

RAPPORT

Ralph Nussbaum, Birgit Östman

Brandskyddsmedel för träkonstruktioner — Kunskapsöversikt 1986

*Fire Retardants for Timber Structures
— Literature Survey 1986*

Trätec

INSTITUTET FÖR TRÄTEKNISK FORSKNING

Ralph Nussbaum och Birgit Ostman

BRANDSKYDDSMEDEL FÖR TRÄKONSTRUKTIONER
- Kunskapsöversikt 1986

Fire Retardants for Timber Structures
- *Literature Survey 1986*

TräteknikCentrum, Rapport I 8703022

Nyckelord:

<i>char yield</i>
<i>charring rate</i>
<i>corrosion</i>
<i>fire resistance</i>
<i>fire retardants</i>
<i>intumescent coatings</i>
<i>mechanical properties</i>
<i>timber structures</i>
<i>wood construction</i>

Stockholm mars 1987

Rapporter från TräteknikCentrum är kompletta sammanställningar av forskningsresultat eller översikter, utvecklingar och studier. Publicerade rapporter betecknas med I eller P och numreras tillsammans med alla utgåvor från TräteknikCentrum i löpande följd.

Rapporter kan som regel beställas kostnadsfritt i ett exemplar av medlemsföretag. Ytterligare beställda exemplar faktureras.

Citat tillåtes om källan anges.

Reports issued by the Swedish Institute for Wood Technology Research comprise complete accounts for research results, or summaries, surveys and studies. Published reports bear the designation I or P and are numbered in consecutive order together with all the other publications from the Institute.

Member companies may generally order one copy of any report free of charge. A charge will be made for any further copies ordered.

Extracts from the text may be reproduced provided the source is acknowledged.

TräteknikCentrum betjänar de fem industrigrenarna sågverk, trämanufaktur (snickeri-, trähus-, möbel- och övrig träbearbetande industri), träfiberskivor, spånskivor och plywood. Ett avtal om forskning och utveckling mellan industrin och Styrelsen för Teknisk Utveckling (STU) utgör grunden för verksamheten som utförs med egna, samverkande och externa resurser. TräteknikCentrum har forskningsenheter, förutom i Stockholm, även i Jönköping och Skellefteå.

The Swedish Institute for Wood Technology Research serves the five branches of the industry: sawmills, manufacturing (joinery, wooden houses, furniture and other woodworking plants), fibre board, particle board and plywood. A research and development agreement between the industry and the Swedish National Board for Technical Development (STU) forms the basis for the Institute's activities. The Institute utilises its own resources as well as those of its collaborators and other outside bodies. Apart from Stockholm, research units are also located in Jönköping and Skellefteå.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	<u>Sid</u>
SAMMANFATTNING	3
INLEDNING	4
Termisk nedbrytning av trä	4
Flämskyddsmekanismer	6
Flam- och brandskyddsmedel	8
KOLUTBYTE - FÖRKOLNINGSHASTIGHET	9
Kolutbyte	9
Förkolningshastighet	14
Slutsatser - kolutbyte, förkolningshastighet	15
SKYDDSFÄRGER	16
Pelare	17
Väggkonstruktioner	18
Slutsatser - skyddsfärger	23
BRANDMOTSTÅND	24
Väggkonstruktioner	24
Bjälkar, pelare m m	25
Slutsatser - brandmotstånd	26
MEKANISKA EGENSKAPER	27
Organiska brandskyddsmedel	27
Små provkroppar	27
Stora provkroppar	28
Torktemperatur	29
Förhöjd temperatur	31
Långtidseffekter	33
Saltkoncentrationens inverkan	33
Översikter	33
Organiska brandskyddsmedel	35
Riktlinjer för träkonstruktioners bärförmåga	35
Slutsatser - mekaniska egenskaper	35
FÖRBAND	37
Korrosion	37
Bärförmåga	38
Slutsatser - förband	39
GENERELLA SLUTSATSER	40
SUMMARY	42
LITTERATUR	43

SAMMANFATTNING

Träs brännbarhet kan påverkas på kemisk väg med s k flamskydds- och brandskyddsmedel. Brandskyddsmedel ger skydd mot en fullt utvecklade brand och kan påverka egenskaper som förkolningshastighet, kolutbyte, brandmotstånd och mekaniska egenskaper. Detta har studerats i mindre omfattning än skydd mot inledande brand med s k flamskyddsmedel, men de tillsatsmedel som använts är av samma typ, d v s huvudsakligen oorganiska salter.

Brandskyddsmedel kan tillsättas genom impregnering eller som ett skyddande ytskikt, t ex en färg. Impregnering ger ett djupgående skydd som kan påverka förkolningsförloppet, men i vissa fall får man även sprödhet, försämrade hållfasthet och korrosion på metallförbindare. Brandmotståndet tycks påverkas i mindre utsträckning av de traditionella brandskyddsmedel som studerats. Kolutbytet ökar kraftigt redan vid små tillsatsmängder, ca 1 %. Normalt tillsätts 15-20 % brandskyddsmedel räknat på träets vikt.

Mest intressant är att förkolningshastigheten tycks minska med vissa brandskyddsmedel, men här finns få studier.

Skyddsfärger sväller upp vid brand och ökar därmed brandmotståndet.

Rapporten ger en aktuell översikt över brandskyddsmedels inverkan på träkonstruktioner varvid även behov och inriktning av fortsatta insatser behandlas.

Arbetet ingår i forskningsprogrammet "Träkonstruktioner och brand" som bekostas gemensamt av STU, BFR, Brandforsk och TräteknikCentrum.

INLEDNING

Träs brännbarhet kan påverkas på kemisk väg med s k flamskyddsmedel. Dessa påverkar egenskaper som antändningstid, flamspridning och rökutveckling. Flamskyddsmedel har betydelse främst för det tidiga brandförloppet, d v s för tiden fram till övertändning av t ex ett rum. En kunskapsöversikt har nyligen presenterats (Svensson och Ostman 1984, 192 ref.).

För den fullt utvecklade branden kan man istället tala om brandskyddsmedel. Betydelsen av dessa medel är mera okänd. Det gäller egenskaper som förkolningshastighet, mekaniska egenskaper och korrosivitet. Avsikten är att här ge en aktuell översikt över brandskyddsmedels inverkan på träkonstruktioners brandtekniska egenskaper. Behov och inriktning av fortsatta insatser skall också belysas.

Som introduktion ges först en kort summering av termisk nedbrytning, skyddsmekanismer och kemiska föreningar som ger någon form av brandskydd. Framställningen följer i stort Svenssons och Ostmans översikt, som innehåller fler referenser till litteraturen.

Termisk nedbrytning av trä

Den termiska nedbrytningen av trä har studerats relativt ingående (Johansson 1967, Shafizadeh 1984), men eftersom förloppen är komplicerade har flertalet grundläggande studier avsett nedbrytning i inert atmosfär, som är något enklare, men likväl ej fullständigt känd. Studierna har dessutom ofta avsett ren cellulosa, som utgör endast ca 40 % av totalinnehållet i trä. Ur brandsynpunkt är naturligtvis nedbrytningen av trä i luft mest intressant.

Trä består huvudsakligen av tre olika komponenter: cellulosa, hemicellulosa och lignin. Dessutom finns extraktivämnena. Vid beskrivning av träs nedbrytningsförlopp är det summan av dessa komponenters nedbrytning som är intressant. Andelen cellulosa och lignin är olika i olika träslag liksom halten av extraktivämnena, träets densitet m m, vilket gör att nedbrytningen kan variera. Nedbrytningen består av en mängd reaktioner som är beroende av faktorer som gasomsättning, syretillförsel till materialet, temperatur m m. Först avges obrännbara, sedan en blandning av brännbara och obrännbara gaser som om de blandas med luft kan antända spontant eller genom energitillförsel utifrån, t ex en flamma. Om mängden frigjord förbränningsvärme är tillräckligt stor och återförs till träet fortsätter nedbrytningen till brännbara gaser och därmed förbränningen.

Man skiljer mellan förbränning med flamma och förbränning i fasta fasen. Flamförbränning sker i gasfasen och emitterar strålning bl a i det synliga området.

Förbränning i den fasta fasen kan vara pyrande förbränning ("smouldering combustion") eller efterglödning. Pyrande förbränning förekommer i porösa brännbara material, t ex spånhögar, och innebär en långsam oxidation utan flamma som ofta begränsas av otillräcklig syretillförsel. Då syretillförseln ökar börjar ofta flamförbränning. Fenomenet är otillräckligt känt.

Efterglödningen börjar när avspaltningen av brännbara gaser har minskat så att syre kan komma i kontakt med ytan och innebär oxidation av bildat träkol till koldioxid, kolmonoxid och vatten. Träkol glöder vid temperaturer över 500 °C och halten kol i den fasta återstoden ökar medan syre- och vätehalten minskar. Reaktionerna sker på ytan eller i gasfasen nära ytan.

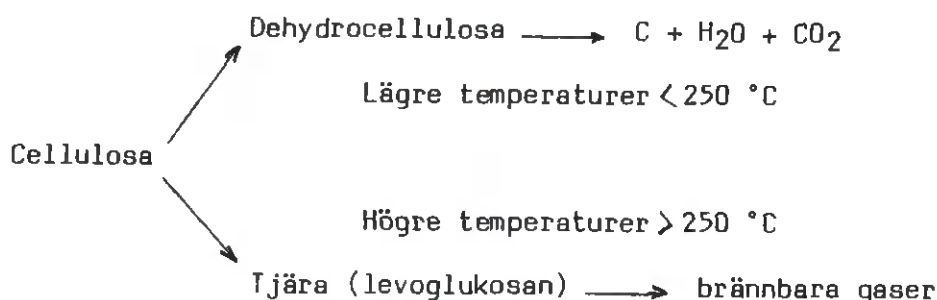
Mellan hälften och 2/3 av det vid förbränning frigjorda värmets härrör från flaman och resten från efterglödning.

Eftersom trä inte är ett enhetligt material kan man inte ange en undre temperaturgräns för när den termiska sönderdelningen börjar eller en bestämd antändningstemperatur. Men vet att redan under 100 °C sker reaktioner som efter lång tid kan leda till självantändning om reaktionsvärmets ej förs bort. De yttemperaturer som har uppmätts vid spontan antändning ligger mellan 270 och 450 °C.

Nedbrytningsförloppet för trä i luft kan delas in i ett antal temperaturzoner. I första zonen med en temperatur på maximalt 200 °C avspaltas gaser som ej kan antändas. I andra zonen med en temperatur av 200-280 °C är gaserna ej heller lättantändliga men reaktionerna är mer exoterma än i första zonen. I en tredje zon med temperaturen 280 till 500 °C sker en kraftig utveckling av brännbara gaser.

Den termiska stabiliteten varierar mellan träets olika komponenter. Hemicellulosa börjar ändra karaktär vid 200-260 °C, cellulosa vid 240-350 °C och lignin först vid 280-500 °C.

Nedbrytning av ren cellulosa är relativt välkänd. Cellulosa kan användas i de flesta studier av flamskyddsmekanismer för trä. Det första steget vid den termiska sönderdelningen av cellulosa är avspaltning av vatten och sedan kan nedbrytningen ske via två olika vägar:

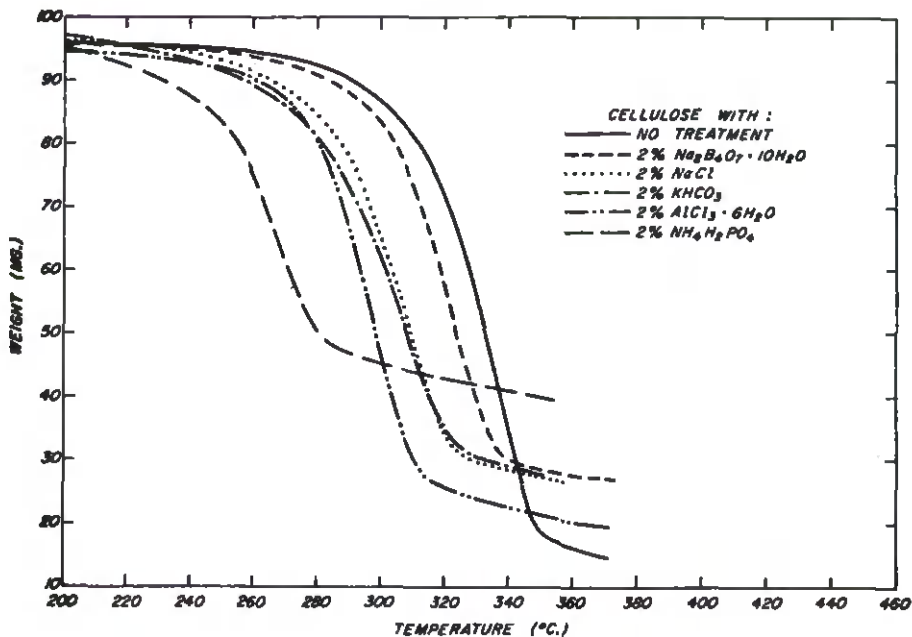


Den ena vägen är bildning av tjära som till stor del består av levoglukosan som sedan sönderfaller till brännbara flyktiga komponenter. Den andra vägen är bildning av kol och obrännbara gaser. Många flamskyddsmedel verkar genom att förhindra bildningen av levoglukosan och ger istället dehydratisering, tvärbinding m m så att det bildas kolhaltiga ämnen som inte sönderfaller.

Vid studier av pyrolys och nedbrytning av trä används huvudsakligen två metoder: termogravimetrisk analys (TG) och differentialtermisk analys (DTA). Vid TG mäts viktminskningen av ett prov under upphettning. Provet placeras på en känslig våg och exponeras i en ugn i en vald atmosfär. Viktförlusten mäts som funktion av tid och temperatur. DTA mäter den mängd värme som fri-

görs eller absorberas då kemiska reaktioner förekommer i ett material eller då en fasomvandling sker. DTA anger också vid vilken temperatur dessa exoterma eller endoterma reaktioner sker.

Termogravimetrisk analys av cellulosa behandlad med olika tillsatser visas i figur 1 (Tang 1967). Med undantag av borax framgår det att ju mer effektivt ett salt fungerar som brandskyddsmedel, desto lägre blir temperaturen för aktiv pyrolys och desto mer kol bildas.



Figur 1. Termogravimetrisk analys av cellulosa behandlad med olika tillsatser (Tang 1967).

Flamskyddsmekanismer

Flamskyddsmekanismerna avser främst brandens tidiga skede, men har troligen en viss betydelse även för senare delar. De bygger i allmänhet inte på teoretiska studier, därtill är förhållandena alltför komplicerade, utan kan snarare ses som kvalificerade spekulationer.

Det finns flera typer av flamskyddsmekanismer och olika flamskyddsmedel verkar på olika sätt. De kan verka i flammen eller i den fasta fasen. Olika delar av nedbrytningsreaktionerna kan påverkas, t ex antändning, flamförbränning, efterglödning, rökutveckling. Mekanismerna kan vara fysikaliska och kemiska eller en kombination av dessa båda (Johansson 1967, Lyons 1970, LeVan 1984).

