

TUTKIMUS KANTAVIEN PUURAKENTEIDEN PALONKESTÄVYYDESTÄ

Claes Holm, Pekka Kallioniemi,
Juha Nuurtamo

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 12
No. 3 1979 s. 1-18

YHTEENVETO: Kirjoitus käsittelee tutkimuksia, joissa selvitettiin kantavan puurakenteen palonkestoajan määrittämiseen tarvittavia perustietoja kuten puun hiiltymistä ja jäännöspoikkileikkauksen kosteutta ja lämpötilaa palo-olosuhteissa. Lämpötilan ja kosteuden vaikutusta puun lujuuteen tutkittiin pienillä virheettömillä koekappaleilla. Liimapuun kantokykyä voidaan arvioida yhdistämällä tiedot jäännöspoikkileikkauksen kosteus- ja lämpötilajakaantumasta ja lujuuden riippuvuudesta näistä tekijöistä. Kuormitettujen palkkien polttokokeissa on tutkittu puupalkkien kantokykyä palo-olosuhteissa. Kaikissa polttokokeissa liimapuun puulajina oli kuusi ja liimana Suomessa valmistettu resorsinolifenoliformaldehydigartsiliima.

TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Puurakenteiden palonkestävyystudkimuksia suoritettiin jo 1950-luvun lopulla valtion teknillisen tutkimuskeskuksen palotekniikan laboratoriossa (C. Holm). Tällöin selvitettiin muun muassa eri puulajien hiiltymistä sekä puun palosuojausmenetelmiä.

Sisäasiainministeriön tilauksesta suoritettiin vuonna 1976 kantavien liimapuurakenteiden tutkimuksia. Koekappaleiksi valittiin käytännössä tavanomaisia poikkileikkauksia. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää hiiltymisnopeuden lisäksi liimapuurakenteen ja yläpohjan liitoksen hiiltymistä ja suojaamista palolta, erilaisten suojaverhousten toimintaa palossa sekä liitosten palonkestävyyttä. Tutkimukseen sisältyi myös yksi polttokoe, jossa palkkia kuormitettiin kokeen aikana.

Vaikka puurakenteiden palonkestävyyttä on tutkittu sekä Suomessa että muualla muissa maissa, puun lujuudesta palossa ei ole toistaiseksi ollut riittävästi tietoja. Lämpötilan vaikutuksesta liimasaumojen ja sormijatkosten lujuuteen on myös puutteelliset tiedot. Tämä tiedon puute on haitannut puurakenteiden käyttöä, vaikka puu normaaliolosuhteissa on kilpailukykyinen muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää puurakenteiden lujuutta palo-olosuhteissa. Tehtävä koostui kahdesta osasta. Polttokokeiden avulla tutkittiin tulipalossa olevan puurakenteen jäännöspoikkileikkausta ja tämän kosteus- ja lämpötilajakautumaa. Toisaalta lämpötilan ja kosteuden vaikutusta puun ja

liimasauman lujuusominaisuuksiin tutkittiin pienillä virheettömillä koekappaleilla. Tuloksiasovellettiin poikkileikkauksen kantokyvyn määrittämiseen ja täten saatua palkin lujuutta ja palonkesto-aikaa verrattiin kuormitettujen palkkien polttokokeissa saatuihin tuloksiin.

KOKEET JA NIIDEN TAVOITTEET

Polttokokeet

Liimapuun kantokykyyn vaikuttavia tekijöitä selvitettiin viidellä kuormittamattomalla polttokokeella A...E ja kolmella kuormitetulla polttokokeella 1...3.

Polttokokeissa A ja B koeaika oli 30 minuuttia. Tavoitteena oli saada perustietoja puun hiiltymisestä, lämpötilanmuutoksista ja kosteudenmuutoksista. Liimapuukoekappaleet olivat kosteusluokassa 1.

Polttokokeessa C koeaika oli 60 minuuttia ja kokeella oli samat tavoitteet kuin kokeella A ja B.

Polttokokeessa D koeaika oli yhdellä koekappaleella 30 minuuttia ja kolmella 60 minuuttia. Kokeella pyrittiin selvittämään hiiltymisnopeutta puun kosteusluokassa 2 ja 3. Samalla tarkoituksena oli myös selvittää mahdollisia puuhun syntyviä vaurioita palon aikana kosteuden ollessa suuri.

Polttokokeessa E koeaika oli 60 minuuttia. Kokeessa lämpötila kohotettiin normaalikäyrän mukaisesti 600 °C:een, jonka jälkeen lämpötila pidettiin vakiona. Kokeen tarkoituksena oli tutkia lämpötilan vaikutusta hiiltymisnopeuteen ja puun sisäosien kosteudenmuutoksiin ja lämpötilankohoamiseen.

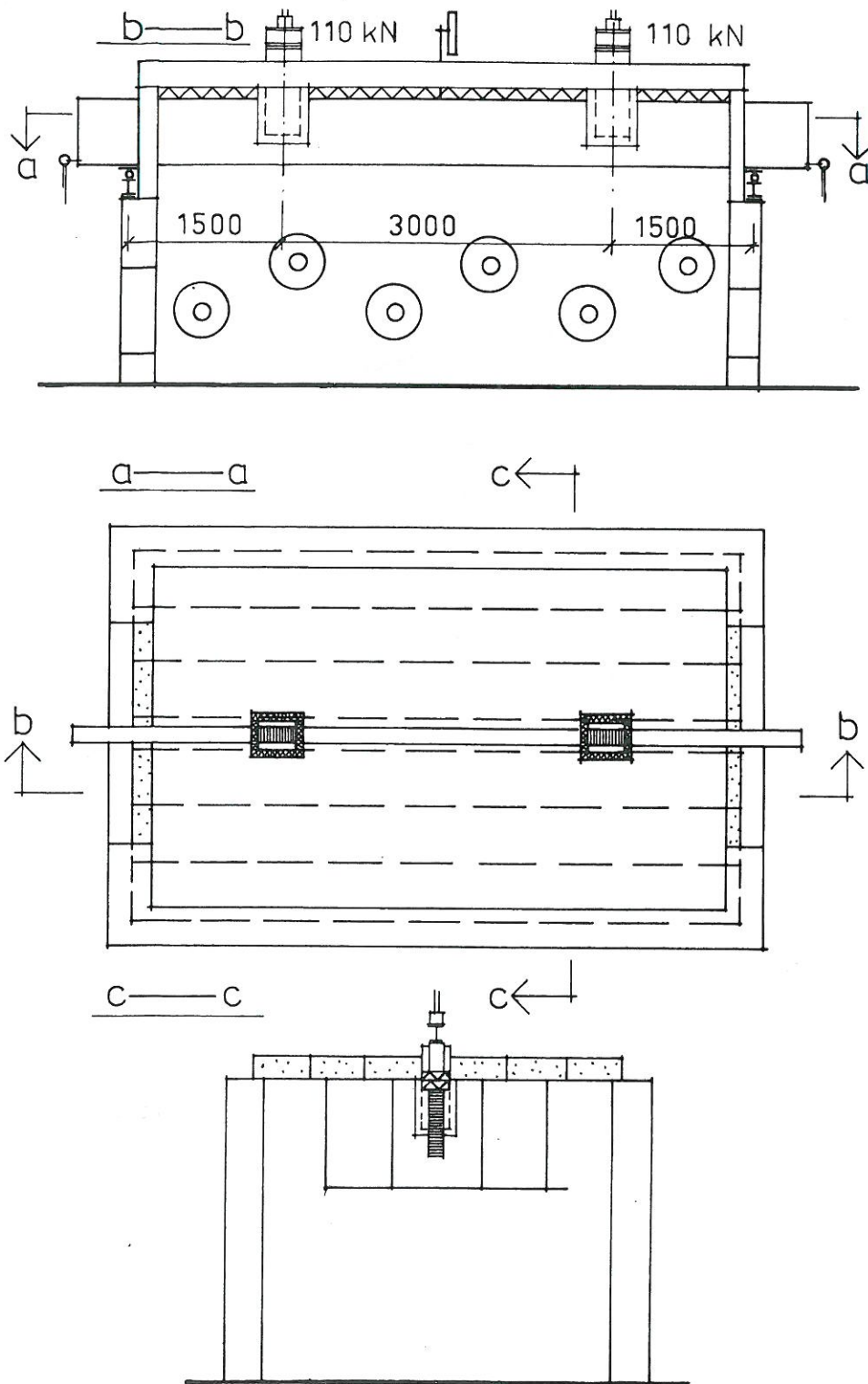
Kuormitettujen palkkien polttokokeiden tarkoituksena oli selvittää murto-kapasiteettia palo-olosuhteissa ja murtumismekanismia.

