,7. EN 1995-1-2 suosittelee arvoa $\eta_{fi} = 0,6$, paitsi luokan E muuttuville kuormille arvoa $\eta_{fi} = 0,7$.

Kuvan x-akseli esittää paloaikaa. Kukin viiva esittää jäljellä olevan kestävyuden verrattuna alkuperäiseen (jota on merkitty arvolla 1) eri hoikkuuslukujen λ_y ja pienennyskertoimien η_{fi} funktiona.

Kuva osoittaa, että luokan R30 vaatimus täyttyy vain pilarille, jonka hoikkuusluku λ_y on pienempi kuin 50 ja $\eta_{fi} \leq 0,6$. Samaa pilaria voidaan käyttää luokassa R60 vain, jos se ylimitoitetaan normaaliolosuhteissa. Esimerkiksi jos pilarin hoikkuusluku alussa on $\lambda_y \cong 43$ ja pienennyskerroin $\eta_{fi} = 0,7$, niin sillä on paloluokassa R60 vain 60 % alkuperäisestä kestävydestään.



KUVA 15-20

Pilareiden palonkestävyys hoikkuusluvun vaihdellessa.

Jos liimapuupilareilta vaaditaan parempi paloluokka kuin R30 niin ne pitää mitoittaa huolellisesti, sillä poikkileikkauksen kestävyys on riippuvainen hoikkuusluvusta, joka kasvaa nopeasti hiiltymisen edetessä. Suunnittelijan pitää ottaa huomioon kestävyuden pieneneminen palotilanteessa kasvattamalla liimapuupilarin mittoja.