De vanligaste fysikaliska mekanismerna är:

Skyddsskiktsteorin som går ut på att förhindra utveckling av flyktiga pyrolyspanprodukter från materialet och att hindra lufttillförsel (syre) till materialet. Skiktet kan bestå av kemikalier som vid upphettning smälter och ger ett glasliknande skyddsskikt. Flamskyddsfärger verkar på detta sätt. Man tror att också en blandning av borax och borsyra till del verkar på samma sätt.

Termiska teorier kan delas upp i tre olika delar:

1. Ökad värmeisolering av t ex ett isolerande ytskikt så att temperaturen hos underliggande trä hålls nere. Det trækollager som bildas på ytan har en sådan funktion. Tillsats av vissa salter som frigör starka syror vid pyrolystemperaturen ökar trækollagrets tjocklek och därmed den isolerande förmågan.
2. Ökad värmebortledning så att reaktionsvärmets leds bort innan antändning sker. Några medel som verkar på detta vis är dock ej kända.
3. Ökad värmeupptagning så att antändningstemperaturen ej uppnås eller fördröjs. Medel som innehåller stora mängder kristallvatten som tar upp energi vid förångning, t ex borax, verkar på detta sätt.

Flamskyddseffekten enligt de termiska teorierna anses dock ej vara tillräcklig men kan ge additiva effekter till andra mekanismer.

Mineraliseringsteorin. Pyrolys av material som impregnerats med oorganiska salter ger ofta en svårsmält aska som "mineraliserar" fibrerna. Denna teori kan förklara det flamskydd som erhålls med de flesta oorganiska salter om bara mängderna som tillsätts är tillräckligt stora.

Gasteorin. De brännbara gaserna späds ut med icke brännbara gaser, t ex vatten eller ammoniak, som avges.

De kemiska mekanismerna är:

I fasta fasen ändras nedbrytningsvägen så att mer kolhaltiga och mindre brännbara produkter bildas. Bl a Lewis syror, d v s en kemisk förening som kan binda till en annan förening med ett odelat elektronpar, verkar på detta sätt. Vanligast är fosforsyra eller salter av fosforsyra som fungerar genom att fosforylera cellulosan på kolatom 6 och därmed hindra levoglukosanbildningen. Tillsats av medel som verkar på detta sätt medför att temperaturen för nedbrytningen sänks.

I flamman inhiberas radikalreaktioner som vid förbränning orsakar flammorna. Halogener är kända flaminhibitorer som verkar som radikalångare. Dessa verkar endast i flammen och ger inget skydd mot efterglödning. En del sådana ämnen kan t o m öka rökutvecklingen, vilket är ogynnsamt.

Vid efterglödning är flamskyddsmekanismen ej klarlagd. Vissa medel som är effektiva mot efterglödning ökar bildningen av kolmonoxid så att bildningen av koldioxid minskar. Detta är fördelaktigt eftersom det frigörs mindre mängd värme vid bildning av kolmonoxid. Mono- och diammoniumfosfat, fosforsyra och borsyra är exempel på ämnen som är effektiva mot efterglödning. Vissa medel som förhindrar nedbrytningen i den fasta fasen har ingen effekt på efterglödningen, som t o m ökar vid tillsats av t ex natriumtetraborat och borax.

Ofta används kombinationer av medel som verkar på olika sätt för att få bättre effekter, t ex en blandning av borax och borsyra som då ger både flamm- och glödskydd. Med vissa kombinationer kan man få s k synergistisk effekt, d v s totala effekten är större än summan av de enskilda medlens effekt.

Flam- och brandskyddsmedel

Terminologin inom området är oklar. Benämningarna flam-, brand- och eldskyddsmedel används utan större åtskillnad. I denna rapport har valts att genomgående använda "brandskyddsmedel" för skydd mot fullt utvecklad brand. "Flamskyddsmedel" reserveras för medel som påverkar det tidiga brandförloppet. "Eldskyddsmedel" är olämpligt eftersom "eld" associerar till avsiktlig värmeproduktion (TNC 75). De engelska termerna är "flame retardant", "fire retardant" och "fire resistant".

Flamskyddsmedel för det tidiga brandförloppet har studerats intensivt för såväl trä som plaster och textilier. Flertalet studier är dock av fenomenologisk natur och ger ingen möjlighet till djupare förståelse. De är också ofta bristfälligt redovisade, t ex i form av patent. De vanligaste flamskyddsmedlen består av oorganiska salter och syror, t ex fosfater, bor- och kväveföreningar, halogenider och silikater, som i allmänhet är vattenlösliga. Dessutom finns organiska föreningar, ofta av hartstyp som kan polymerisera i träet och bli olösliga i vatten. Alla dessa medel ger ofta ett bra flamskydd, d v s skydd mot antändning, flamspridning m m. Problemet är att samtidigt bibehålla övriga goda egenskaper hos trä. De egenskaper som kan påverkas negativt är fuktupptagning, mål- och limbarhet, utseende och färg. Det behövs också stora tillsatsmängder, 10-20 viktprocent, för att uppnå tillräckligt flamskydd, vilket bidrar till att övriga egenskaper påverkas. Salterna är vattenlösliga och hygroskopiska och har därför en tendens till att migrera vid varierande luftfuktighet. Det flamskyddade träet kan därför inte användas utomhus eller vid varierande klimat.

Nyare flamskyddsmedel av polymertyp har delvis löst dessa problem med oorganiska salter. Men i stället har man fått andra nackdelar. Den främsta är att det krävs en relativt hög uthärdningstemperatur, 100-120 °C, vilket p g a kådflytning är olämpligt för nordisk furu och gran. Medlen är dessutom förhållandevis dyra.

Brandskyddsmedel för skydd under brandens senare skede har studerats i betydligt mindre utsträckning. Samma kemiska föreningar, d v s främst oorganiska salter, som för flamskydd har studerats. Men andra egenskaper är av intresse, främst mekaniska egenskaper och förkolningshastighet.

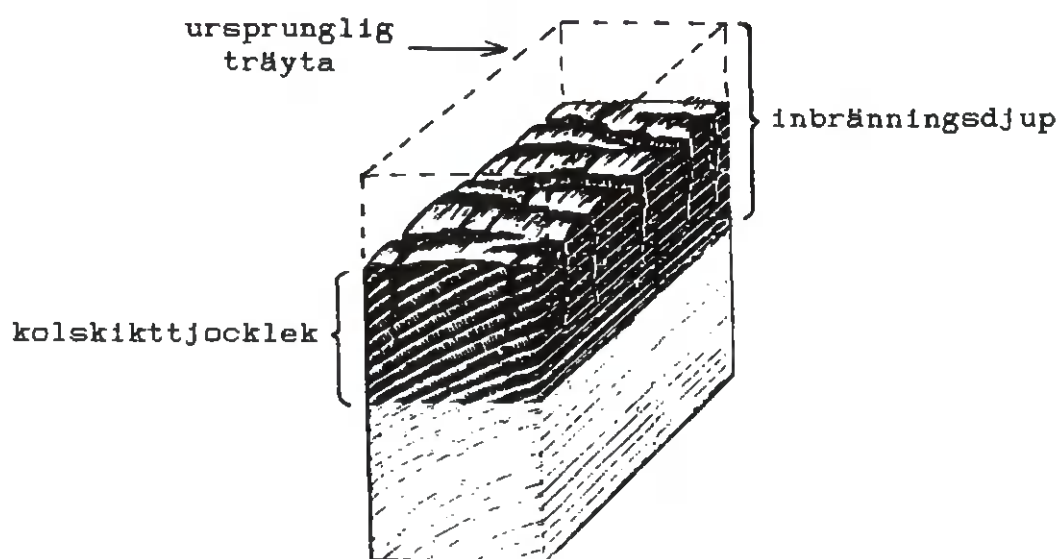
Både flam- och brandskyddsmedel kan tillsättas genom impregnering in i träet (genom vakuum och/eller tryck) eller som ett skyddande ytskikt, vanligen en färg.

Impregnering ger ett djupgående skydd och träets nedbrytningsförlopp påverkas. Mekaniska egenskaper och förkolningshastighet kan förändras som följd härav. Impregneringsmedlen måste vara lösliga i vatten (eller något annat lösningsmedel). Problem med saltvandring o dyl kan vara mindre än för flamskydd, där ytornas utseende och egenskaper är viktiga. Men hänsyn måste tas till att vissa träslag, t ex gran, och vissa delar, t ex kärnved hos furu, kan vara svåra att impregnera.

Skyddsfärger ger ytskydd och värmeisolerar träet. Nedbrytningsförloppet och de mekaniska egenskaperna hos trä påverkas inte. Färgerna innehåller i stort sett samma typ av brandskyddande komponenter som impregneringsmedlen. De innehåller dessutom svårösliga substanser, pigment o dyl.

KOLUTBYTE - FÖRKOLNINGSFASTIGHET

Effekten av olika brandskyddsmedel på pyrolysförloppet har nyligen sammanfattats av LeVan (1984, 131 ref.). Vissa brandskyddsmedel verkar genom att ändra nedbrytningen i den fasta fasen så att mer kolhaltiga och mindre brännbara produkter bildas. Man talar då om att kolutbytet (eng. char yield) ökar. Ökat kolutbyte betyder att mängden kvarvarande kol ökar i förhållande till ursprunglig mängd trä, t ex genom ökad kolskiktjocklek. Däremot finns det ganska lite rapporterat om hur brandskyddsmedel påverkar förkolningshastigheten, d v s kolskiktets inbränningsdjup per tidsenhet (eng. charring rate).



Kolutbyte och förkolningshastighet är två olika parametrar som kan påverkas på olika sätt av t ex brandskyddsmedel. Sambanden har inte klarlagts i någon studie. Nedan redovisas var för sig de arbeten som finns publicerade. Samtliga hänför sig till impregnerat trä.

Kolutbyte

I en studie av åtta oorganiska salters inverkan på pyrolysisprodukterna har Brenden (1965) behandlat hyvelspån av Ponderosa pine med tre olika koncentrationer av respektive saltlösning: 1, 5 och 15 %, se tabell 1. Hyvelspånens upptagningsförmåga varierar mellan de olika kemikalierna. Brenden har därför definierat "treatment level" som viktskillnaden före och efter behandlingen vid fuktjämvikt i 27 °C, 30 % RF. (För hygroskopiska salter kan viss mängd vatten inkluderas i "treatment level", men det kan betraktas som försumbart åtminstone vid de lägre koncentrationerna.) Pyrolysen utfördes vid 350 °C i vakuum eftersom reaktionsförloppet i luft är mycket komplicerat. Effekterna kan förväntas vara likartade i båda fallen.

Tabell 1. Huvudsakliga produkter vid pyrolysis i vakuum, 350 °C, av Ponderosa pine hyvelspån behandlade med olika oorganiska salter (Brenden 1965).

Salt	Composition Pct.	Treatment level Pct.	Products, ^{1,2}			
			Char Pct.	Tar Pct.	Water Pct.	Gas Pct.
Na ₂ B ₄ O ₇	15	24.12	43.06	14.90	31.92	10.11
	5	4.28	48.39	11.75	30.42	9.43
	1	[3]	44.13	20.39	29.33	6.15
CaCl ₂	15	54.75	56.52	14.35	3.57	25.55
	5	23.55	46.03	22.23	20.38	11.36
	1	4.21	28.77	38.68	23.60	8.95
(NH ₄) ₂ HPO ₄	15	24.13	45.14	14.30	37.53	3.02
	5	6.69	45.49	16.76	32.01	5.73
	1	.51	33.85	35.21	25.07	5.67
NH ₄ Cl	15	26.31	29.84	35.16	27.00	8.00
	5	7.95	29.78	33.83	24.43	11.95
	1	4.23	27.33	43.17	23.63	5.87
NaCl	15	27.79	26.20	35.21	24.53	14.06
	5	10.34	25.91	35.69	25.18	13.21
	1	4.55	26.77	34.94	29.99	8.31
KBr	15	32.85	29.12	27.84	32.09	10.94
	5	17.06	28.10	29.72	31.97	10.21
	1	2.99	27.26	30.17	30.06	12.51
Na ₂ PO ₄	15	28.78	42.89	14.92	24.49	17.70
	5	9.41	40.24	15.82	30.72	13.22
	1	[3]	36.55	21.20	31.41	10.85
K ₂ CO ₃	15	30.49	43.46	5.59	32.07	18.87
	5	5.54	44.43	9.51	31.82	14.23
	1	1.03	41.13	13.54	30.32	14.99
Untreated wood (water extracted)	—	—	19.83	54.90	20.87	4.41

¹ Each value is the mean for 3 determinations.

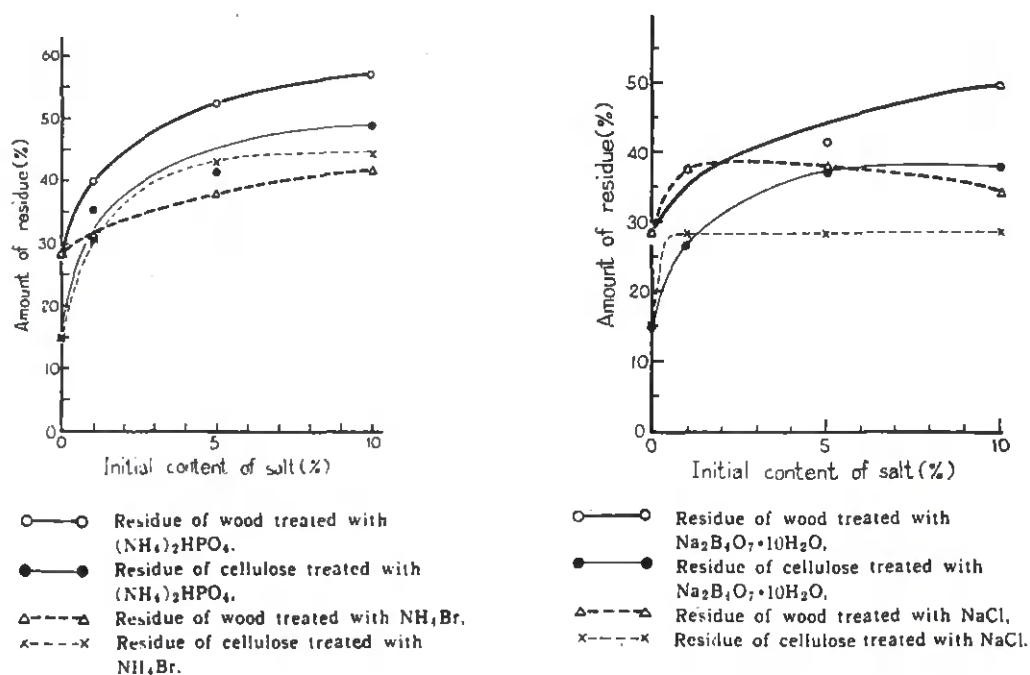
² The proportion of products in each fraction is given on a salt-free weight basis.

³ Less than can accurately be determined from gain in weight of specimens.

Av tabell 1 framgår att kända brandskyddsmedel som diammoniumfosfat och borax ökar kolutbytet till omkring det dubbla även vid den lägsta saltkoncentrationen, där upptagen mängd är mindre än 1 %.

Även Ohuchi et al (1972) har funnit att relativt låga koncentrationer av brandskyddande salter ger ett markant ökat kolutbyte.