Kokeessa 1 tavoitteena oli leikkausmurtorajatilan selvittäminen ja kokeissa 2 ja 3 taivutusmurtorajatilan selvittäminen. Lisäksi selvitettiin taipuman avulla kimmomoduulin muutoksia kokeen aikana. Kuva 1 esittää kuormitusjärjestelyä kokeessa 1.

Liimasauman lujuuden muutoksia palon aikana tutkittiin tekemällä ennen polttokoetta ja polttokokeen jälkeen leikkauslujuuskokeita ja delaminointikokeita. Puun veto- ja puristuslujuuden muutoksia selvitettiin kuormitettujen palkkien lamelleista valmistetuilla koekappaleilla.

Rakennepuutavaran hiiltymisnopeutta selvitettiin polttokokeella F. Kokeeseen valittiin tiheydeltään toisistaan poikkeavia koekappaleita. Tarkoituksena oli saada selville tiheyden vaikutus hiiltymisnopeuteen.

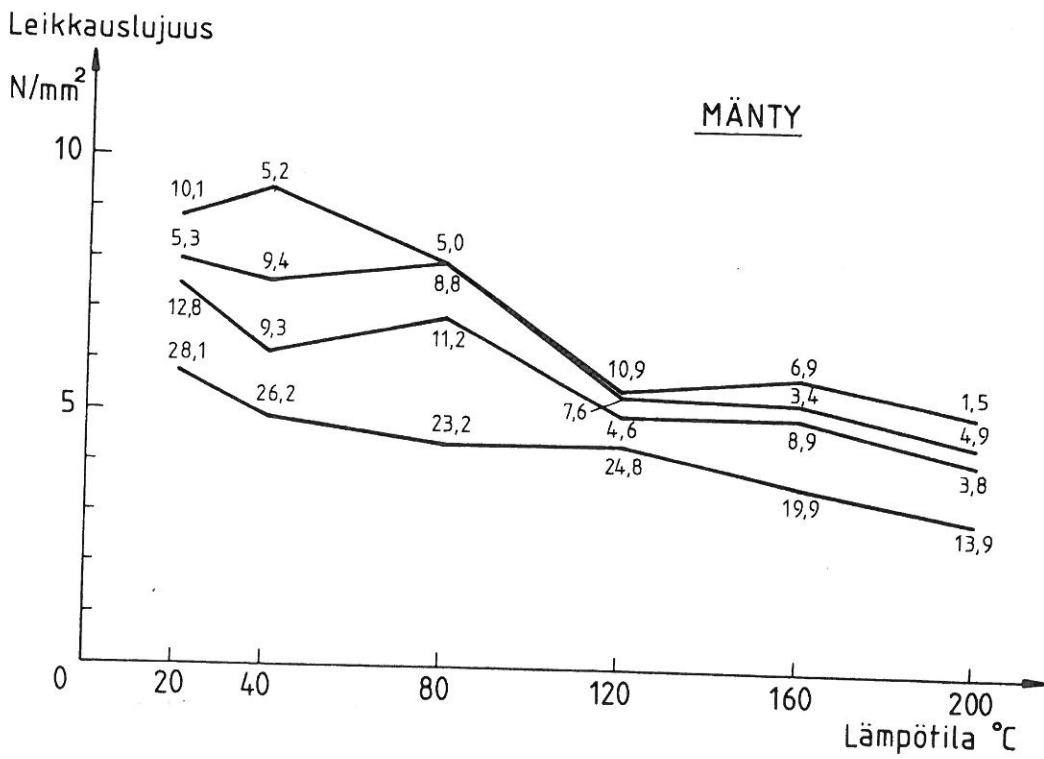
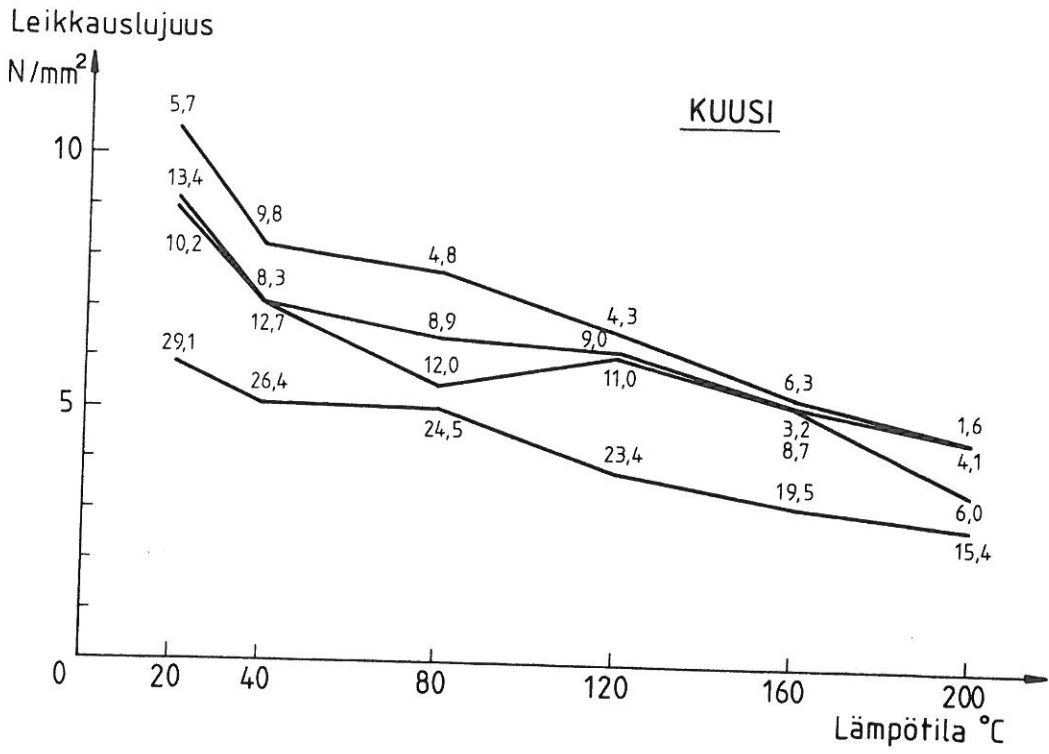
Kaikissa polttokokeissa koekappaleet olivat valmistetut kuusesta ja liimana oli Suomessa valmistettu resorsinolifenoliformaldehydiliima.



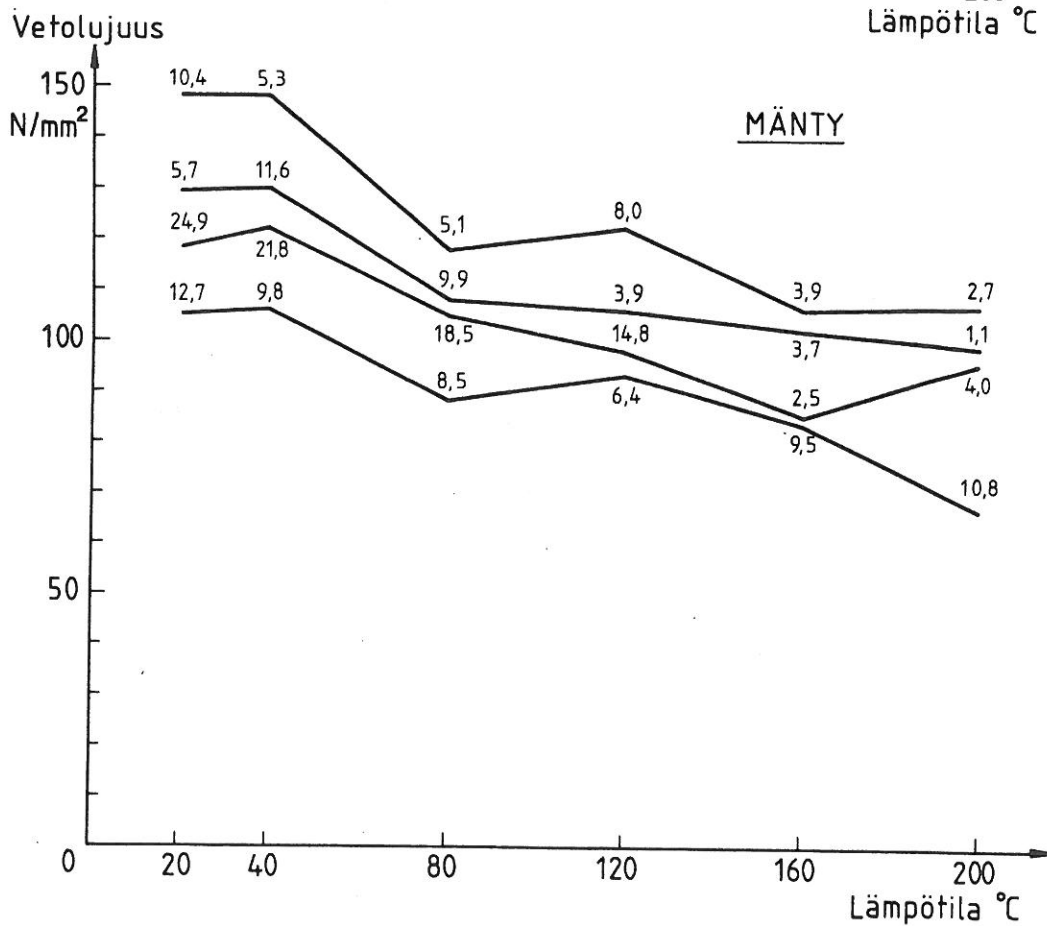
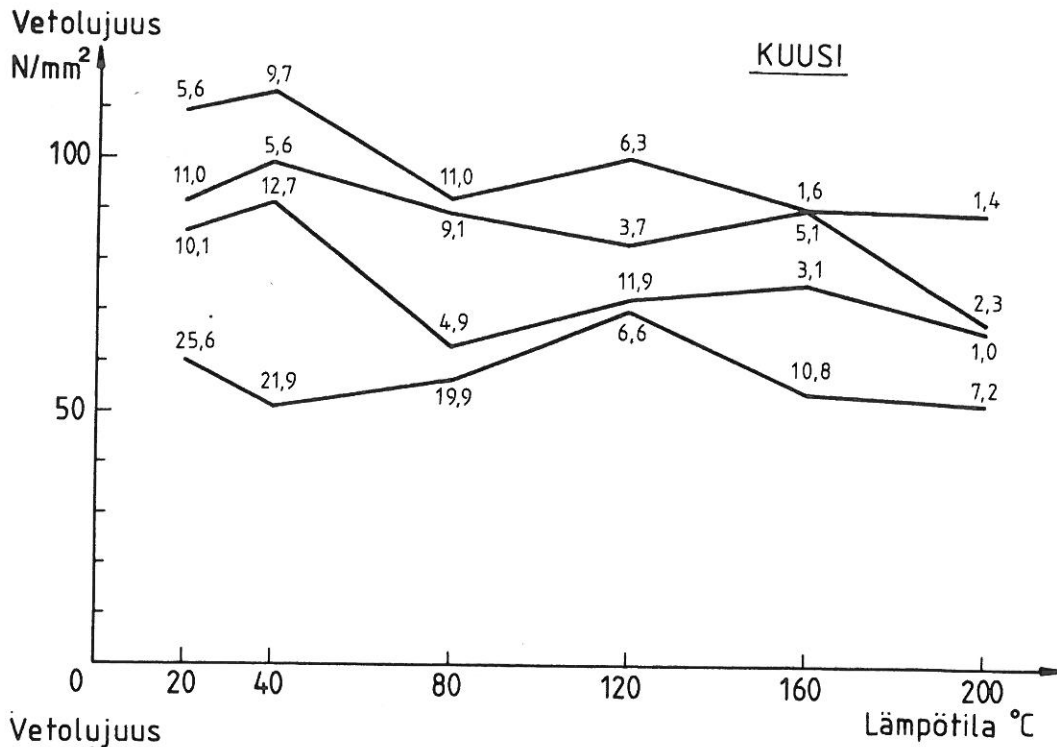
Kuva 1. Kuormitusjärjestely kokeessa 1

Puun lujuuskokeet eri lämpötiloissa

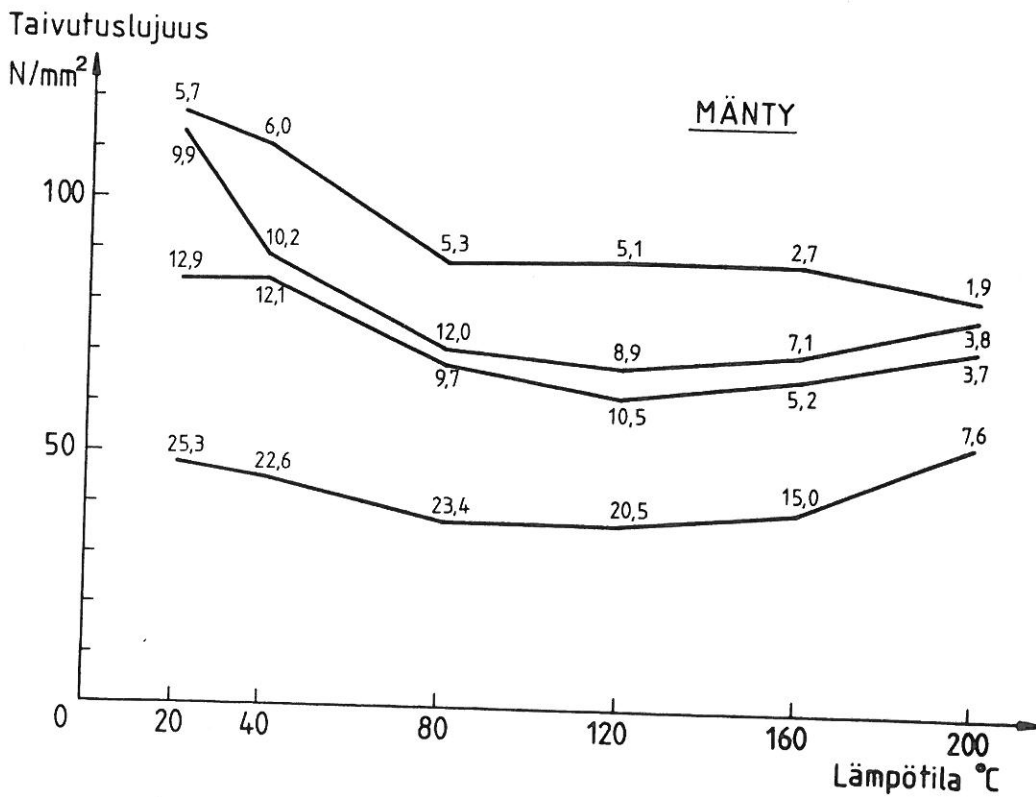
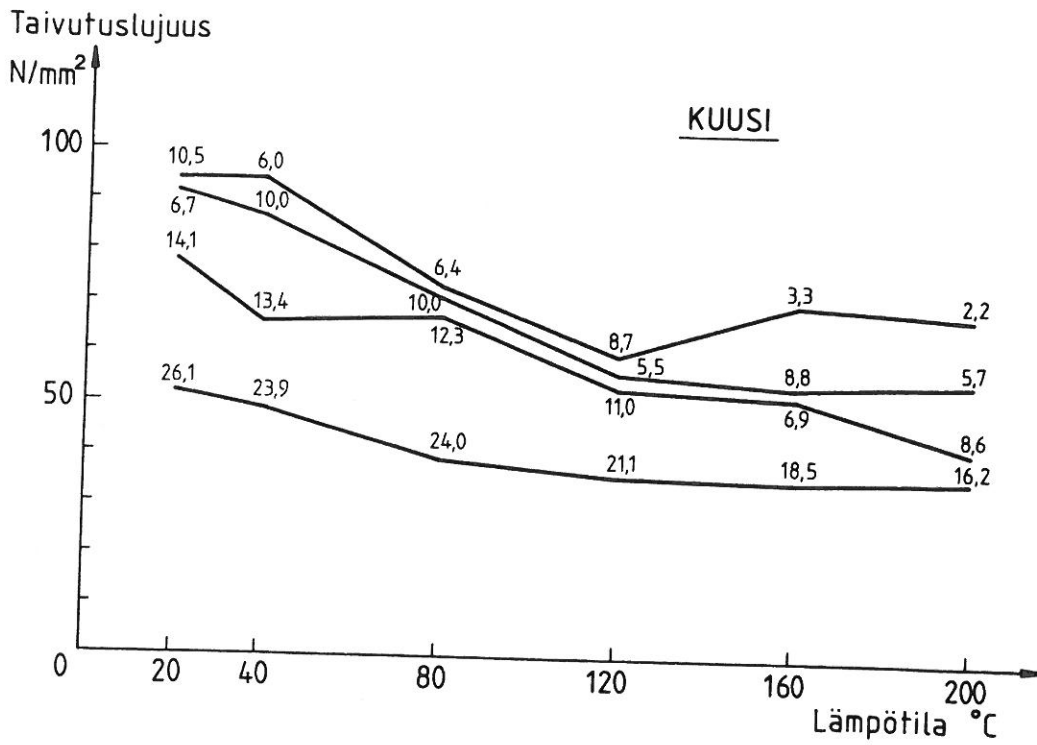
Valtion teknollisen tutkimuskeskuksen puulevylaboratoriossa tehtiin vuoden 1978 aikana pienille virheettömille koekappaleille lujuuskokeita eri lämpöti-