Hirata och Abe (1974) har studerat hur diammoniumfosfat, ammoniumbromid, natriumtetraborat och natriumklorid påverkar pyrolysen av trä (pulveriserad japansk ceder) och cellulosa i vakuum med hjälp av TG och DTA. De har då funnit ett förhållande mellan kolutbytet och saltkoncentrationen för de olika salterna som framgår ur figur 2.



Figur 2. Kolutbytet som funktion av saltinnehållet vid pyrolysis i vakuum 400 °C (Hirata och Abe 1974).

Kända effektiva brandskyddssalter som diammoniumfosfat och borax ger höga kolutbyten som börjar plana ut vid ca 5 % saltinnehåll medan ammoniumbromid, som verkar i gasfasen, ger ett betydligt lägre kolutbyte för trä. Intressant är att samtliga salter inklusive natriumklorid tycks ge relativt höga kolutbyten för behandlad cellulosa redan vid låga koncentrationer, mindre än 1 %. Emellertid är resultatunderlaget i figur 2 alltför knapphändigt för att dra några säkra slutsatser. Hirata och Abe har visat att tillväxten av kolutbytet kan uttryckas som en exponentialfunktion av saltkoncentrationen. Tyvärr är de ingående storheterna inte entydigt definierade. De har även funnit att ökningen av kolutbytet för behandlat träpulver har sitt huvudsakliga ursprung i cellulosan. Med ökad saltkoncentration ökar dock bidraget till kolutbytet från andra föreningar än cellulosa.

Holm (1965) redovisade provningar utförda enligt den amerikanska Fire Tube-metoden (ASTM 69-50), enligt vilka viktminskningen för brandskyddsbehandlade provbitar av furu generellt var betydligt lägre än för obehandlade. Provbitarna hade behandlats med 10-20-procentiga lösningar av diammoniumfosfat och Pyrolith. Detta tyder på att kolutbytet blev större för behandlade prover.

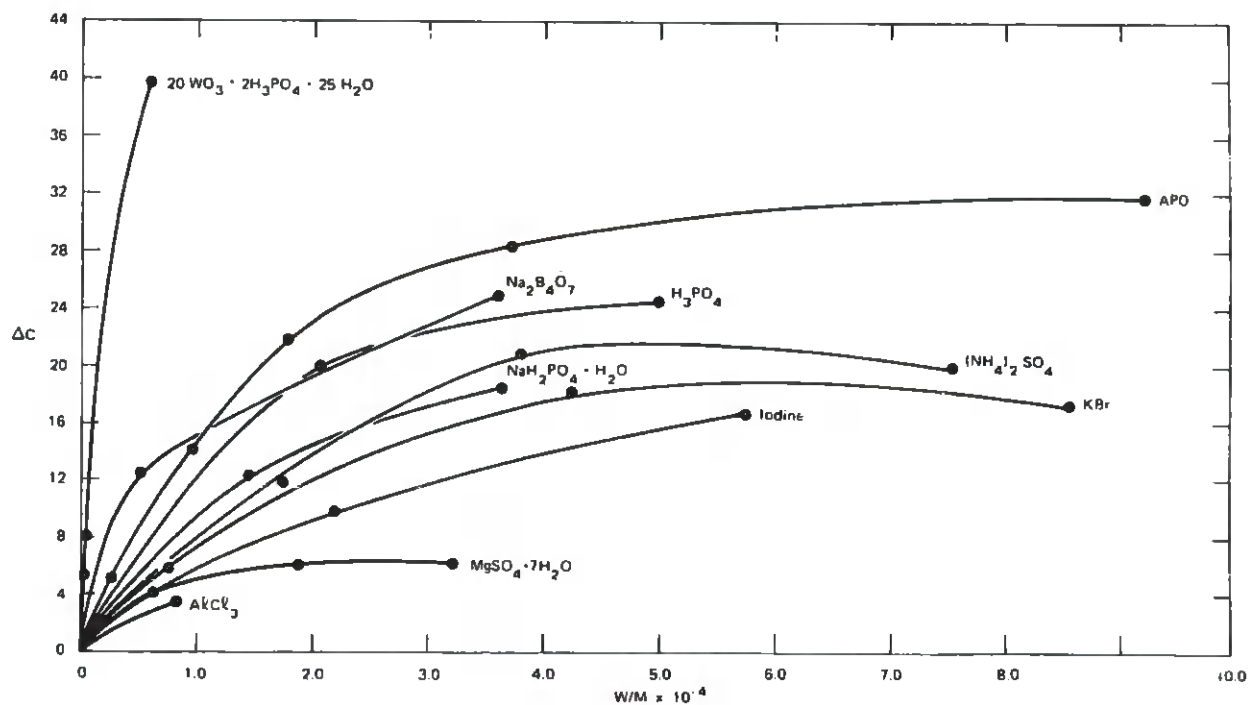
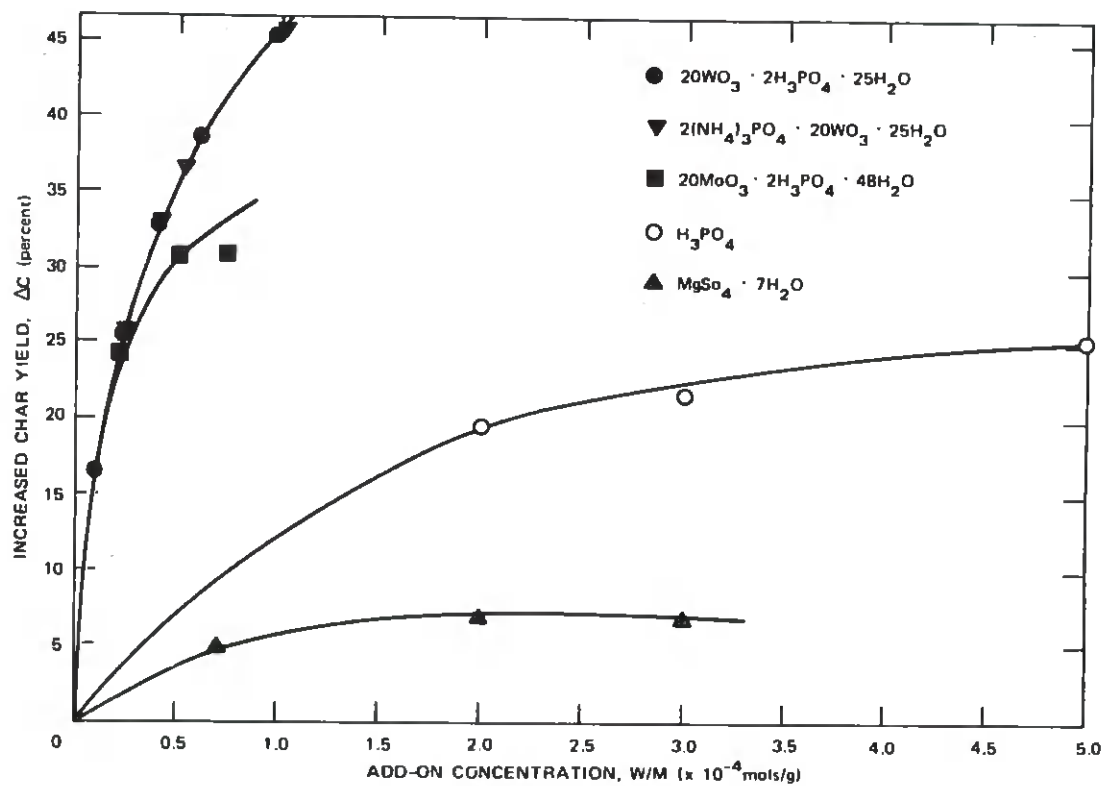
Lipska (1971 och 1972) har som en del av ett större arbete studerat hur tillsats av olika mängder oorganiska salter påverkar kolutbytet hos alfa-cellulosa under kvävgas. Tunna cellulosaaskivor (0,75 x 15 x 15 mm) lades i saltlösningar med olika koncentrationer. Proverna täcktes med aluminiumfolie och pyrolyserades sedan i en ugn vid 600 °C. Resultaten visar att det initialt sker en ökning av kolutbytet som är direkt proportionell mot saltkoncentrationen, men ganska snabbt sker en utplaning. Gränsen ligger för de flesta studerade salterna vid omkring $1 \cdot 10^{-4}$ mol salt/g cellulosa, se figur 3. Intressant är att föreningar med hög molekylvikt, och särskilt de med högt syrenehåll, producerar mycket större kolutbyten vid små tillsatser än övriga föreningar. Således kan gränsen för optimalt kolutbyte för molybdenfosforsyra och wolframfosforsyra uppskattas till mellan $0,5 \cdot 10^{-4}$ och $1 \cdot 10^{-4}$ mol/g cellulosa mot $1 \cdot 10^{-4}$ och $5 \cdot 10^{-4}$ mol/g cellulosa för föreningar med lägre molekylvikt. Men uttrycks saltkoncentrationen istället som g salt/g cellulosa erfordras för ett visst kolutbyte större mängd av de högmolekylära föreningarna jämfört med andra brandskyddsmedel, t ex fosforsyra. Ur figur 3 fås att 7,5 % ökat kolutbyte motsvaras av 0,005 g fosforsyra/g cellulosa, 0,014 g molybdenfosforsyra/g cellulosa och 0,019 g wolframfosforsyra/g cellulosa. De högmolekylära föreningarna är således inte så effektiva räknat på viktbasis.

Parker och Lipska (1969) har gjort en teoretisk modell där kolutbytet är direkt proportionellt mot saltkoncentrationen. I en modifierad form (Amaro och Lipska, 1973) kan den uttryckas som

$$\Delta C = k \cdot \frac{W}{M} \cdot H \%$$

där ΔC = kolutbyte
 k = konstant
 M = saltets molekylvikt
 W = vikt tillsatt salt i förhållande till provvikten
 H = vätebindningspotential hos saltmolekylen

Denna modell överensstämmer i de flesta fall väl med de experimentella resultaten för den initiala fasen i figur 3. Syrerika salter, som alltså har hög vätebindningspotential, ger ett högt kolutbyte. Däremot beskriver inte modellen den utplaning som sker vid högre koncentrationer.



Figur 3. Kolutbytet vid olika brandskyddsmedelskoncentrationer uttryckt som mol salt/g cellulos. (Vissa kurvor förekommer i båda diagrammen.) (Lipska 1971 och 1972.)

Förkolningshastighet

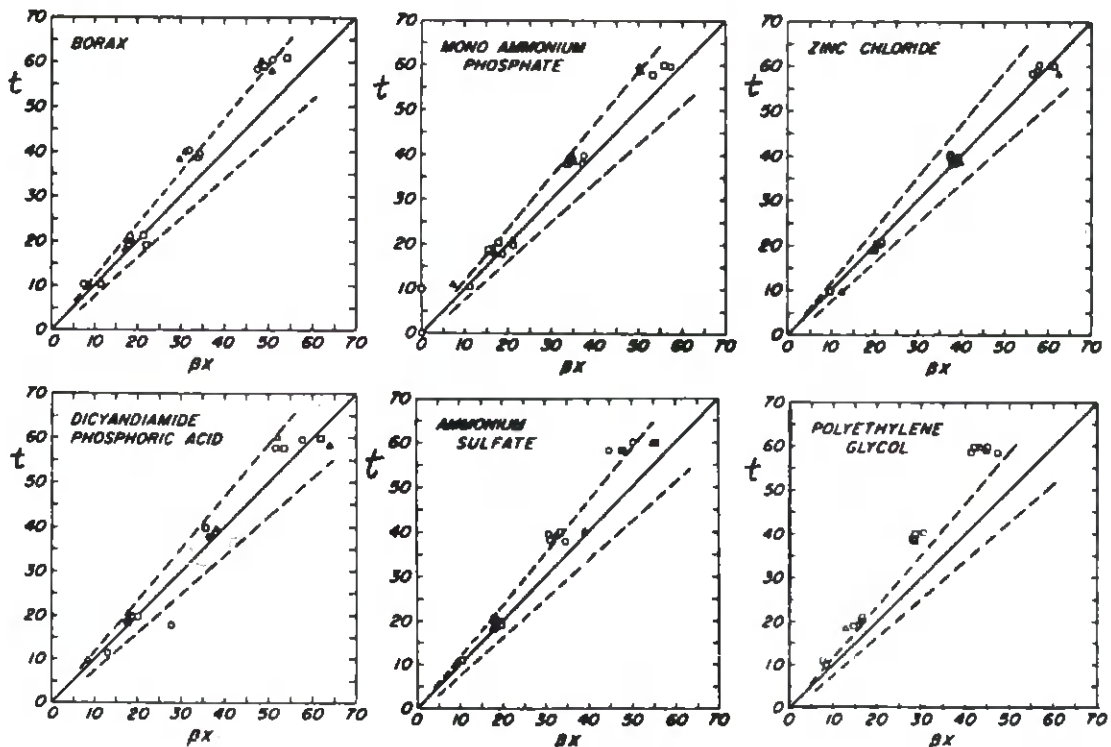
Schaffer (1967) har i en ingående studie av obehandlad Southern pine funnit att förkolningshastigheten var konstant, d v s inbränningsdjupet var direkt proportionellt mot exponeringstiden. Detta kan skrivas:

$$t = B \cdot x$$

där t = brandexponeringstid (min)
 x = inbränningsdjup från initialt exponerad yta (in.)
 $B = 2((5,832 + 0,12M)G + 12,862)$

M är % fukttinnehåll och G specifika torrvikten. Av ovanstående formel framgår att fukttinnehållet påverkar förkolningshastigheten ganska lite.

För att jämföra förkolningshastigheten mellan obehandlat och brandskyddsbehandlat trä har Schaffer (1974) därefter impregnerat Southern pine med 12 kemikalier varav de flesta var vanliga brandskyddsmedel. Upptagningen var 15 % av träets torrsvikt. Provbitarna (90 mm tjocka) exponerades i en vertikalugn och inbränningsdjupet mättes efter olika tider. Den experimentellt erhållna tiden för ett visst inbränningsdjup jämfördes sedan med den beräknade tiden för behandlat trä enligt formeln ovan. Några exempel visas i figur 4.



Figur 4. Uppmätt tid, t , till ett visst inbränningsdjup för behandlade prover som funktion av beräknad tid, Bx , för obehandlade prover. Den heldragna linjen anger att beräknad och uppmätt tid är lika för obehandlat trä. De streckade linjerna markerar spridningsfältet för mätningar på obehandlat trä (Schaffer 1974).

Resultaten visade följande:

- Ingen av de undersökta kemikalierna ökade förkolningshastigheten.
- Polyetylenglykol minskade förkolningshastigheten med ca 25 %.
- Följande föreningar minskade förkolningshastigheten med ca 20 %: Borsyra, borax, ammoniumsulfat, natriumdivätefosfat, kaliumkarbonat samt natriumhydroxid.
- Följande föreningar påverkade ej förkolningshastigheten jämfört med obehandlat trä: THPC (tetrakis-(hydroxymetyl)-fosfoniumklorid:urea), dicyandiamid:fosforsyra, monoammoniumfosfat, zinkklorid samt natriumklorid.

Något överraskande medförde impregnering med ammoniumfosfat alltså inte någon minskning av förkolningshastigheten. Orsakerna till dessa resultat är inte kända.