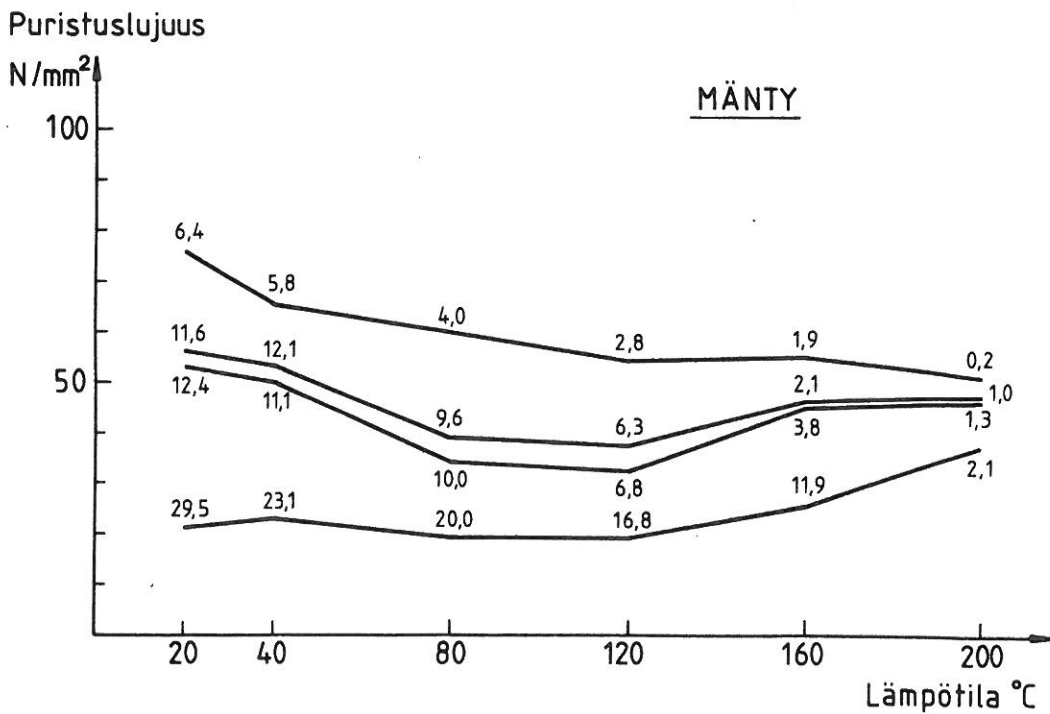
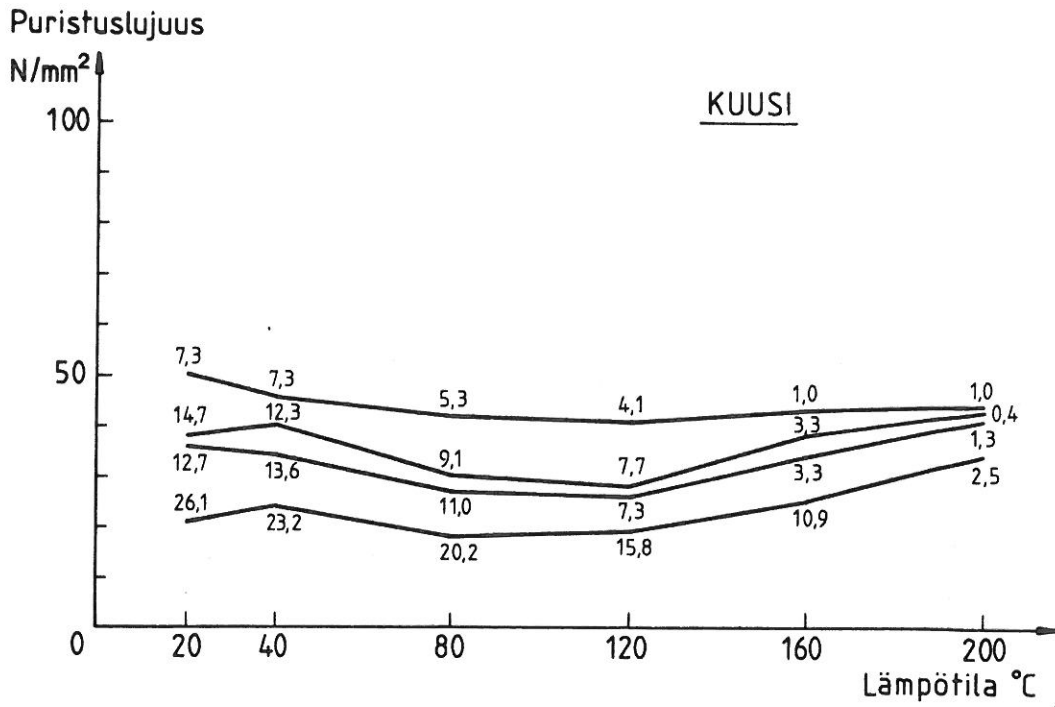
Kuva 2. Havupuun leikkauslujuus lämpötilan funktiona. Kuvaajien vieressä annetut luvut ilmoittavat puun kosteuden prosentteina.



Kuva 3. Havupuun vetolujuus lämpötilan funktiona. Kuvaajien vieressä annetut luvut ilmoittavat puun kosteuden prosentteina.



Kuva 4. Havupuun taivutuslujuus lämpötilan funktiona. Kuvaajien vieressä annetut luvut ilmoittavat puun kosteuden prosentteina.



Kuva 5. Havupuun puristuslujuus lämpötilan funktiona. Kuvaajien vieressä annetut luvut ilmoittavat puun kosteuden prosentteina.

loissa. Kokeiden tavoitteena oli saada selville männyn ja kuusen veto-, puristus-, taivutus- ja leikkauslujuuden riippuvuus lämpötilasta ja kosteudesta niissä lämpötiloissa, jotka vallitsevat puun sisäosissa tulipalon aikana. Lisäksi selvitettiin puun kimmomoduulin riippuvuutta lämpötilasta ja kosteudesta. Tärkeä tehtävä oli saada selville liimasauman lujuuden riippuvuus lämpötilasta. Koetulokset on esitetty kuvissa 2-5.

Polttokokeiden ja lujuuskokeiden tulosten yhdistäminen

Polttokokeiden yhteydessä oli tavoitteena selvittää ensiksi puun hiiltymisnopeus ja toiseksi puun lämpötila- ja kosteusjakaantuma palon aikana. Käyttämällä hyväksi edellä kuvattujen lujuuskokeiden tuloksia saadaan selville liimapuukurakenteen poikkileikkauksen lujuusjakautuma ja voidaan laskea puurakenteen kantokyky.

Kuormitettujen palkkien kokeiden avulla voidaan tarkistaa, missä määrin tutkimuksessa pienien koekappaleiden avulla saatu poikkileikkauksen lujuuden muutos vastaa käytännön liimapuukurakenteen lujuuden muutosta.

PUUN HIILTYMINEN PALOSSA

Hiiltymisnopeus ja siihen vaikuttavat tekijät

Koetulosten tarkastelussa käsitellään hiiltymisnopeutta ja sen vaihtelua sekä lisäksi eri tekijöiden vaikutusta hiiltymisnopeuteen.

Kuormittamattomien koekappaleiden hiiltymissyvyyksien keskihajonta puolen tunnin kokeessa on noin 0.5 mm ja yhden tunnin kokeessa noin 1.0 mm. Variaatiokertoimeksi saadaan 2.5 %. Kokeessa F sahatavaralle mitatut hiiltymien hajonta-arvot ovat jonkin verran suurempia.

Koetulosten vertailemiseksi keskimääräinen hiiltymisnopeus lasketaan ottamalla huomioon koekappaleen syttymiseen kulunut aika. Tarkastellaan erikseen palkkeja ja pilareita. Koetulokset yhdistetään siten, että saman kosteusluokan koekappaleet käsitellään yhdessä. Kokeet E ja F muodostavat lisäksi omat ryhmänsä, koska kokeessa E uunin lämpötila oli normaalikäyrää alempi ja kokeessa F koekappaleiksi oli valittu tiheydeltään toisistaan poikkeavia sahatavarakappaleita. Taulukossa 1 on esitetty yhteenvedona mittaustuloksista lasketut hiiltymisnopeudet.