Holm (1965) anger att förkolningshastigheten för brandskyddsbehandlad furu i stället ökade med ca 15 %. Det är dock oklart vilka brandskyddsmedel som använts och vilka försöksbetingelserna var.

Slutsatser - kolutbyte, förkolningshastighet

Kolutbyte, d v s mängd kvarvarande kol, och förkolningshastighet är två olika storheter som inte nödvändigtvis behöver ändras samtidigt eller på samma sätt. Kolutbytet kan t ex öka utan att förkolningshastigheten ändras. Förkolningshastigheten kan i princip minska samtidigt som kolutbytet ökar. Men sambanden mellan kolutbyte och förkolningshastighet finns inte klarlagda i någon studie.

Brandskyddsmedel ökar kolutbytet vid pyrolys av trä. Effektiva brandskyddssalter som ammoniumfosfater och borax, och även normalt sett mindre effektiva salter, ger höga kolutbyten redan vid låga koncentrationer i träet (ca 1 % av träets vikt). Över en viss koncentration av brandskyddsmedel ökar kolutbytet i mycket mindre omfattning och planar ut. För flertalet brandskyddsmedel ligger denna gräns vid omkring 5 %.

Ett modellarbete beskriver att kolutbytet som funktion av koncentrationen brandskyddsmedel initialt ökar proportionellt mot vätebindningspotentialen.

Förkolningshastigheten hos brandskyddsimpregnerat trä kan minska med mellan 0 och 25 % beroende på vilket medel som använts, men här finns i stort sett endast en studie. Störst effekt erhöles med polyetylenglykol som inte är känt som brandskyddsmedel. Nyare brandskyddsmedel av t ex organisk typ ingår inte.

SKYDDSFÄRGER

Det finns flera typer av ytbehandlingar som kan användas i brandskyddande syfte. Terminologin inom detta område är oklar men i detta sammanhang avses med skyddsfärg en produkt för ytbehandling som ger någon form av brandskydd.

Man skiljer i allmänhet mellan två huvudtyper av skyddsfärger: färger av svällande typ och färger av icke svällande typ. En annan uppdelning är i flamskyddande och brandskyddande färger. Dessa båda huvudtyper kan i och för sig vara samma färg, men de avser skydd i olika faser av en brand. Flamskyddsfärger är avsedda för det inledande skedet av en brand för att främst minska antändlighet och flamspridning. Brandskyddsfärger är avsedda för en fullt utvecklad brand och läggs på i större mängd. De flesta brandskyddsfärger är avsedda för material som stål och skumplaster och är alltså inte speciellt utvecklade för trämaterial.

De effektivaste färgerna är av svällande typ. De utvecklar vid upphettning inerta gaser som tillsammans med andra ingående komponenter bildar ett isolerande skum på ytan. Svällande färger består i allmänhet av tre huvudkomponenter: a) en kolhaltig förening, ofta en kolhydrat, b) en organisk kväveförening, amin eller amid, som bildar de gaser som blåser upp skummet och c) ett fosfatsalt så att fosforsyra kan bildas. När färgen först utsätts för värme bildas en fosfater av fosforsyra och den kolhaltiga föreningen. Denna ester sönderfaller sen vid en lägre temperatur än vad den kolhaltiga föreningen skulle ha gjort. Därvid bildas ett kolskikt som frigjorda inerta gaser blåser upp till ett isolerande skum. Detta skum kan vara 50 gånger tjockare än det ursprungliga färglagret. Skummet fungerar som en termisk barriär men hindrar även de gaser som frigörs vid nedbrytningen av trä att passera ut och antändas. Som exempel på ett speciellt användningsområde kan nämnas dörrkarmar, där svällande färger täpper igen springorna mellan dörr och karm och därmed förhindrar brandgenomträngning.

Skyddsfärger av icke svällande typ innehåller ett aktivt pigment och är ofta baserade på antimontrioxid tillsammans med någon halogenförening. Därvid bildas en antimonoxidhalid som man tror verkar som flaminhibitor genom radikalreaktioner i gasfasen.

Gemensamt för flertalet skyddsfärger är att de är pigmenterade. Träytan täcks, vilket ur estetisk synvinkel kan vara en nackdel. De fåtal brandskyddande klarlacker som finns har ofta dåliga lackegenskaper i övrigt. Skyddsfärger har ofta låg mekanisk hållfasthet. De kan därför skadas, vilket kan påverka brandskyddet. Deras brandskyddande effekt kan också reduceras, t ex genom övermålning med andra färger. För brandskydd med skyddsfärger gäller generellt att relativt stora påläggningsmängder krävs.

För att få större brandskyddande effekt kan svällande och icke svällande färger även användas tillsammans. Den svällande färgen får då inte täckas med mer än två lager av den icke svällande färgen för att inte förlora sin svällande effekt (Mearns 1986).

Det finns ett stort antal skyddsfärger på marknaden. De som typgodkänts i Sverige förtecknas i Godkännandelista B (Statens planverk). Liknande förteckningar finns för England (TRADA) och Västtyskland (Kordina). Flertalet är flamskyddsfärger, d v s de ger skydd i brandens tidiga skede.

Några studier av brandskyddsfärger på träkonstruktioner för skydd vid fullt utvecklad brand redovisas nedan.

Pelare

Skyddsfärger bidrog mer än förväntat till brandmotståndet då träpelare belastades enligt tester utförda vid Centre Technique du Bois (1970). Två serier pelare provades i en ugn varvid samtliga sidor exponerades för brand. En serie pelare (140 x 90 x 750 mm) provades under 30 minuter och en annan serie (150 x 100 x 750 mm) under 60 minuter. Varje serie bestod av två pelare täckta med samma färg av svällande typ för trä men med olika ytvikter (516 respektive 1.062 g/m²), en pelare täckt med en svällande färg för metall samt en obehandlad pelare. Pelarna hållfasthetstestades före och efter brandprovning. Resultaten visade att pelarna täckta med skyddsfärg klarade 30-minutersprovningen men inte 60-minutersprovningen medan de obehandlade inte klarade någon av de två testerna. Pelaren täckt med skyddsfärgen för metall hade den största bärförmågan. Skillnaden i bärförmåga på de olika ytvikterna av skyddsfärg för trä var ganska liten. Förkolningsprocessen fördröjdes markant av de svällande färgerna. Inbränningsdjupet på pelaren täckt med metallfärg var efter 30 minuter 3 mm mot 14 mm för obehandlad pelare. Under andra hälften av 60-minutersprovningen ökade förkolningshastigheten sedan allt vatten förångats. Motsvarande inbränningsdjup efter 60 minuter var 22 respektive 45 mm.

Provningar på träpelare av furu (160 x 160 x 1600 mm) utförda på Statens provningsanstalt för B Vilhelm Byggprodukter AB (1977) visade att en svällande skyddsfärg hade en gynnsam effekt på inbränningsdjupet. Två pelare beströks med Brennicks 1503 (500 respektive 750 g/m²). Brandprovning utfördes i ugn under 30 minuter för den mindre färgmängden och under 60 minuter för den större. Vid provning av obehandlad träpelare blev inbränningsdjupet ca 20 mm efter 30 minuter och 40 mm efter 60 minuter. För pelarna täckta med färg blev inbränningsdjupet 11 mm vid färgmängden 500 g/m² efter 30 minuter och 27 mm vid färgmängden 750 g/m² efter 60 minuter.

Väggkonstruktioner

Eickner (1975) har bestämt brandmotståndet för två sandwichelement täckta med olika skyddsfärger. Provningarna utfördes under belastning. Brandmotståndet för det ena elementet, som bestod av 76 mm polyuretanskum mellan två 6 mm tjocka plywoodskivor, ökade från 3 minuter för ett obehandlat element till 8 minuter för ett element som hade bestruktits med 2,4 mm av en vattenbaserad, asbestfri skyddsfärg. För ett annat sandwichelement, uppbyggt av 72 mm isocyanuratskum mellan 6 mm plywoodskivor, ökade brandmotståndet från 3 minuter för obehandlat element till 25 minuter då ett 4,8 mm lager av en vinylbaserad svällande skyddsfärg hade sprayats på. I båda fallen var belastningskravet avgörande för brandmotståndet.

Fenner (1960) refererar till en provning utförd vid Fire Research Station (FRS) i England där en icke belastad regelvägg beklädd med 12,7 mm porös fiberskiva hade behandlats med en svällande brandskyddsfärg. För denna vägg uppnåddes ett brandmotstånd på 28 min medan det uppskattade brandmotståndet för en likadan obehandlad konstruktion var 15-20 min.

White (1984) har gjort en grundläggande studie av hur olika färger påverkar brandmotståndet för skivmaterial. De färger som har använts finns beskrivna i tabell 2. Av de åtta testade färgerna var fyra av flamskyddstyp, A-D, och fyra av brandskyddstyp, E-H. Brandskyddsfärgerna har ursprungligen framställts för andra material än trä.

Tabell 2. Flamskydds- och brandskyddsfärger som provats på plywood (White 1984).

Designation	Coating
FIRE RETARDANT COATINGS	
A	flat, latex emulsion, intumescent coating, applied at Forest Products Laboratory
B	high build, two-component, catalytic, epoxy, intumescent coating, applied at Forest Products Laboratory
C	catalytic polyurethane intumescent varnish over one coat of a clear single-component sealer, applied at Forest Products Laboratory
D	flat, alkyd, intumescent coating, applied at Forest Products Laboratory
FIRE RESISTANT COATINGS	
E	water-based, single-component asbestos-free flexible mastic coating, troweled on at Forest Products Laboratory
F	sprayable, ablative, catalyst-cured coating using a polymer binder and containing no free water, sprayed on by manufacturer
G	mineral fiber and binder, sprayed on by manufacturer
H	ablative, epoxy, room temperature curing, two-component intumescent mastic coating approved for exterior use, sprayed on by manufacturer
NC	no coating

Plywoodskivor, 508 x 508 mm, av olika tjocklek provades i en vertikalugn i modellskala. Resultatet av provningarna, som skedde utan belastning, visas i tabell 3 och 4. Det framgår klart att brandskyddsfärger generellt åstadkommer större brandmotstånd än flamskyddsfärger. Det ökade brandmotståndet för 16 mm plywood täckt med flamskyddsfärger varierade mellan 18 och 137 % och för brandskyddsfärger mellan 37 och 394 % beroende på sort och antal lager av färg.

Tabell 3. Brandmotstånd för plywood med flämskyddsfärger (White 1984).

Coating Designation	Number of Tests	Number of Coats	Dry Coating Thickness, mm	Dry Coating Weight, g/m ²	Time to 139/181°C ^a		
					Total		
					Mean, s	COV ^b , %	Improvement ^c , s
6-MM (¼-IN.) PLYWOOD							
NC	3	0	0.0	0	210	7	0
A	3	5	0.5	720	350	3	150
D	1	1	0.1	130	360	...	140
D	1	2	0.2	300	390	...	180
D	1	3	0.3	460	470	...	260
D	1	4	0.4	600	450	...	230
D	1	5	0.5	760	480	...	290
16-MM (½-IN.) PLYWOOD							
NC	6	0	0.0	0	670	2	0
A	3	1	0.1	140	820	1	160
A	3	5	0.5	670	1040	6	370
B	3	1	0.1	260	780	1	120
B	3	5	0.5	920	1160	4	500
C	3	8	0.6	910	1260	1	590
D	3	5	0.5	920	1580	3	920
19-MM (¾-IN.) PLYWOOD							
NC	3	0	0.0	0	870	2	0
A	2	1	0.1	120	990	9	120
A	3	5	0.5	670	1270	3	400
D	2	1	0.1	190	1310	2	440

^aTime for unexposed surface of plywood to reach average of 139°C (250°F) or maximum of 181°C (325°F) above initial temperature.

^bCoefficient of variation.

^cImprovement over the time for uncoated plywood. Calculations are based on the individual test results; this may not be the same as the difference in average times.

Tabell 4. Brandmotstånd för plywood med brandskyddsfärger (White 1984).

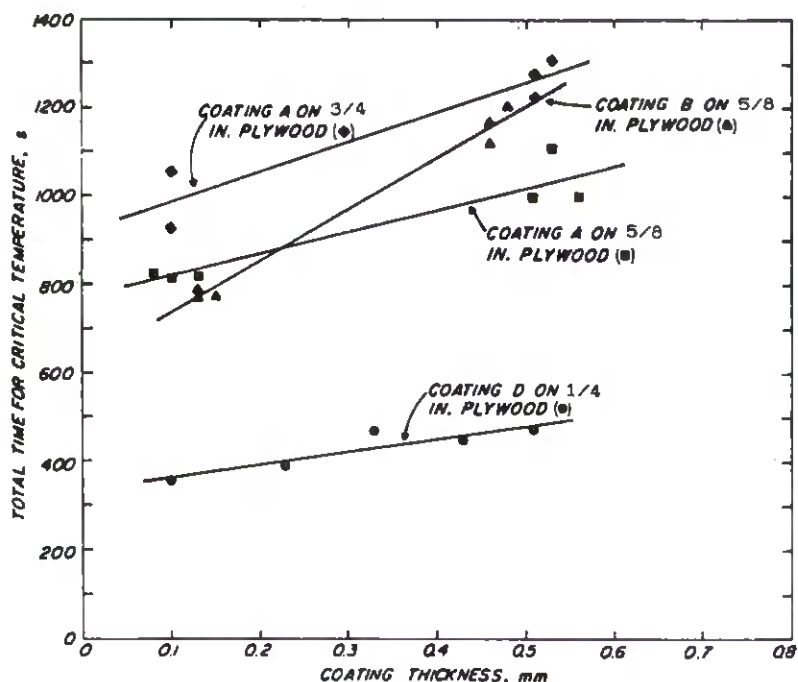
Coating Designation	Number of Tests	Dry Coating Thickness, mm	Dry Coating Weight, g/m ²	Time to 139/181°C ^a			
				Total			
				Mean, s	COV ^b , %	Improvement ^c , s	
6-MM (¼-IN.) PLYWOOD							
NC	3	0.0	0	210	7	0	
F	3	2.9	4940	730	8	530	
16-MM (½-IN.) PLYWOOD							
NC	6	0.0	0	670	2	0	
E	3	1.4	2010	930	4	250	
E	3	6.0	8720	1890	6	1220	
F	3	1.9	3320	1070	6	400	
F	3	2.8	4840	1300	1	640	
G	3	12.7	1640	1230	6	560	
G	3	34.8	6120	3320	10	2640	
H	3	2.6	3550	1690	7	1020	
H	3	6.4	8640	3100	3	2420	
19-MM (¾-IN.) PLYWOOD							
NC	3	0.0	0	870	2	0	
F	3	2.6	5000	1610	1	740	

^aTime for unexposed surface of the plywood to reach average of 139°C (250°F) or maximum of 181°C (325°F) above initial temperature.