Palkkien ja pilarien hiiltymisnopeudessa on eroja. Voidaan todeta kuivemmissä koekappaleissa pilarien hiiltyneen hitaammin kuin palkkien. Kosteampien koekappaleiden osalta asia on päinvastoin. Toisaalta taulukon viimeisen sarakkeen mukaan hajonta ei kasva, vaikka pilarit ja palkit katsotaankin kuuluvan samaan joukkoon. Tästä voidaan päätellä, että pilarien ja palkkien hiiltymisnopeudessa ei ole oleellista eroa.

Koetuloksista havaittiin, että koekappaleiden dimensiolla ei ole ollut vai-

Taulukko 1. Keskimääräiset hiiltymisnopeudet

Koe	Kosteus %	Uunin- lämpötila	Hiiltymisnopeus (mm/min)					
			Palkit		Pilarit		Kaikki	
			\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S
A,B,C 1,2,3	11	Normaalik.	0.71	0.05	0.64	0.02	0.69	0.05
D	18-26	Normaalik.	0.55	1)	0.60	1)	0.57	0.03
E	11	Alempi k.	0.37	1)	0.37	1)	0.38	0.01
F	11	Normaalik.	0.61	0.05	-	-	-	-

1) Koetuloksia vain 1 tai 2 kappaletta

2) \bar{X} = keskiarvo ja S = keskihajonta

kutusta hiiltymisnopeuteen. Poikkileikkauksen pienin mitta oli kokeissa vähintään neljä kertaa arvioitu hiiltymissyvyys. Vertaamalla kokeessa F saatuja sahatavaran hiiltymisnopeuksia vastaavissa olosuhteissa säilytettyjen ja poltettujen liimapuukappaleiden hiiltymisnopeuksiin, todetaan sahatavaran hiiltyneen hitaammin. Tämän voi osittain selittää kokeen F lyhyemmällä polttoajalla. Sahatavaran hiiltymisnopeutta ei tämän kokeen perusteella tarvitse otaksua suuremmaksi kuin liimapuun.

Puun kosteuden ollessa 18...26 % koekappaleiden hiiltymisnopeus on noin 20 % pienempi kuin kosteuden ollessa 11 %. Kosteudella on siten merkittävä vaikutus puun hiiltymisnopeuteen.

Kokeessa E uunin maksimilämpötila oli 600 °C. Tällöin keskimääräinen hiiltymisnopeus oli noin 45 % pienempi kuin normaalikäyrän mukaan poltetun liimapuun hiiltymisnopeus. Näin ollen tulipalon lämpötilalla on oleellinen vaikutus hiiltymisnopeuteen.

Puun tiheyden vaikutusta hiiltymisnopeuteen tutkittiin kokeen F avulla. Puun tiheyden ollessa noin 400 kg/m³ saatiin hiiltymisnopeudeksi 0.6 mm/min ja tiheyden ollessa noin 300 kg/m³ hiiltymisnopeus on 0.7 mm/min.

Nurkan hiiltymisnopeus vaihteli suuresti. Keskimääräiseksi nurkan hiiltymisnopeudeksi saatiin 7.6 mm²/min keskihajonnan ollessa 3.5 mm²/min.

Hiiltymissyvyys lujuuslaskelmissa

Hiiltymisnopeus voidaan otaksua poikkileikkauskoosta riippumatta pilareille ja palkeille yhtä suureksi. Puun syttymisaika oli kokeissa 2...3 minuuttia kosteuden ollessa 11 %. Tällöin keskimääräiseksi hiiltymissyvyudeksi saadaan 30 minuutissa 19 mm ja 60 minuutissa 40 mm. Nämä tulokset voidaan yleistää kosteusluokassa 1 säilytetyille liimapuulle ja rakennepuutavaralle. Vastaavasti kokeen D perusteella keskimääräiseksi hiiltymissyvyudeksi saadaan 30 minuutissa 14 mm ja 60 minuutissa 31 mm kosteusluokassa 2 ja 3 säilytetyille puulle.

Nurkan hiiltymisnopeudeksi todettiin edellä keskimäärin $7.6 \text{ mm}^2/\text{min}$. Käyttämällä syttymisaikana keskimääräistä syttymisaikaa 3.5 min saadaan nurkan hiiltyneeksi pinta-alaksi 200 mm^2 30 minuutin palonkestoajassa ja 430 mm^2 60 minuutin palonkestoajassa.

E kokeen tuloksia ei voida yleistää, koska ne vastaavat ainoastaan yhtä palokäyrää. Voidaan vain todeta, että tulipalon lämpötilalla on oleellinen vaikutus hiiltymisnopeuteen. Mikäli palokäyrän kulku halutaan tarkemmin ottaa huomioon lujuslaskelmissa, tulisi asiasta tehdä lisää kokeita.

LIIMAPUUN LÄMPENEMINEN PALOSSA

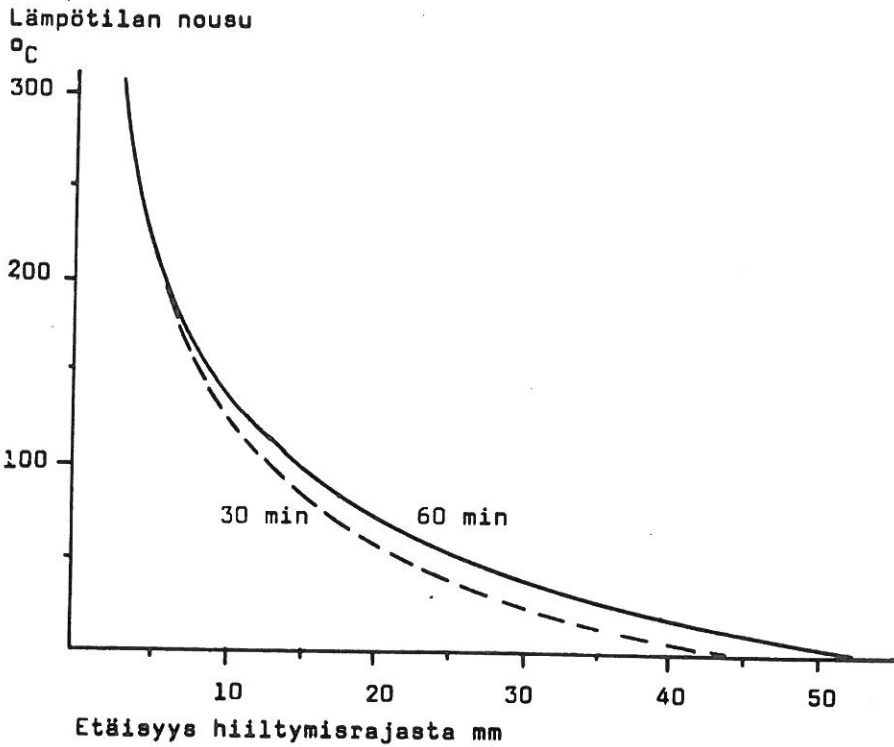
Puun sisäosien lämpötilojen muutoksien tutkimiseen keskityttiin tarkemmin polttokokeissa A, B ja C. Myös muissa polttokokeissa mitattiin termoelementtien avulla lämpötilanmuutoksia poikkileikkauksen pidemmän sivun keskialueelta. Näillä mittauksilla pyrittiin toisaalta täydentämään koetuloksia ja toisaalta kosteuden vaikutuksen selvittämiseen kokeessa D, ja kokeessa E pyrittiin uunin lämpötilakäyrän ja puun lämpenemisen välisen riippuvuuden selvittämiseen.