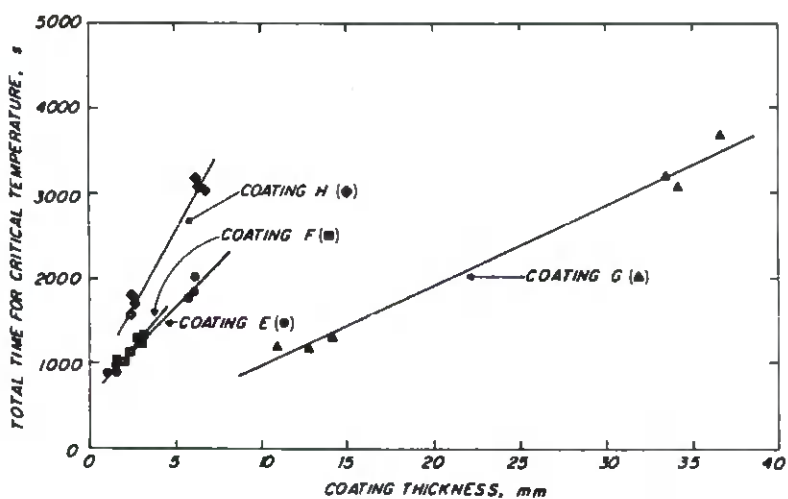
^bCoefficient of variation.

^cImprovement over the time for uncoated plywood. Calculations are based on the individual test results; this may not be the same as the difference in average times.

Till en del kan det större brandmotståndet hos brandskyddsfärgerna förklaras med att de helt enkelt är mycket tjockare än flamskyddsfärgerna. Men för att uppnå samma brandmotstånd måste vissa brandskyddsfärger vara betydligt tjockare än flamskyddsfärger (figur 5a och b).



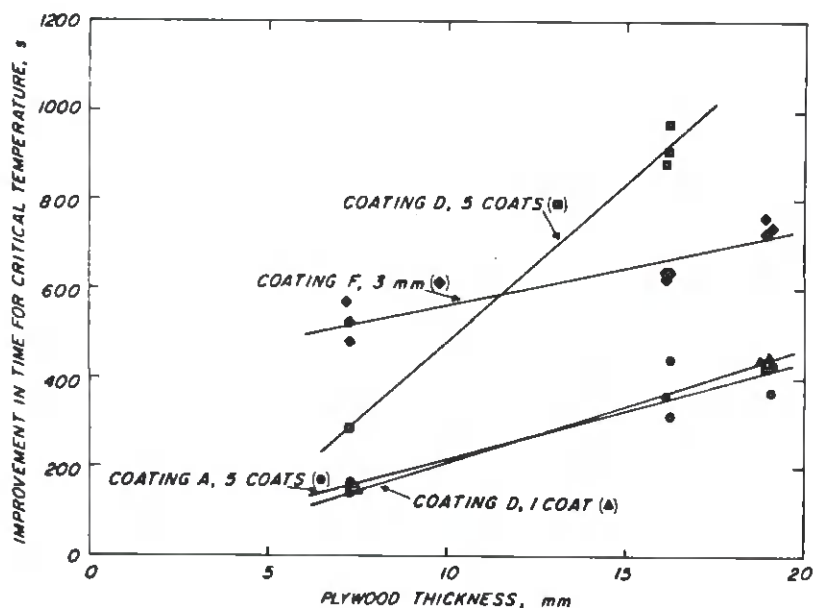
Figur 5a. Brandmotståndet som funktion av tjockleken hos flamskyddsfärger på plywood med olika tjocklek (White 1984).



Figur 5b. Brandmotståndet som funktion av tjockleken hos brandskyddsfärger på 16 mm (5/8 in.) plywood (White 1984).

Vid större plywoodtjocklek blir ökningen i brandmotstånd högre för de skyddsfärger som undersökts (Figur 6). Ökningen är av storleksordningen ca 22 s/mm ökad skivtjocklek. Den dramatiska ökning som beskrivs för skyddsfärg D (fem lager) är troligen överbetonad eftersom den har baserats på ett fåtal observationer.

Som jämförelse kan nämnas att obehandlad plywood ökar sitt brandmotstånd med 70 s/mm ökad skivtjocklek.



Figur 6. Brandmotståndet som funktion av plywoodtjockleken för olika skyddsfärger (White 1984).

Ett gemensamt problem för flertalet av skyddsfärgerna var att de lossnade under försökets gång.

I en analys av ovanstående resultat har White (1985 och 1986) utvecklat empiriska modeller med hjälp av regressionsanalys som beräknar brandmotståndet för trä täckt med skyddsfärger av olika tjocklekar. I analysen ingår kompletterande brandmotståndsdatabaser från ytterligare fem skyddsfärger, se tabell 5. Ekvationerna beräknar tiden till kriteriet 139/181 °C temperaturökning enligt ASTM E 119 samt även tiden till ett 288 °C temperaturkriterium, d v s den ungefärliga temperaturen vid fronten på det bildade kolskiktet. Ekvationer utvecklades för både total tid och tidökningen jämfört med obehandlad plywood.

Tabell 5. Ytterligare brandskyddsfärger som provats på plywood (White 1986).

Designation	Coating
I	Filled, amine-cured, two-component, epoxy intumescent coating with flame retardants, designed to provide relatively short-time (less than 20 min) fire protection, sprayed on by manufacturer
J	Vinyl-based, heavy-bodied, intumescent mastic fire-resistive coating formulated for interior applications, specially designed for fireproofing steel, sprayed on by manufacturer
K	Fiber-reinforced, solvent-base, asbestos-free intumescent mastic fire-resistant coating, sprayed on by manufacturer
L	Intumescent, mastic, fire-resistant coating, sprayed on by manufacturer
M	Intumescent, mastic, fire-resistant coating, sprayed on by manufacturer

Ekvationerna är följande:

$$t_1, X_w = -161 + 0,0727 (g_{1,16} \times X_w) + 48,9 X_w \quad (a)$$

$$g_{1,16} X_w = -27,5 + 0,0694 (g_{1,16} \times X_w) \quad (b)$$

$$t_2, X_w = 123 + 0,0676 (g_{2,16} \times X_w) + 46,1 X_w \quad (c)$$

$$g_{2,16} X_w = 94,7 + 0,0637 (g_{2,16} \times X_w) \quad (d)$$

där t = total tid, (s)
 X_w = plywood-, trä- eller kolskiktjocklek, (mm)
 g = ökning i tid jämfört med obehandlad plywood, (s)
 1 = 139/181 °C temperaturkriterium (temperaturökning)
 2 = 288 °C temperaturkriterium (inbränningsdjup)

Termen X_w avser troligen plywood- och trätjocklek i ekvationerna (a) och (b) samt kolskiktjocklek i ekvationerna (c) och (d). Men det framgår inte helt klart i Whites artikel. Det är också oklart om kolskiktjocklek verkligen avser kolskiktets tjocklek eller inbränningsdjupet, vilket är intressantare ur brandsynpunkt.

För skyddsfärgtjocklekar där provningar inte utförts kan tidsökningen för 16 mm tjock plywood, g_{16} , erhållas ur den linjära ekvationen

$$g_{16} = AX_c + B$$

där X_c = skyddsfärgtjocklek, (mm)

Värdena på A och B har bestämts för de olika skyddsfärgerna och för de två temperaturkriterierna.

Även om de empiriska modellerna är baserade på resultat för plywood (6-19 mm) är det rimligt att anta att de är tillämpliga på rent trä med liknande densitet. Men extrapolering av de linjära sambanden till större skyddsfärg- och plywoodtjocklekar kan göra modellerna ogiltiga. De gäller inte heller för andra färger än de undersökta.

White redogör för flera exempel på träkonstruktioner där de empiriska modellerna har använts. Dessa tillämpningar inkluderar värmebarriärer, väggar, golv, dörrar samt massiva konstruktioner. Endast ett par av dessa tillämpningar kan emellertid jämföras med de fåtal experimentella data för ytbehandlade konstruktioner som publicerats.

Några experimentella data har nyligen redovisats av Norén och Östman (1986), som bestämt brandmotståndet hos träpaneler varav några behandlade med tre olika flamskyddslacker och en flamskyddsfärg, alla av svällande typ. Samtliga behandlingar gav ökat brandmotstånd jämfört med obehandlad panel men försöksbetingelserna medgav ingen inbördes klassificering mellan de olika behandlingarna.

Ytterligare arbeten som behandlar brandmotståndet hos brandskyddsimpregnerade träkonstruktioner redovisas i avsnittet "BRANDMOTSTÅND". Vissa data om skyddsfärger ingår där som jämförelse.

Slutsatser - skyddsfärger

Skyddsfärger ökar brandmotståndet hos trä. Mest effektiva är brandskyddsfärger men även flamskyddsfärger av svällande typ ökar brandmotståndet. En nackdel med brandskyddsfärgerna är att det krävs mycket stora påläggningsmängder. Ett gemensamt problem med flertalet skyddsfärger är att de fäster dåligt på trä och lätt lossnar vid brand. De påverkar å andra sidan inte hållfastheten. Empiriska modeller som beräknar brandmotståndet har utvecklats där skyddsfärg- och trätjocklek ingår som variabler. Modellerna bygger på ett begränsat testunderlag varför ytterligare studier inom detta område är av vikt.

BRANDMOTSTÅND

Brandmotståndet är det grundläggande brandtekniska begreppet för byggnadsdelar och konstruktioner. Det provas enligt en internationellt accepterad provningsmetod, ISO 834. Provelementet placeras som ena sidan i en ugn med eller utan pålagd yttre last. Inuti ugnen höjs sedan temperaturen enligt en standard tid-temperaturkurva. Byggnadsdelens brandmotstånd kan då definieras som den tid under vilken delen uppfyller vissa krav.

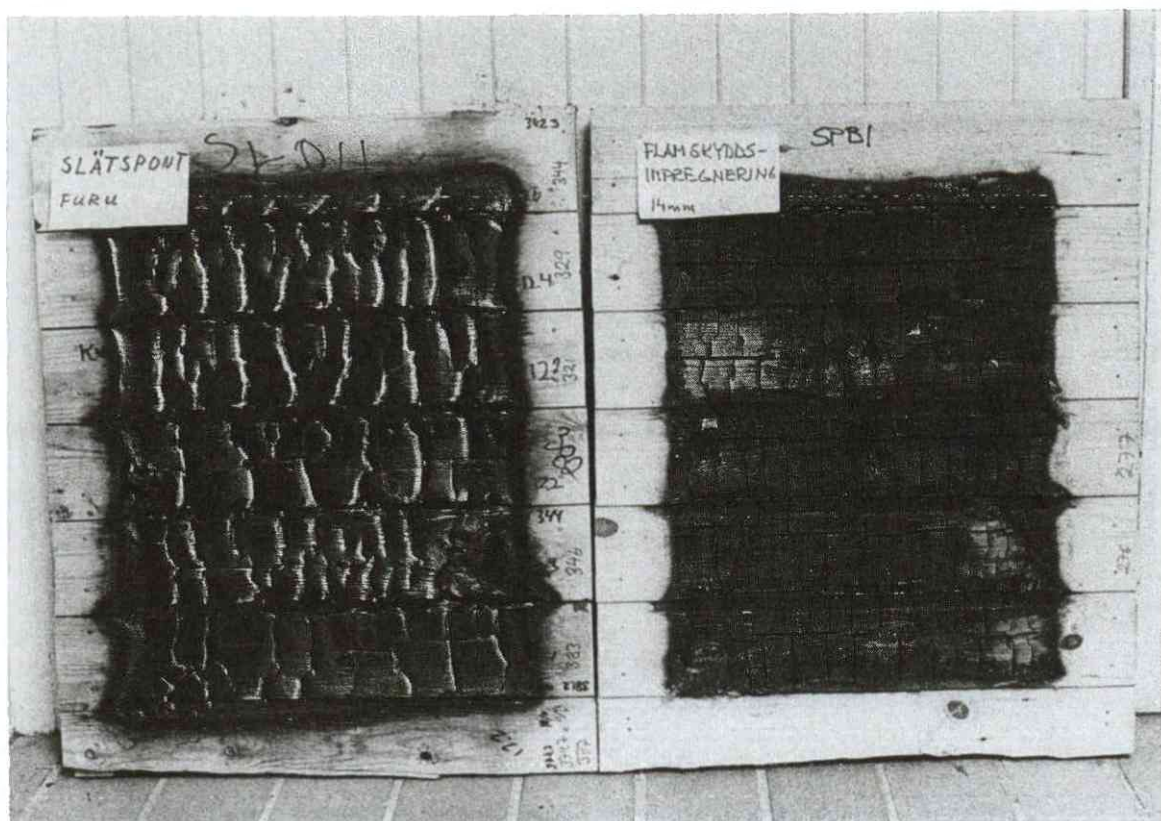
- Isolering, d v s temperaturen på den oexponerade sidan får inte öka mer än 140 °C i genomsnitt eller 180 °C för enstaka punkt.
- Täthet eller integritet, d v s byggnadsdelen får inte släppa igenom eldslågor eller heta gaser.
- Bärförmåga för avsedd last.

Det råder delade meningar om brandskyddsmedel verkligen påverkar brandmotståndet hos trämaterial. Ett antal försök har utförts utan att man kunnat få någon klarhet. De flesta jämförelser av behandlat och obehandlat material är baserade på enstaka provningar, vilket knappast gör resultaten statistiskt tillförlitliga.

Väggkonstruktioner

Clarke (1952) redovisar försök utförda vid National Bureau of Standards (NBS) i USA 1938 där olika mellanväggar av long-leaf pine (1,2 x 1,2 m och 3 x 4,9 m) impregnerades med upp till 17 viktprocent monoammoniumfosfat. Tjockleken på väggarna varierade mellan 20 och 50 mm. Det visade sig att en brandskyddsbehandling hade mycket liten effekt på brandmotståndet. Mellanväggar (1,2 x 1,2 m), 38 mm tjocka, hade ett brandmotstånd mellan 28 och 35 minuter oberoende av saltkoncentration (0-17 %). Motsvarande värden för 3 x 4,9 m väggar, 50 mm tjocka, var 63-72 minuter, också oberoende av koncentration. Brandskyddsimpregneringen hade således ingen effekt på brandmotståndet.

Mitchell (1947) rapporterar om en mindre testserie vid NBS där två väggkonstruktioner testades. Två väggar av Douglas fir med 51 x 102 mm plankor och två andra med 51 x 152 mm plankor impregnerades med en blandning av 60 % ammoniumsulfat, 10 % diammoniumfosfat, 10 % borax och 20 % borsyra till en upptagning av 80 kg/m³ trä. Som kontrollmaterial tillverkades fyra obehandlade väggar. Provingen utfördes med och utan belastning. Påkänningen i reglarna var 2,4 MPa (51 x 102 mm) och 4,8 MPa (51 x 152 mm). Impregneringen medförde att brandmotståndet för 51 x 102 mm väggar ökade med 20 % och för 51 x 152 mm väggar med 24 % med belastning. Utan belastning var ökningen 33 % (51 x 102 mm) och 29 % (51 x 152 mm). I de fall då väggar provades under belastning var bärförmågan avgörande för brandmotståndet. Den uppmätta förbättringen ansågs mer bero på att inverkan av fogarna var mindre än på att förkolningshastigheten ändrades. En förklaring kan alltså vara att fogarna hos impregnerade träväggar inte vidgar sig lika mycket som hos oimpregnerade väggar, d v s att brandskyddsimpregnerat trä krymper mindre. Detta finns dock inte belagt någon annanstans i litteraturen. Däremot har det konstaterats att kolskiktet får ett annat utseende och sprickmönster när träet är brandskyddsimpregnerat (Norén och Ostman 1986). Ett exempel visas i figur 7.