Koska kantavan puurakenteen palonkestoaikavaatimuksena on yleensä 30 minuuttia tai 60 minuuttia, kokeissa tähdättiin poikkileikkauksen lämpötilajakautuman tutkimiseen juuri näinä palonkestoaikoina. Termoelementit sijoitettiin siten, että kokeen päättyessä saataisiin mahdollisimman tarkka kuva liimapuun sisäosien lämpötiloista. Jotta lämpötilamittauksia voidaan tehokkaam-

Taulukko 2. Lämpötilannousuja 10, 50, 100, 200 ja $300 \text{ }^\circ\text{C}$ vastaavina ajankohtina lasketut termoelementtien etäisyydet (mm) hiiltymisrajasta

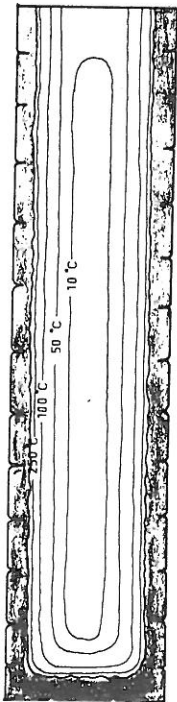
T $^\circ\text{C}$	Koe	Aika polttokokeen alusta (min)					
		10	20	30	40	50	60
10	A...D	24	32	37	40	(43)	(45)
	E	26	36	42	46	(49)	(52)
50	A...D	15	20	22	24	25	(26)
	E	17	24	28	30	33	(34)
100	A...D	12	12	13	13	14	15
	E	14	16	18	20	22	24
200	A...D	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
	E	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
300	A...D	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	E	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2

1) Sulussa olevat arvot havaintoalueen ulkopuolelta

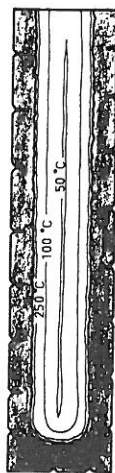


Kuva 6. Puun lämpötilan nousu hiiltymisrajan läheisyydessä polttokokeissa A...D

Palkki 140x600
t=30 min



Palkki 90x400
t=30 min



min käyttää hyväksi, on hiiltymisnopeusmittaus-
ten avulla laskettu hiiltymisrajan etäisyys
termoelementeistä näiden lämpötilannousua 10,
50, 100, 200 ja 300 °C vastaavana ajankohtana.
Lämpötilan nousua 10, 50 ja 100 °C vastaava
etäisyys hiiltymisrajasta oli sitä suurempi mi-
tä pidemmän palonkestoajan jälkeen termoele-
mentti on saavuttanut sen. Lämpötilannousua
200 ja 300 °C vastaava etäisyys hiiltymisrajas-
ta oli koetulosten mukaan ajasta riippumaton.

Tutkimustulosten mukaan puun sisäosien kes-
kimääräinen lämpötilajakautuma on hiiltymisra-
jasta aina 10 °C lämpötilaerokäyrään saakka li-
kipitäen koekappaleen paksuudesta ja kosteuspi-
toisuudesta riippumaton. Toisaalta koetulosten
hajonta on suuri varsinkin korkeammissa lämpö-
tiloissa. Tämän osoittaa myös termokameraku-
vaukset, joissa isotermit ovat hyvin mutkitta-
levia.

Kuva 7. Palkin poikkileik-
kauksen lämpötilan-
muutokset 30 minu-
tin polttokokeen
päättymishetkellä

Polttokokeessa E lämpö on tunkeutunut hiil-
tymisrajasta syvemmälle kuin muissa kokeissa.
Puolentunnin palamisajan jälkeen ero on noin
1...5 mm isotermitä riippuen. Tämä johtuu

siitä, että kokeessa E hiiltymisnopeus oli huomattavasti hitaampi kuin normaalipalokäyrän mukaan poltetuissa koekappaleissa, jolloin lämpötila ehtii tunkeutua syvemmälle hiiltymisrajan edetessä hitaammin.

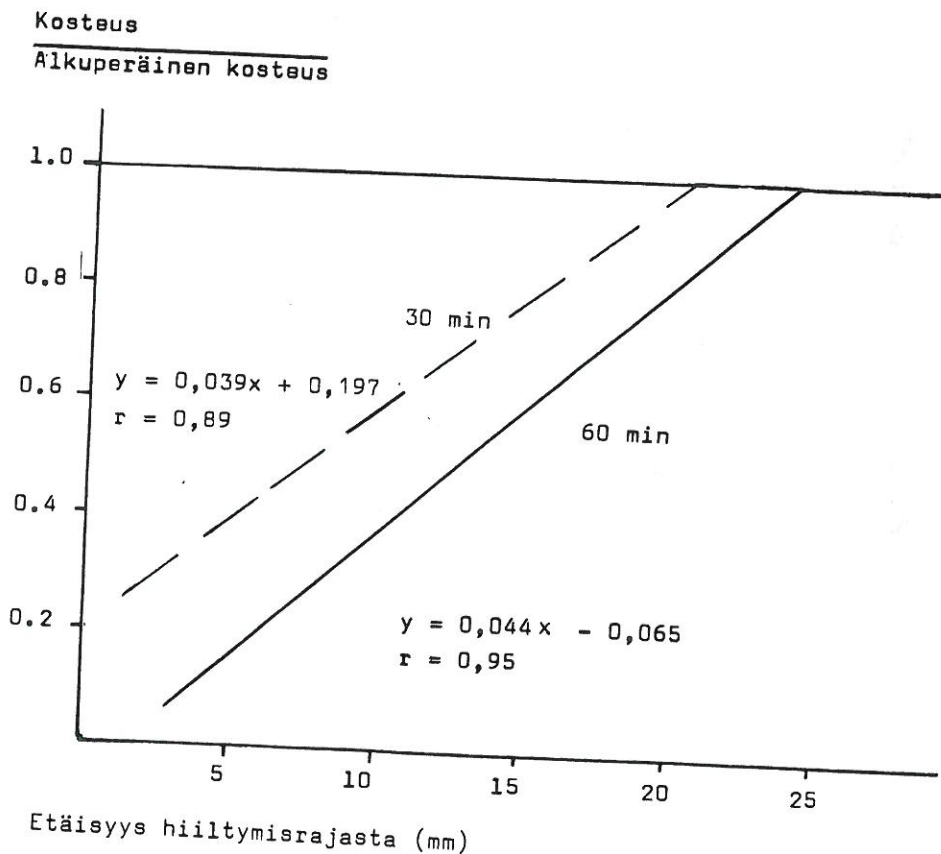
Palkkien yläreunat oli suojattu mineraalivillalla. Yläreunan läheisyyteen asennettujen termoelementtien lämpötilanmuutoksista todetaan yläreunan läheisyydessä lämpötilajakautuman olevan samanlainen kuin palkin keskialueella.

Edellä esitettyihin lämpötilanmuutosten selvitykseen perustuen on kuvassa 7 esitetty esimerkkinä kahden poikkileikkauksen lämpötilanmuutoskäyrät 30 minuutin palamisajan jälkeen.

PUUN KOESTEUDEN MUUTOKSET PALOSSA

Koetulosten tarkastelussa kiinnitetään päähuomio kosteusjakautuman yleisen kulun selvittämiseen. Koetulosten mukaan poikkileikkauksien keskikohtien kosteus on yleisesti ottaen pysynyt ennallaan. Toisissa tapauksissa se on jonkin verran laskenut ja toisissa kohonnut. Osittain tämä voidaan selittää normaaliksi kosteuden hajonnaksi. Muutamissa tapauksissa hiiltymisrajan läheisyydessä havaitaan kosteushuippu, joka on hyvin kapea.

Hiiltymisrajalla puu on käytännöllisesti katsoen täysin kuivaa. Kosteus nousee kuitenkin hyvin jyrkästi sisäänpäin mentäessä. Reunaosan kosteuspi-



Kuva 8. Poikkileikkauksen kosteusjakautuma 30 minuutin ja 60 minuutin kokeiden jälkeen

toisuutta voidaan approksimoida suoralla. Koetuloksista on laskettu regressiosuora ottamalla mukaan reunimmaisten koekappaleiden kosteusmittausten tulokset. Vaaka-akselilla on etäisyys hiiltymisrajasta ja pystyakselilla mitattun kosteuden ja alkuperäisen kosteuden suhde. Keskiosan kosteuden otaksutaan pysyvän ennallaan.

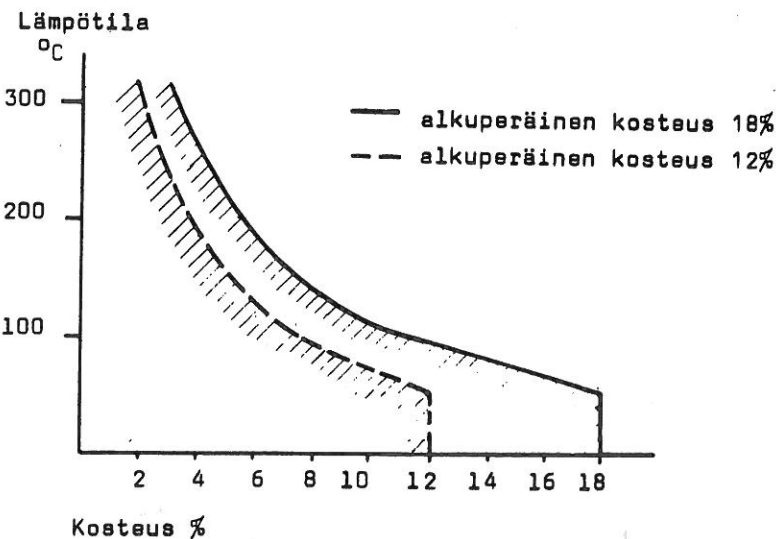
Kosteusnäytteet otettiin yleensä poikkileikkauksen pidemmän sivun keskialueelta. Muutamien kokeiden perusteella kuitenkin todettiin lyhyemmän sivun reunan läheisyydessä kosteusjakautuman vastaavan pidemmän sivun keskialueen reunoilta mitattua kosteusjakautumaa.