Figur 7. En furupanel som impregnerats med Boliden Flameproof får en annan kolskiktsstruktur med smalare sprickor (t h) än en obehandlad panel (t v).

Även Webster och Ashton (1951) utförde liknande tester men försökte förhindra inverkan av fogar. Det visade sig emellertid att väggar av European redwood i tjocklekar mellan 13 och 51 mm, som hade impregnerats med ammoniumfosfat, inte hade större brandmotstånd än obehandlade väggar.

Bjälkar, pelare m m

Imaizumi (1963) jämförde brandmotståndet hos brandskyddsbehandlade limträbalkar av Yeyo spruce (180 x 450 x 3000 mm) med obehandlade kontrollbjälkar. Behandlingarna bestod av a) ett fosfatbaserat brandskyddsmedel, b) en ureabaserad skyddsfärg, c) 1 cm lager av asbest innehållande ett organiskt bindemedel och d) 1 cm lager av perlitputs. Provingen utfördes under 30 minuter med belastning. Nedböjningen av de två bjälkar som behandlats enligt a) och b) skilde sig mycket lite från obehandlade bjälkar. Nedböjningen ökade gradvis efter fem minuter från försöksstart. För bjälkarna täckta med asbest och puts började däremot inte nedböjningen att öka förrän 15 minuter efter start. Vid denna tidpunkt började beläggningarna att spricka och de föll senare av.

Malhotra och Rogowski (1970) har beskrivit provningar av limträpelare (230 x 230 mm) under belastning. En pelare av Douglas fir, impregnerad med ett icke specificerat brandskyddsmedel (53 kg/m³), hade 17 % större brandmotstånd än en obehandlad pelare. En pelare av European redwood som impregnerats med ett annat brandskyddsmedel och en pelare av Western red cedar täckt med en klarlack av svällande typ, skilde sig inte signifikant i brandmotstånd från motsvarande obehandlade pelare.

Rogowski (1970) rapporterade i ett diskussionsavsnitt att båda ovan nämnda impregneringar minskade förkolningshastigheten med ca 20 %.

Odéen (1970) har nämnt att förkolningshastigheten för en limträbalk, som behandlats med en brandskyddande färg, inte påverkas jämfört med en obehandlad bjälke. Endast antändningstiden fördröjdes något.

Slutsatser - brandmotstånd

För väggkonstruktioner tycks brandskyddsimpregnering av traditionell typ ha liten inverkan på brandmotståndet. Vissa resultat tyder dock på att brandskyddsimpregnering minskar fogarnas negativa inverkan på brandmotståndet. För bjälkar och pelare verkar brandskyddsimpregnering ha liten effekt på brandmotståndet medan däremot olika skyddsbeläggningar tenderar att öka brandmotståndet. Organiska beläggningar som asbest och puts är mest effektiva, men även färger av svällande typ ökar brandmotståndet.

Underlaget för bedömning av brandskyddsmedels effekt på brandmotståndet är dock mycket begränsat.

MEKANISKA EGENSKAPER

De mekaniska egenskaperna hos trä kan påverkas av brandskyddsmedel på olika sätt: genom att främmande ämnen ingår i strukturen, genom att dessa ämnen kan ändra - t ex bryta ner eller tvärbinda - strukturen, och genom att fukttinnehållet kan ändras.

Trä är i sig självt hygroskopiskt och torrt trä kommer att absorbera vatten till en viss grad beroende på omgivningens relativa fuktighet. Närvaron av hygroskopiska salter, som alltså drar till sig vatten, kommer dock markant att ändra fuktjämvikten i träet beroende på sammansättningen av dessa salter. Fosfatsalter t ex har ganska liten effekt på fuktjämvikten såvida inte relativa luftfuktigheten är högre än 80 %, medan andra föreningar som zinkklorid och ammoniumsulfat kan påverka träets hygroskopicitet vid lägre relativ luftfuktighet. Det är allmänt känt att hög fukthalt ger försämrade hållfasthetsegenskaper samt även gynnar korrosion av metaller i trä.

Vid en brandskyddsbehandling kan den efterföljande artificiella torkningen medföra att vissa salter bryts ned och bildar syror som i sin tur bryter ned cellväggen, vilket leder till att träet får lägre hållfasthet. Ammoniumfosfater bryts ned vid upphettning och bildar ammoniak och fosforsyra och sulfatsalter bildar svavelsyra.

Nedan återges de arbeten där brandskyddsmedels inverkan på träets mekaniska egenskaper behandlats. Samtliga avser impregnering.

Organiska brandskyddsmedel

Små provkroppar

Jessome (1962) har studerat hur hållfasthetsegenskaperna hos Douglas fir, Red pine och Douglas fir plywood påverkades av några kommersiella brandskyddsmedel. Dessa bestod av zinkklorid/ammoniumsulfat/borsyra (ZAB), samt två olika blandningar av ammoniumfosfat och ammoniumsulfat. Provbitar (51 x 51 x 762 mm för rent trä och 10 x 51 x 508 mm för plywood) impregnerades till maximal upptagning och torkades sedan artificiellt efter ett mildt schema. Provningarna visade att elasticitetsmodulen inte påverkades för Douglas fir och Red pine, medan den var 9 % lägre för plywood. Böjhållfastheten var 2-13 % lägre för Douglas fir, 10-29 % lägre för Red pine och 13-16 % lägre för Douglas fir plywood. Variationerna beror på vilket brandskyddsmedel som har använts. ZAB påverkade över lag träets mekaniska egenskaper minst av de tre medlen. Brottenergin minskade mest, 12-29 % för Douglas fir, 42-55 % för Red pine och 2-8 % för plywood, vilket tyder på att träet blev sprödare.

För att studera borföreningars inverkan på hållfasthetsegenskaperna hos trä lät Middleton et al. (1965) vakuumpregnera bjälkar av Douglas fir (25 x 25 x 254 mm) med såväl borax/borsyra i olika proportioner som med andra brandskyddsmedel. Böjhållfastheten provades dels efter torkning, dels sedan provbjälkarna även hade utsatts för olika temperaturer. Slutsatsen blev att de brandskyddsmedel som innehåller sulfater i högre grad påverkar träets mekaniska egenskaper än borater och andra alkaliska salter. Ju högre efterbehandlingstemperaturen var, desto mer varierade dock resultaten.

Salter med anjoner av starka syror som sulfater och klorider har större negativ effekt på träets hållfasthetsegenskaper än anjoner av svaga syror, hävdar Gardner (1965) och nämner, i likhet med flera andra, att såväl impregneringsförfarandet som den efterföljande artificiella torkning kan påverka hållfasthetsegenskaperna i negativ riktning.

Eickner (1966) nämner i en översiktsartikel om provningar utförda vid Forest Products Laboratory (FPL), Madison, att elasticitetsmodulen minskade med 5-8 %, böjhållfastheten med 10-17 % och brottenergin, dvs den i provet absorberade energin fram till brott vid statisk belastning, med 32 %. Han påpekar vidare att vid konstruktionsutformning tas i allmänhet inte brottenergin med i beräkningarna såvida inte energiabsorption är en faktor att räkna med.

Gerhards (1970) har gjort en sammanställning av ett antal arbeten utförda i Nordamerika av vilka flera här refererade studier ingår. I sammanställningen ingår även åtta opublicerade arbeten som utförts vid FPL, Madison. Samtliga opublicerade arbeten har utförts på provbjälkar av Douglas fir och/eller Southern pine av varierande storlek på upp till 51 x 51 x 762 mm. Av sju använda brandskyddsmedel var fem ospecificerade, ett bestod av ammoniumfosfater och ett av ammoniumfosfater:ammoniumsulfat 1:1. I samtliga fall utom ett torkades proverna artificiellt efter behandling. Resultaten från de åtta studierna visade att elasticitetsmodulen minskade med i genomsnitt 7 %, böjhållfastheten med 15 % och brottenergin med 36 %. Ingen nämnvärd skillnad kunde konstateras mellan de två olika träslagen. Variationerna mellan de olika behandlingarna var också relativt små.

I ett arbete där Douglas fir plywood behandlades med två ospecificerade brandskyddsmedel och därefter torkades artificiellt, fann King och Matteson (1972) att det ena medlet i mycket liten utsträckning påverkade de mekaniska egenskaperna, medan det andra medlet hade en tydlig negativ effekt. Böjhållfastheten minskade t ex med 24 %. Men resultaten blir ganska intetsägande eftersom använda brandskyddsmedel inte har specificerats.

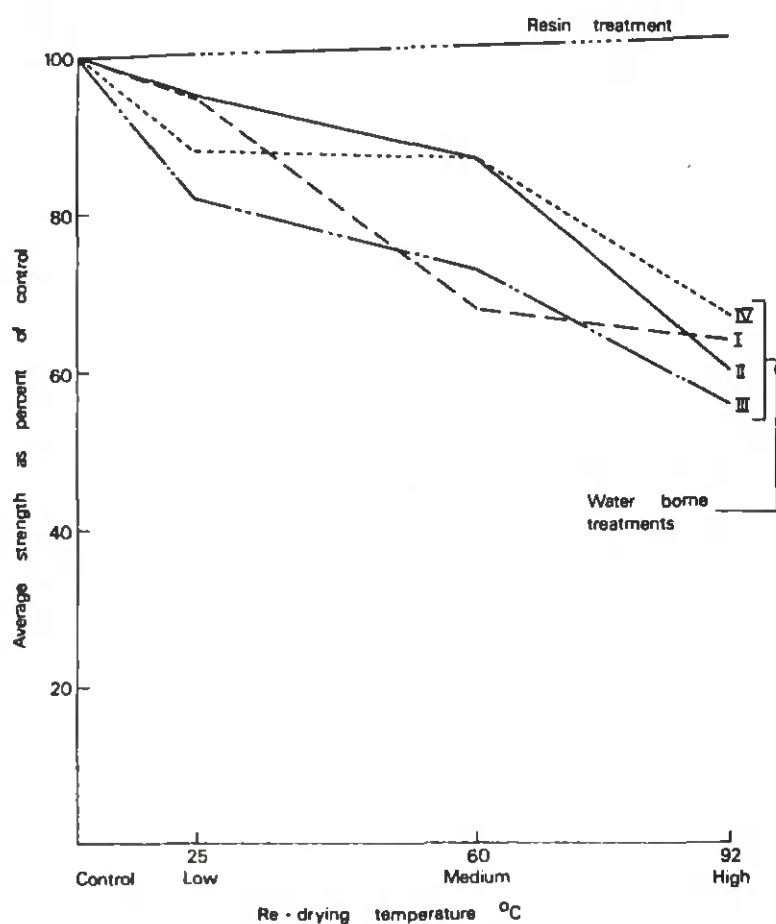
Den mekaniska egenskap som påverkas minst av impregnering med efterföljande artificiell torkning är enligt Brazier och Laidlaw (1974) styvheten. Man har där uppmätt förluster på 13 % medan genomsnittsvärdet ligger på endast 5 %. Som genomsnittsvärde för hållfasthetsegenskaperna vid böjning anger de en förlust på 15-20 % om den artificiella torkningen sker vid 65°C. Förlusterna kan öka till 50 % om istället träet torkas vid 90°C. Den egenskap som mest påverkades var förmågan att absorbera energi som minskade med 30-50 %, ibland över 50 %. Någon källhänvisning till ovanstående värden finns tyvärr inte hos Brazier och Laidlaw.

Stora provkroppar

De flesta studier som behandlar effekten av brandskyddsmedel på de mekaniska egenskaperna hos trä har avsett relativt små provbitar. Detta har medfört att provbitarna har blivit fullständigt penetrerade av kemikalierna. Johnson (1967) valde därför att arbeta med större bjälkar (51 x 152 x 3658 mm) av Douglas fir. Bjälkarna genomgick två olika, inte närmare angivna, brandskyddsbehandlingar, varefter de torkades både artificiellt och genom brädgårdstorkning. Man kunde konstatera att, oberoende av behandling och efterföljande torkning, fanns det ingen signifikant skillnad i elasticitetsmodul mellan behandlat och obehandlat trä. Böjhållfastheten minskade däremot med 10-20 % för behandlade bjälkar som genomgick artificiell torkning. Brädgårdstorkning medförde en mycket liten påverkan på böjhållfastheten.

Torktemperatur

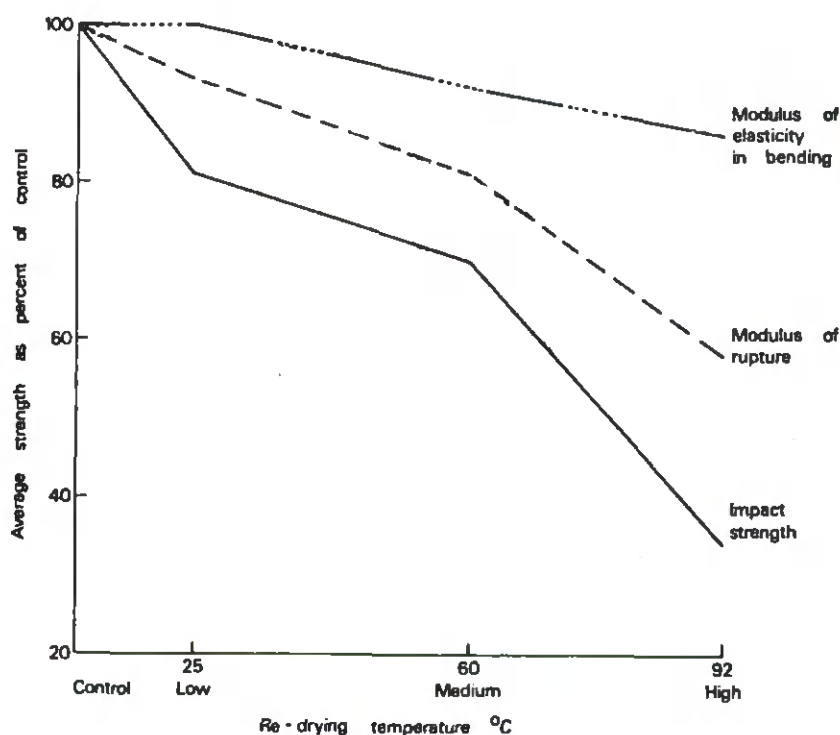
Adams et al. (1979) har mera ingående studerat temperaturens inverkan på hållfasthetsegenskaperna vid artificiell torkning. Provbitar (35 x 35 x 525 mm) från både splint och kärnved av European redwood tryckimpregnerades med fem olika kommersiella brandskyddsmedel. Fyra av dem var baserade på vattenlösliga salter, mestadels ammoniumfosfater och ammoniumsulfat, och ett medel, Non-Com X, härdade efter behandling ut i träet och bildade en syntetisk organisk polymer (s k resin treatment). Upptagningen av de fem brandskyddsmedlen skiljde sig markant mellan splint- och kärnved. Upptagningen hos splint var 30-50 % högre och för Non-Com X 100 % högre (63 kg/m^3 mot 31 kg/m^3). Prover behandlade med vattenlösliga salter torkades artificiellt vid 25, 60 och 90 °C. Prover som behandlats med Non-Com X torkades vid 105 °C då polymeriseringen krävde denna temperatur. Resultaten visade att träs hållfasthetsegenskaper reducerades kraftigt med ökande torktemperatur för prover behandlade med vattenlösliga salter. För prover behandlade med Non-Com X erhöles däremot i flertalet fall ökad hållfasthet. En förklaring till detta resultat kan vara de tvärbindingar som bildas mellan hartset och de i Non-Com X ingående kväveföreningarna (aminer, amider). Böjhållfastheten som funktion av torkningstemperaturen för kärnved visas som exempel i figur 8.



Figur 8. Torkningstemperaturens effekt på böjhållfastheten för behandlade kärnvedsprover (Adams et al. 1979).

Artificiell torkning vid höga temperaturer medför även att träet mörknar kraftigt. Torkning vid ca 60°C, en mera måttlig temperatur, minskade böj- hållfastheten med i genomsnitt 20% och slaghållfastheten med 30% för prover behandlade med vattenlösliga brandskyddsmedel. Motsvarande siffror för torkning vid 90°C var 40% minskad böjhållfasthet och 65% minskad slaghållfasthet. Effekten av torktemperaturen på de olika hållfasthetsegenskaperna återges i figur 9 som genomsnitt för samtliga behandlingar med vattenlösliga brandskyddsmedel i splintved.

Skillnaden mellan splint- och kärnved är endast marginell för provbitar behandlade med någon av de vattenlösliga salterna. Splintved impregnerad med Non-Com X har däremot något bättre hållfasthet än kärnved, vilket kan förklaras med den högre upptagningen i splintved.



Figur 9. Torkningstemperaturens effekt på olika mekaniska egenskaper. Genomsnitt för behandlingar med olika vattenlösliga salter (splint) (Adams et al. 1979).

Förhöjd temperatur

Novotny (1980) har impregnerat furu med sex olika brandskyddsmedel och sedan prövat slaghållfasthet, böjhållfasthet och tryckhållfasthet. Provbittarna (50 x 25 x 500 mm) impregnerades till en upptagning av 70-80 kg/m³ trä med följande brandskyddsmedel:

	(NH ₄) ₂ HPO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	NH ₄ Cl	MgCl ₂	ZnCl ₂	H ₃ BO ₃	Borax	K ₂ Cr ₂ O ₇	
AS	65	35	-	-	-	-	-	-	%
Pregnotit	-	-	21,8	60	10,9	7,3	-	-	"
Minalit	10	60	-	-	-	20	10	-	"
Pyresote	-	35	-	-	35	25	-	5	"
Borsyra:borax	-	-	-	-	-	50	50	-	"

Efter brädgårdstorkning exponerades olika provbitar vid olika temperaturer mellan 20 och 140 °C under 40 timmar varefter de konditionerades vid rumstemperatur innan de hållfasthetstestades. Resultaten av provningarna visas i tabell 6, där värdena för oimpregnerat trä som exponerats vid 20 °C efter brädgårdstorkning indexerats till 100 för respektive provning. Det framgår att böjhållfastheten inte påverkas nämnvärt negativt vid temperaturer under 120 °C. Tryckhållfastheten ökar överlag upp till 120 °C medan slaghållfastheten ligger konstant 15-30% lägre för impregnerat trä upp till ca 60 °C då den börjar sjunka ännu mer. Böjhållfastheten förbättras av borax:borsyra, vilket överensstämmer med Middeltons resultat, som redovisats ovan.

Tabell 6. Slag-, böj- och tryckhållfasthet för olika behandlingar och vid olika temperaturer. Obehandlade prover, 20 °C, har indexerats till 100 (Novotny 1980).

BÖJHÅLLFASTHET

Exponerings- temperatur °C	Impregneringsmedel					
	Utan im- pregnering	AS	Borsyra + borax	Pregno- lit	Minalit	Pyresote
20	100	96	107	96	97	104
40	100	100	114	97	105	100
60	107	106	119	102	104	109
80	99	102	115	102	103	112
100	104	98	123	90	99	104
120	103	79	116	73	85	92
140	97	61	115	53	75	76

TRYCKHÅLLFASTHET

Exponerings- temperatur °C	Impregneringsmedel					
	Utan im- pregnering	AS	Borsyra + borax	Pregno- lit	Minalit	Pyresote
20	100	104	127	107	120	114
40	105	102	124	110	113	113
60	110	121	124	141	131	134
80	114	112	122	129	120	127
100	122	92	121	107	105	114
120	113	103	121	108	104	120
140	96	61	94	77	59	77

SLAGHÅLLFASTHET

Exponerings- temperatur °C	Impregneringsmedel					
	Utan im- pregnering	AS	Borsyra + borax	Pregno- lit	Minalit	Pyresote
20	100	71	63	72	77	83
40	104	76	60	85	73	78
60	104	84	52	85	70	77
80	99	73	29	66	46	43
100	95	43	17	51	32	25
120	92	34	16	28	16	16
140	64	5	16	4	8	13

Även Rykov (1983) har undersökt hur en temperaturhöjning påverkar olika hållfasthetsegenskaper hos provbitar av furu och lärkträ. Proverna impregnerades med en vattenlösning av 14 % ammoniumsulfat, 6 % diammoniumfosfat och 1,5 % natriumfluorid. Provbitarna upphettades sedan upp till 250 °C. De mekaniska egenskapernas temperaturberoende är högst varierande, förmodligen p g a ett alltför begränsat antal mätpunkter. För impregnerad furu är t ex skjvuhållfastheten 7 % lägre vid 100 °C, 1 % lägre vid 150 °C och 28 % lägre vid 180 °C jämfört med obehandlad furu. Böjhållfastheten och tryckhållfastheten varierade något mindre och var i genomsnitt ca 7 % lägre för impregnerade prov. Draghållfastheten ökade däremot med i genomsnitt 12 % för impregnerade provbitar.

Långtidseffekter

Långtidseffekterna av brandskyddsbehandlad Douglas fir har studerats av Graham (1964). Han fann att de mekaniska egenskaperna i vissa fall var bättre för behandlade träprover. Små provkroppar (25 x 25 x 406 mm) impregnerades med borsyra:natriumtetraborat (40:60), ammoniumsulfat, två ospecificerade brandskyddsmedel samt tre American Wood Preservers' Association (AWPA) brandskyddsmedel: Pyresote, Minalit och CZC FR. Provbjälkarna genomgick sedan brädgårdstorkning och lagrades vid 21 °C och 65 % RF tills jämvikt uppnåtts. Hälften av provbitarna konditionerades därefter cykliskt i tre år enligt ett schema bestående av tre månader vid 60-65 °C (RF ej nämnd) följt av nio månader vid 32 °C och 30 % RF. Både efter ett och tre år hade behandlat trä behållit sin bärförmåga i samma grad som obehandlat trä och var dessutom styvare men också sprödare. Behandlat trä lagrat vid låg relativ fuktighet hade bättre hållfasthetsegenskaper än obehandlat trä. Trä behandlat med borsyra:natriumtetraborat hade mellan 5 och 20 % högre böjhållfasthet och elasticitetsmodul, men däremot var brottenergin lägre.

Saltkoncentrationens inverkan

Stefaniak och Masnica (1979) har studerat hur provbitar av bok och bokfåner påverkas av olika koncentrationer av Silignit Rm, ett brandskyddsmedel baserat på ammoniumfosfater och ammoniumsulfat. Upptagningen av medlet varierade mellan 13 och 31 % av träets torrsvikt. Hållfasthetsegenskaperna försämrades ju högre upptagning av Silignit Rm man hade. Vid den högsta upptagningen minskade tryckhållfastheten med i genomsnitt 8 %, böjhållfastheten med 11 %, draghållfastheten med 25 % och segheten med 48 %.

Översikter

Förutom ovannämnda översikter av Eickner (1966) och Gerhards (1970) har Winandy och Rowell (1984) gjort en sammanställning av resultaten från ett flertal arbeten som behandlar effekterna av brandskyddsmedel på hållfasthetsegenskaperna hos trä. Dessa resultat redovisas i tabell 7.

Tabell 7. Brändskyddsmedels effekt på hållfasthetsegenskaperna hos trä (Winandy och Rowell 1984).

Chemical ^a	Species ^b	Drying	Retention ^c (lb/ft ²)	MOR	MOE	FSPL	WML	WPL	Toughness	Impact Bending	Reference
AP	SP	Kiln, 60 °C	6.0	-19	-12		-21				46
APAS	SP	Kiln	6.0	-17	-3		-44				46
		Kiln	6.0	-16	-3		-45				46
	Red pine	Kiln, 65.5 °C	—	-29	-5	-16	-62		-25		65
	DF	Kiln	—	-3	-1	-5	-24		-41		65
	DF plywood	Kiln	—	-15	-9	-22	-6		-19		65
	Red pine	Kiln	—	-23	-5	-13	-55		-18		65
	DF	Kiln	—	-13	-1	-17	-29		-36		65
	DF plywood	Kiln	—	-16	-9	-23	-2		-13		65
FCAP	DF plywood	—	—	-5	-6						66
FRT	Combo	—	—	-13	-5		-34 ^c			-8	46
		Air	—	-10	0						67
		Kiln, 65 °C	—	-30	-13				-30		67
		Kiln, 90 °C	—	-50					-50		67
	SP	Kiln	—	-11	-8		-26				46
		Kiln	—	-17	-13		-33				46
	DF	Air	—	-11	-5		-55				46
		Air	—	-5	0						49
		Air	—	1	-2						49
		Kiln	—	-10	-8		-40				46
		Kiln, 60 °C	—	-15	-3						49
		Kiln, 70 °C	—	-14	-1						49
Minalith	DF plywood	—	—	-8	-5						68
Noncom X	DF	—	—	-16	-5	-7	-32	-12		-57	46
	SP	—	—	-14	-6	-2	-24	4			46
	SP Glulam	Kiln	—	-12	-2						46
Pyrosote	SP	—	—	-10	-8	4	-28	20			46
	DF	—	—	-17	-5	-17	-32	-28			46
	DF	Air	—	-29	-12		-37				46
FRT A	DF plywood	—	5.45	-6	-6		-2				68
FRT B	DF plywood	—	4.94	-11	-24		-31				68
ZAB	Red pine	Kiln, 65.5 °C	—	-10	2	2	-42		-10		67
	DF	Kiln	—	-2	2	-7	-12		-28		67
	DF plywood	Kiln	—	-13	-10	-21	-8		-13		67

Note: Values are expressed as the percent change found by the respective source.

^a AP = ammonium phosphate; APAS = AP + ammonium sulfate; FCAP = flour chrome arsenate phenol; FRT = unidentified fire retardant;

ZAB = zinc ammonium borate.

^b SP = southern pine; DF = Douglas-fir.

^c Treatment was by the pressure process; 1.0 lb/ft² = 16.0 kg/m².

MOR - (böj)hållfasthet
 MOE - elasticitetsmodul
 FSPL - påkänning i yttersta fibrerna
 vid proportionalitetsgränsen
 WML - brottenergi vid statisk belastning
 WPL - energi till proportionalitets-
 gränsen
 Toughness - seghet
 Impact bending - slaghållfasthet

Ref. 46 - Gerhards (1970)
 49 - Johnson (1967)
 65 - Jessome (1962)
 66 - Countryman (1957)
 67 - Brazier, Laidlaw (1974) *
 68 - King, Matteson (1961)

*) Det bör påpekas att flera av de värden i tabell 7 som refererar till Brazier och Laidlaw inte finns nämnda där!

Organiska brandskyddsmedel

Goldstein och Dreher (1961) impregnerade Southern yellow pine med en lösning av dicyandiamid och fosforsyra (D:P) till en upptagning av 21 % av träets torrsvikt. Behandlingen ökade skjuvhållfastheten med 8 % jämfört med obehandlat trä beroende på en tvärbindningsreaktion mellan D:P och cellulosa-molekylerna. Slaghållfastheten efter behandling minskade däremot med 15 %.

Ett annat brandskyddsmedel, som också är baserat på D:P, är Non-Com i vilket även melamin ingår. Provningar utförda på limträbjälkar av Douglas fir (200 x 330 mm) behandlade med Non-Com visade att elasticitetsmodulen minskade med i genomsnitt 12 % och böjhållfastheten med 30 % jämfört med obehandlade bjälkar (Brink 1966). De dynamiska hållfasthetsegenskaperna var 20-40 % lägre. Upptagningen av Non-Com låg mellan 17 och 29 % av träets torrsvikt och någon större skillnad i hållfasthet inom detta område kunde inte konstateras.

Mer fördelaktiga resultat för Non-Com X har rapporterats av Black (1974). Elasticitetsmodulen ökade med 6 % på impregnerad Southern pine och böjhållfastheten sjönk med 12 %. Anmärkningar kan riktas mot Black då inga källhänvisningar till provresultaten förekommer.

Blacks resultat skiljer sig också från Adams' et al. (1979) där böjhållfastheten istället ökade något. Faktorer som delvis kan förklara denna skillnad kan vara olika upptagning av Non-Com X i träet samt att olika träslag använts.

Riktlinjer för träkonstruktioners bärförmåga

Med ovanstående som bakgrund står det klart att trä och plywood får något försämrade hållfasthetsegenskaper då de behandlats med vattenlösliga brandskyddsmedel. I Nordamerika t ex krävs det enligt The National Design Specification att den maximalt tillåtna belastningen på brandskyddsimpregnerat trä efter torkning ska reduceras med 10 % (Hall och Hickey 1972, Gardner 1965). Även The National Forest Products Association i USA rekommenderar 10 % reduktion.

Holmes (1977) anser att brandskyddsimpregnering av stora träkonstruktioner där hållfastheten utgör en dominerande faktor i allmänhet inte är att rekommendera. Den negativa effekt som en sådan behandling får på hållfastheten och hygroskopiciteten uppväger fördelarna. Det vore i stället bättre att använda färger med brandskyddande verkan som med ganska stor säkerhet inte påverkar träets mekaniska egenskaper.

Slutsatser - mekaniska egenskaper

Trä får i allmänhet försämrade hållfasthet då det impregneras med oorganiska brandskyddsmedel, i synnerhet som många brandskyddsmedel är hygroskopiska och ökar träets fuktkvot. De kan också delvis bryta ner trästrukturen. Borföreningar påverkar hållfastheten i mindre grad än andra föreningar, som t ex innehåller sulfater och fosfater. De mekaniska egenskaperna försämras drastiskt med ökande temperatur vid artificiell torkning efter en brandskyddsimpregnering. Det är därför viktigt att torka efter ett milt

schema eller brädgårdstorka. En annan faktor som påverkar egenskaperna är upptagningshalten. Med ökad upptagen mängd brandskyddssalt i träet minskar hållfastheten.

Resultaten från redovisade provningar varierar mycket beroende på de olika försöksbetingelser som använts. Elasticitetsmodulen minskar i allmänhet med 0-10 % för brandskyddsbehandlat trä, böjhållfastheten med 10-20 % och brottenergin med 30-50 %. Någon ytterligare försämring efter lång tid har inte påvisats.