Yhdistämällä kaikki puolen tunnin koekappaleet yhdeksi joukoksi ja kaikki tunnin polttokokeen koekappaleet toiseksi joukoksi, saatiin kuvan 8 mukaiset kosteusjakautumat.

LIIMAPUUN LUJUUS PALOSSA

Lämpötilan ja kosteuden vaikutus puun lujuuteen

Tulipalossa puun hiiltymisvyöhykkeen lähellä olevat pintaosat lämmitessään myös kuivuvat. Puussa esiintyvät kosteus- ja lämpötilaolosuhteet voidaan



Kuva 9. Puun kosteus- ja lämpötilaolosuhteet palossa

näin ollen rajoittaa määrätulle alueelle. Edellä on selvitetty puun kosteutta ja lämpötilaa polttokokeiden aikana. Kuvien 2 ja 4 perusteella saadaan rajoitetuksi kosteuslämpötilakoordinaatistosta alueet, joissa puun eri osat ovat tulipalo-olosuhteissa.

Lujuuskokeissa käytettyjen pienten koekappaleiden kosteudet ja lämpötilat vastasivat melko hyvin kuvassa 5 esitettyä kosteus-lämpötila-alueita. Tämän johdosta saadut lujuusarvot ovat käyttökelpoisia arvioitaessa puun lujuuden muutoksia palossa.

Koska lujuuskokeet on tehty pienillä ja virheettömällä koekappaleilla, ovat lujuusarvot hyvin suuria eikä niitä sellaisenaan voi käyttää puun lujuuden määrittämiseen palo-olosuhteissa. Tutkimuksessa onkin tavoitteena ollut puun lujuuden muutosten selvittäminen kosteuden ja lämpötilan muuttuessa. Kunkin lujuuskokeen tuloksia on käsitelty yhtenä kokonaisuutena siten, että samanaikaisesti on otettu huomioon lämpötilan ja kosteuden vaikutus.

Seuraavassa on esitetty kokeissa käytettyjä lämpötiloja vastaavat regressioyhtälöistä lasketut kaavat, jotka antavat lujuudet prosentteina siten, että 20 °C lämpötilaa ja 12 %:n kosteutta vastaava lujuus on 100 %. Sulkeihin on merkitty kokonaiskorrelaatio.

- Vetolujuus: kuusi: $y = 138 - 0.26X_1 - 2.7X_2$ (0.76)
mänty: $y = 114 - 0.20X_1 - 0.8X_2$ (0.73)
Puristus- kuusi: $y = 208 - 21.3 \ln X_1 - 3.7X_2$ (0.92)
lujuus: mänty: $y = 233 - 28.7 \ln X_1 - 3.9X_2$ (0.96)
Taivutus- kuusi: $y = 194 - 21.8 \ln X_1 - 2.4X_2$ (0.96)
lujuus: mänty: $y = 207 - 22.1 \ln X_1 - 3.4X_2$ (0.97)
Leikkaus- kuusi: $y = 128 - 0.35X_1 - 1.8X_2$ (0.95)
lujuus: mänty: $y = 126 - 0.31X_1 - 1.7X_2$ (0.91)
Taivutuskim- kuusi: $y = 121 - 0.14X_1 - 1.5X_2$ (0.84)
momoduuli: mänty: $y = 130 - 0.17X_1 - 2.2X_2$ (0.89)
Puristuskim- kuusi: $y = 123 - 0.09X_1 - 1.8X_2$ (0.80)
momoduuli: mänty: $y = 129 - 0.19X_1 - 2.1X_2$ (0.91)

Kaavoissa X_1 on lämpötila (°C) ja X_2 kosteus (%).

Edellä esitetyistä tuloksista havaitaan, että sekä lämpötilalla että kosteudella on selvä vaikutus puun kaikkiin lujuusominaisuuksiin. Verrattaessa mäntyä ja kuusta voidaan havaita, että niiden tulokset poikkeavat yleensä jonkin verran toisistaan. Leikkauslujuuden riippuvuus lämpötilasta ja kosteudesta on sen sijaan lähes sama molemmilla puulajeilla.

Lämpötilan vaikutus liimasauman lujuuteen

Liimasauman leikkauslujuus pieneni lämpötilan kohotessa likipitään samalla tavalla kuin puulle tehdyissä vastaavissa lujuuskokeissa. Puustamurtumaprosentti kasvoi lämpötilan kohotessa. Ylemmissä lämpötiloissa halkeamat olivat vuosirenkaan suuntaisia. Taulukossa 3 on esitetty lämpötilan vaikutus liimasauman lujuuteen

Taulukko 3. Liimasauman lujuuskokeiden tulokset

lämpötila °C	kuusi			mänty		
	kosteus %	leikkaus- lujuus N/mm ²	puustamurtuma %	kosteus %	leikkaus- lujuus N/mm ²	puustamurtuma %
20	12.6	7.8	84	12.7	9.0	89
40	11.3	6.6	93	11.1	8.8	95
80	8.7	5.6	93	10.4	7.1	98
120	7.2	5.1	91	8.9	6.0	97
160	5.4	5.3	96	6.5	5.8	95
200	3.7	4.5	100	3.9	5.7	100
240	2.0	3.1	100	2.4	6.0	100

Yhteenvedona voidaan todeta, että itse liiman leikkauslujuus on suurempi kuin puun ja että liimasauma ei ole liimapuun heikko kohta tulipalossa. Lujuuskokeissa liimana käytettiin yksinomaan tavanomaista resorsinolifenoliformaldehydihartsiliimaa. Tuloksia voidaan soveltaa vain tutkimuksessa käytetylle liimalle.

Puun ja liimasauman jäännöslujuus palon jälkeen

Koepalkeista ja pilareista sekä ennen polttokoetta että polttokokeen jälkeen otetuilla näytteillä pyrittiin selvittämään puun pysyviä lujuuden muutoksia palossa. Tarkoituksena oli saada selville lähinnä palosta aiheutuvia puun sisäisen rakenteen mahdollisia vaurioita.

Polttokokeissa olleiden liimasaumojen leikkauslujuus oli noin 10 % pienempi kuin vertailukappaleiden. Murtuminen tapahtui puusta ja usein vuosirenkaita pitkin. Lujuuden alenemisen syynä on todennäköisesti puun leikkauslujuuden pieneneminen vuosirengaspinnoissa.

Liimasaumojen delaminointikokeiden tulokset osoittavat liimasaumojen säilyneen palossa hyvin lukuunottamatta kaikkein kosteimpia koekappaleita, joissa delaminointiprosentti on noussut huomattavasti. Vaikka kosteissa olosuhteissa säilytettyjen liimapuukurakenteiden liimasaumojen laatu huononee palossa, kuitenkin leikkauslujuuskokeet osoittavat liimasaumojen leikkauslujuuden olevan riittävän.

Puun puristuslujuus on polttokokeen jälkeen tutkittuna sama kuin ennen polttokoetta. Vetolujuus on alentunut noin 15 % alkuperäisestä. Vetolujuuden alenemistä voi osittain selittää suurella hajonnalla. Kuitenkin on olemassa mahdollisuus, että puun sisäosassa on tapahtunut lievää vaurioitumista.

Liimapuukurakenteen poikkileikkauksen lujuus

Hiiltymisrajan läheisyydessä lämpötilan vaikutuksesta puun sisäinen rakenne rikkoutuu ja puu menettää lujuuttaan. Selluloosamolekyylit alkavat hajota 200...250 °C lämpötilassa ja puu menettää vetolujuutensa. 300 °C lämpötilassa puu on jo osaksi hiiltynyt.

Lujuuskokeita suoritettiin 200 °C lämpötilaan saakka. Seuraavassa tarkastelussa koetuloksista laskettu lujuuden ja lämpötilan välinen riippuvuus on katsottu päteväksi 230 °C saakka. Tätä korkeammassa lämpötilassa puun otaksutaan menettävän täysin lujuutensa. Isoterminä 230 °C on polttokokeissa ollut keskimäärin 5 mm:n syvyydellä siitä hiiltymisrajasta jonka ulkopuolella hiili on irrotettavissa kevyellä teräsharjauksella.

Taulukko 4. Kuusesta valmistetun liimapuukuranteen poikkileikkauksen lujuus alkuperäisestä 30 ja 60 minuutin palonkestoajan päättyessä. Alkuperäinen kosteus on 12 % ja lämpötila 20 °C

Palonkesto aika 30 min								
Etäisyys reunasta mm	Lämpötila °C	Kosteus %	Lujuus alkuperäisestä %					
			Veto	Puristus	Taivutus	Leikkaus	Kimmom.	
							taiv.	pur.
5	230	4.8	65	75	64	39	81	95
10	145	7.2	81	75	68	64	90	98
15	105	9.6	84	73	70	74	92	97
20	75	12.0	86	72	71	80	92	95
25	55	12.0	91	78	78	88	95	97
30	40	12.0	95	85	85	93	97	98
35	30	12.0	97	91	91	96	99	99
40	25	12.0	99	95	95	98	99	100
45	20	12.0	100	100	100	100	100	100

Palonkesto aika 60 min								
Etäisyys reunasta mm	Lämpötila °C	Kosteus %	Lujuus alkuperäisestä %					
			Veto	Puristus	Taivutus	Leikkaus	Kimmom.	
							taiv.	pur.
5	230	1.9	73	85	71	44	86	100
10	155	4.5	86	84	73	66	92	102
15	120	7.1	87	80	73	73	93	100
20	90	9.8	88	76	72	79	94	98
25	70	12.0	87	73	73	82	93	96
30	60	12.0	90	77	76	86	94	97
35	45	12.0	93	83	82	91	97	98
40	35	12.0	96	88	88	95	98	99
45	30	12.0	97	91	91	96	99	99
50	25	12.0	99	95	95	98	99	100
55	20	12.0	100	100	100	100	100	100

Edellä olevaan perustuen kantavan poikkileikkauksen dimensiot saadaan pienentämällä poikkileikkausta hiiltyneiltä sivuiltaan 5 mm.

Kantavan liimapuupoikkileikkauksen lujuus saadaan määritetyksi eri syvyyksillä hiilymisrajasta selvittämällä ensin kyseessä olevan kohdan kosteus ja lämpötila ja tämän jälkeen vastaava lujuus.

Kuormituskokeet

Kuormitettujen palkkien polttokokeiden tuloksista voidaan laskea kantavan poikkileikkauksen vetolujuus ja leikkauslujuus. Kokeessa 1 palkin alkuperäinen murtumisen syy oli leikkauslujuuden ylitys. Leikkausjännitys murtohetkellä oli 2.8 N/mm^2 .

Ensimmäisessä kokeessa kuormitusta jatkettiin välittömästi leikkausmurtuman jälkeen. Tällöin palkki toimi kahtena päällekkäisenä likipitäen samanalaisena palkkina. Lopullinen murtuminen tapahtui molempien palkin osien limpien lamellien sormijatkosten ja oksien kohdalta. Vetojännitys murtohetkellä oli noin 32 N/mm^2 .

Kokeissa 2 ja 3 murtuminen tapahtui alimpien lamellien jännitysten ylittäessä vetolujuuden. Kokeessa 2 kantavan poikkileikkauksen maksimijännitys oli 30 N/mm^2 ja kokeessa 3 29 N/mm^2 otaksuttaessa jännityksen jakautuvan poikkileikkauksessa suoraviivaisesti. Lämpenemisen ja kuivumisen yhteisvaikutusta palkin alareunassa puun kutistuminen aiheuttaa $5...15 \text{ mm}$ vyöhykkeelle noin 3 N/mm^2 vetojännityksen lisäyksen. Näin ollen palkin KP 2 alareunan murtovetojännitys oli likimäärin 33 N/mm^2 ja palkin KP 3 32 N/mm^2 .

Lamellien vetolujuudeksi lujuusluokassa LT30 oli sormijatkosten laadunvalvonnassa saatu koepalkkien valmistusajankohtana keskimäärin 39 N/mm^2 keskihajonnan ollessa 5 N/mm^2 . Vetolujuus alenee taulukon perusteella arvioituna $5...30 \text{ mm:n}$ vyöhykkeellä noin 15% . Tällöin lamellien sormijatkosten vetolujuus on alareunassa keskimäärin 33 N/mm^2 .

Edellä esitetyt vertailut osoittavat, että pienillä koekappaleilla selvitettyä lujuuden riippuvuutta lämpötilasta ja kosteudesta voidaan riittäväällä tarkkuudella käyttää hyväksi selvitettäessä liimapuupoikkileikkauksen lujuutta palon aikana.

YHTEENVETO

Tutkimustulokset osoittavat, että Suomessa käytössä oleva kantavien puurakenteiden palonkestoajan määrittämismenetelmä on periaatteeltaan oikea. Toisaalta kokeiden tulosten perusteella on mahdollista tarkentaa paloteknisessä mitoituksessa käytettäviä lähtötietoja, joita ovat palotilanteessa kantavan poikkileikkauksen korkeus ja leveys, poikkileikkauksen kosteus- ja lämpötilajakautuma sekä eri lujuusarvot.

Kantavan jäännöspoikkileikkauksen leveyteen ja korkeuteen vaikuttaa ratkaisevasti hiiltymisnopeus. Kuitenkin myös hiiltymättä jääneestä poikkileikkauksesta hiiltymisvyöhykkeen välittömässä yhteydessä olevat reunaosat ovat menettäneet lujuutensa. Tämän vyöhykkeen paksuudeksi palonkestoajasta riippumatta on tutkimuksessa saatu keskimäärin 5 mm . Hiiltymissyvyyden on todettu olevan suoraan verrannollinen palamisaikaan, joka alkaa puun syttymisestä. Keskimääräiseksi hiiltymissyvyydeksi on saatu 19 mm 30 minuutin palonkesto-

jassa ja 40 mm 60 minuutin palonkestoajassa puurakenteen kosteusluokassa 1. Poikkileikkauksen koko ei vaikuta merkittävästi hiiltymisnopeuteen. Kuitenkin vähimmäisleveytenä on tutkimuksessa käytetty nelinkertaista hiiltymissyvyttä aiemmin suoritettujen tutkimusten perusteella. Puun kosteus ja uunin lämpötila polttokokeessa vaikuttavat oleellisesti hiiltymisnopeuteen.

Poikkileikkauksen lujuusominaisuudet pienenevät hiiltymisrajan läheisyydessä. Puolen tunnin palonkestoajan päättyessä vyöhyke, jolla lujuusominaisuudet alenevat, on 40 mm ja tunnin palonkestoajan päättyessä 55 mm. Tutkimuksessa on selvitetty lujuusjakautumat pienillä koekappaleilla saatujen tulosten perusteella. Lujuusjakautuman perusteella lasketut poikkileikkauksen kapasiteetit ovat likimäärin vastanneet luonnollista kokoa olevien palkkien kuormituskokeista saatuja kapasiteetteja. Tämän perusteella pienistä virheetömistä koekappaleista määritettyjä lujuuden muutosarvoja voidaan käyttää arvioitaessa puurakenteen lujuuden muuttumista palossa.

LOPPUSANAT

Edellä on käsitelty tutkimuksia, jotka tehtiin Valtion teknisen tutkimuskeskuksen palotekniikan laboratoriossa vuosina 1978-1979. Tutkimukset liittyivät Suomen ja Neuvostoliiton välisen rakennusalan tieteellisteknilliseen yhteistyöhön.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Kallioniemi, Pekka, Kantavien puurakenteiden palonkestävyydestä, Licensiaattityö HTKK. Otaniemi 1979. 115 s.
- [2] Nuurtamo, Juha, Liimapuun palonkestävyydestä - lämpötilat, kosteus. Diplomityö HTKK. Otaniemi 1978. 69 s.
- [3] Nyman, Christer, Lämpötilan ja kosteuden vaikutus puun ja liimasauman lujuuteen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, puulevylaboratorio. Julkaisematon tutkimusselostus. Otaniemi 1979. 28 s.

Claes Holm, prof., Valtion tekninen tutkimuskeskus, Otaniemi
Pekka Kallioniemi, dipl.ins., Sisäasianministeriö, Helsinki
Juha Nuurtamo, dipl.ins.