Organiska brandskyddsmedels inverkan på träets mekaniska egenskaper har inte studerats tillräckligt mycket för att man skall kunna dra några generella slutsatser. Vissa resultat tyder på att hållfasthetsegenskaperna förbättras av tvärbindningsreaktioner i träet medan andra resultat visar att dessa reaktioner spelar en mindre roll för hållfastheten.

Den maximalt tillåtna belastningen på brandskyddsimpregnerade träkonstruktioner ska enligt några amerikanska normer minskas med 10 %.

FÖRBAND

Korrosion

Metaller i kontakt med torrt trä korroderar inte men med ökad fukthalt i träet ökar korrosionshastigheten och processen påskyndas vid närvaro av vissa oorganiska salter. Korrosiviteten hos salter som används för brandskydd varierar en hel del. Det är känt att ammoniumsulfat ger allvarlig korrosion på metaller som zink, järn och galvaniserat stål i fuktig miljö medan ammoniumfosfater är mindre korrosiva (Brazier och Laidlaw 1974).

Genom tillsatser av natriumdikromat eller ammoniumtiocyanat, vilka fungerar som korrosionsinhibitorer, kan man förhindra korrosionsangrepp (Holmes, 1977). Eickner (1966) nämner att man i stort sett övervunnit korrosionsproblemen genom dessa inhibitorer men om träförband under lång tid utsätts för fuktig miljö kan detta resultera i utfällning av salter på metallytan varvid inhibitorerna inte kan förhindra en elektrolytisk korrosion. Eickner citerar också resultat från Van Kleeck (1942) som behandlar korrosiviteten för olika kombinationer av metaller och salter varvid metallprover lades i saltlösningar för att påskynda processen (tabell 8).

Tabell 8. Korrosiviteten hos metaller i olika saltlösningar (Van Kleeck 1942).

Metall	Ammonium-sulfat	Diammonium-fosfat	Monoammonium-fosfat
Mässing	Hög	Måttlig	Låg
Koppar	Hög	Måttlig	Låg
Stål	Måttlig	Ingen	Måttlig
Zink	Måttlig	-	-
Aluminium	Ingen	Måttlig	Ingen

Middleton et al. (1965) utförde korrosionstester på brandskyddsbehandlat trä i kombination med aluminium, mässing och stål. Provbitarna konditioneredes vid 95 % relativ luftfuktighet under endast tio dagar. Resultaten visas i tabell 9 uttryckt som korrosionshastighet.

Tabell 9. Korrosion av metallförbindare i kontakt med trä (Middleton et al. 1965). 1 mil = 0,025 mm.

Treatment	Corrosion (mils/year) (average)		
	Aluminum	Brass	Steel
None	0.14	0.42	13.35
FR 28 ®	1.85	0.36	0.62
Borax	2.12	0.54	0.72
Boric acid	1.56	0.63	1.02
Borax/boric acid (50/50 by weight)	1.59	1.23	3.42
Borax/boric acid (85/15 by weight)	1.72	0.72	0.72
Diammonium phosphate	2.08	4.25	1.96
Ammonium sulfate	7.86	4.29	21.84
AWPA Type C	9.23	4.59	16.78
AWPA Type D	4.85	1.17	5.37
Proprietary - Comm.	2.64	1.42	14.34
Proprietary ¹ Comm.	0.58	0.82	9.78

¹Second series of "Proprietary" used 1/2-inch treated plywood.

Borsyra och borax var minst korrosiva medan ammoniumsulfat visade en hög korrosivitet gentemot samtliga metaller. Resultaten visar en stor variation, inte minst för de kommersiella brandskyddsmedlen. Många behandlingar var mindre korrosiva än obehandlat trä på stål. Korrosiviteten för olika kombinationer av salter och metaller stämmer dåligt överens med Van Kleecks resultat, vilket delvis kan förklaras med olika provbetingelser.

Bärförmåga

Vid ett rostangrepp på t ex en spikplåt bildas alkaliska och sura zoner runt metallen där sedan träet bryts ned. Förankringen av förbindaren blir därmed sämre och bärförmågan minskar.

Johnson (1975) provade bärförmågan för olika träförband (Douglas fir). Förbindarna bestod av fem olika sorters spikar och tre sorters märllor. Provbitarna hade brandskyddsbehandlats med Non-Com, Pyresote eller borax-borsyra och därefter lagrats under två och sju år i kallt, normalt och varmt/fuktigt klimat. I kallt och normalt klimat kunde ingen skillnad i förbandens hållfasthet konstateras. I det varma och fuktiga klimatet gav behandling med Pyresote sämst resultat. Ingen av de tre behandlingarna var bäst eller sämst för alla klimat och ingen behandling gav bäst eller sämst resultat på de åtta olika förbindarna. Varmförzinkad spik klassades som bäst bland förbindarna. I ett senare arbete undersökte Johnson (1979) erforderlig last för en viss nedböjning för ovan nämnda förband. Konditioneringen skedde endast i kallt och normalt klimat. Förband där träet hade brandskyddsbehandlats och lagrats i sju år var minst lika starka som förband med obehandlat trä, oberoende av brandskyddsmedel och klimat. Tydligt var denna exponering inte tillräckligt hård för att orsaka korrosionsangrepp.

Percival och Suddarth (1971) jämförde brandskyddsmedels inverkan på styvhet och brottgräns för olika spikförband. Provbitar av Douglas fir och Southern yellow pine konditionerades efter impregnering med Non-Com till

två olika fuktkvoter, 10 och 20 %. Styvheten hos förbanden ökade med 20-50 % vid 20 % fuktkvot i träet, men påverkades inte nämnvärt vid 10 % fuktkvot. Brottgränsen låg 17,5 % lägre vid 10 % fuktkvot och 4,1 % lägre vid 20 % fuktkvot för Douglas fir. Motsvarande minskningar i brottgräns för Southern yellow pine var 3,3 % (10 % fuktkvot) och 8,4 % (20 % fuktkvot).

Slutsatser - förband

Metallförbindare som används tillsammans med brandskyddbehandlat trä kan korrodera, speciellt om träet har hög fuktkvot. Detta leder till minskad bärförmåga hos förbanden. Sulfater är mer korrosiva än fosfater och borater. Det är också stora skillnader mellan olika metaller. Tillsats av vissa inhibitorer, oftast natriumdikromat, kan förhindra korrosionsangrepp.

GENERELLA SLUTSATSER

Brandskyddsmedel ska ge ett skydd mot fullt utvecklade brand och öka konstruktionens brandmotstånd, vilket mäts i tid. Egenskaper som förkolningshastighet och hållfasthet är av störst intresse. Detta har studerats i betydligt mindre utsträckning än skydd mot inledande brand, där litteraturen är omfattande och såväl flamskyddsmedel används för att minska antändlighet, flamspridning m m. I båda fallen har i stort sett samma kemiska föreningar studerats, d v s huvudsakligen oorganiska föreningar innehållande fosfor, bor, kväve, halogener eller kisel. Några organiska fosfor- och halogenföreningar har också studerats och då främst som flamskyddsmedel.

Skyddet kan vara en impregnering in i träet eller ett ytskydd i form av en färg. Impregneringen ändrar trädets nedbrytning vid brand, t ex så att ett tjockare skyddande kolskikt bildas eller så att förkolningshastigheten minskar. Färger skyddar bäst om de sväller upp vid brand och bildar ett värmeisolerande skikt. Mycket tjocka ytskikt kan också ge ett bra brandskydd utan att svälla upp.

Mest positivt är det om trädets förkolningshastighet kan minskas, vilket visats i en enda studie. Förkolningshastigheten minskade med upp till 25 %, men tillsatsmängderna var stora, ca 15 %, vilket är vanligt för traditionellt flamskydd. Bäst resultat gav polyetylenglykol som i övrigt inte är känt som brand- eller flamskyddsmedel.

Kolutbytet, d v s mängden kvarvarande kol, ökar kraftigt redan vid små tillsatsmängder, ca 1 %, enligt flera studier. Om förkolningshastigheten påverkas samtidigt har tyvärr inte studerats. Kolutbyte och förkolningshastighet behöver ju inte ändras samtidigt.

Brandmotståndet hos väggar och bjälkar tycks inte påverkas nämnvärt av en brandskyddsimpregnering. Endast om väggar innehåller fogar mellan bräder kan brandmotståndet öka, kanske beroende på att brandskyddsimpregnerat trä krymper mindre än obehandlat. På så sätt minskar brandens inträngning i fogarna, som ju är den svagaste punkten. Krympningen hos brandskyddsimpregnerat trä har dock inte studerats mera direkt.

Skyddsfärger ökar brandmotståndet hos träkonstruktioner enligt flera studier. Färgerna kan vara av svällande typ (mest flamskyddsfärger) eller bestå av mycket tjocka ytskikt, upp till flera centimeter. Sådana stora påläggsmängder kan vara en nackdel ur flera synpunkter, särskilt som ytskikten ofta är spröda. En annan nackdel är att flertalet brandskyddsfärger fäster dåligt på trä och lossnar lätt vid brand. De är i allmänhet utvecklade för andra material, t ex stål. En fördel är att de inte påverkar trädets mekaniska hållfasthet.

Hållfastheten hos trä försämras i allmänhet av brandskyddsimpregnering med oorganiska salter. Elasticitetsmodulen påverkas minst, 0-10 %, böjhållfastheten något mera, ca 20 % och brottenergin mest, upp till ca 50 %. Trä blir alltså sprödare vid brandskyddsimpregnering. Andra faktorer påverkar också, torktemperaturen får t ex inte vara för hög vid impregnering med oorganiska salter. Impregnering med organiska brandskyddsmedel kräver däremot ofta hög torktemperatur för att de ska härda ut, men de tycks inte påverka trädets mekaniska hållfasthet särskilt mycket, möjligen beroende på bildade tvärbindingar i träet.

Förband av trä och metalliska förbindare kan också försämrats av brandskyddsimpregnering. Dels kan förbindarna korrodera vid de höga fuktkvoter som uppkommer och i närvaro av vissa salter, särskilt sulfater, men det finns effektiva inhibitorer som kan förhindra korrosionen. Dels kan träet brytas ner, särskilt runt metallen, så att förankringen av förbindaren blir sämre och bärförmågan avtar.

Det finns således problem med traditionell brandskyddsimpregnering med oorganiska salter till stor del beroende på att stora tillsatsmängder har använts. Det är därför tveksamt om fördelarna överväger nackdelarna, i synnerhet som en sådan impregnering blir ganska dyr. Om däremot tillsatsmängderna kan minska blir kostnaden lägre samtidigt som de negativa effekterna blir mindre eller kanske försvinner.

På liknande sätt finns det möjligheter att förbättra brandskyddet av träkonstruktioner genom ytbehandling.

Med ovannämnda bakgrund framstår därför följande punkter som särskilt intressanta för fortsatta studier:

- o Minskad förkolningshastighet vid låga tillsatsmängder, ca 1 %. Även icke konventionella impregneringsmedel kan vara intressanta.
- o Minskad krympning hos brandskyddsimpregnerat trä vid uttorkning i samband med brand jämfört med obehandlat trä.
- o Förbättrad vidhäftning på trä för brandskyddsfärger.
- o Svällande brandskyddsfärger applicerade endast i konstruktionens "svaga punkter" med hänsyn till brand.
- o Samband mellan träkonstruktioners brandmotstånd och pålagd mängd skyddsfärg.

SUMMARY

The combustibility of wood may be reduced with flame or fire retardants. Fire retardants are protective in the fully developed fire stage and may affect parameters such as charring rate, char yield, fire resistance and mechanical properties. This field is less known than protection against initial fire with flame retardants, but the chemicals used are of the same type, i.e. mainly inorganic salts.

Fire retardants may be added by pressure impregnation or as a protective coating. Impregnation of wood gives a deeper protection which may affect the charring process but it may also cause brittleness, lower strength and corrosion of metal fasteners. The fire resistance seems to be less affected by common fire retardants.

A substantial increase in char yield is obtained even at low amounts of additives, about 1 %. The normal addition of fire retardants is 15-20 % of the wood weight.

The most interesting result is that the charring rate seems to decrease for wood treated with some fire retardants.

Intumescent coatings increase the fire resistance.

This report gives a survey of the effect of fire retardants on wood constructions. The need for future research is also discussed.

LITTERATUR

- Adams E. H., Moore G. L., Brazier J. D.:
The effect of flame retardant treatments on some mechanical properties of wood.
Building Research Establishment, Department of the Environment,
CP 8/79, Sept. 1979.
- Amaro A. J., Lipska A. E.:
Development and evaluation of practical self-help fire retardants.
Contract DAHC20-70-0219, DCPA Work Unit 2561H, SRI Project PYU-8150.
Stanford Research Institute, Annual Report Aug. 1973.
- Black J. F.:
All-weather fire-retardant. A new non-hygroscopic formulation for wood-based products.
Timber Trades J. 29, p. 53-4, June 1974.
- Brazier J. D., Laidlaw R. A.:
The implications of using inorganic salt flame-retardant treatments with tiber.
BRE Information Sheet IS 13/74, Princes Risborough Lab., 1974.
- Brenden J. J.:
Effect of fire-retardant and other inorganic salts on pyrolysis products of Ponderosa pine.
Forest Prod. J. 15 (2), p. 69-72, 1965.
- Brink F. E.:
Static and dynamic properties of fire-resistant wooden structural elements.
U.S. Naval Civil Engineering Lab., Port Hueneme, Calif., Technical Report R-485, 1966.
- Centre Technique du Bois:
Essais comparatifs de résistance au feu sur poteaux revêtus de peinture ignifuge.
Bulletin d'informations techniques No. 52, Paris, 1970.
- Clarke S. H.:
The value of fire-retardant treatments.
BWPA (British Wood Preserving Association), Rec. of Annual Convention,
p. 91-112, 1952.
- Countryman D.:
Douglas-Fir Plywood Assoc., Tacoma, WA, Lab. Pap. No. 75, 1957.
- Eickner H. W.:
Fire retardant treated wood.
J. of Materials 1 (3), p. 625-44, 1966.
- Eickner H. W.:
Fire endurance of wood frame and sandwich wall panel.
J. of Fire and Flammability, 6 (2), p. 155-190, 1975.

- Fenner R.:
Fire retardant surface coatings in principle and practice.
BWPA, Rec. of Annual Convention, p. 101-8, 1960.
- Gardner R. E.:
Auxiliary properties of fire retardant treated wood.
For. Prod. J. 15 (9), p. 365-8, 1965.
- Gerhards C. C.:
Effect of fire retardant treatment on bending strength of wood.
U.S. For. Serv. Res. Pap., FPL 145, 1970.
- Goldstein I. S., Dreher W. A.:
A non-hygroscopic fire-retardant treatment for wood.
For. Prod. J. 11 (5), p. 235-7, 1961.
- Graham R. D.:
Strength of small Douglas fir beams treated with fire-retardants.
AWPA (American Wood Preservers' Association) Proc. 60, p. 172-7, 1964.
- Hall G. S., Hickey M.:
Fire and flame retardant treatments. Section 8 of The fire performance of timber - a literature survey.
TRADA (Timber Research and Development Association) 1972, updated and revised 1974 and 1976.
- Hirata T., Abe H.:
Effects of inorganic salts on pyrolysis of wood and cellulose, measured with TG and DTA techniques. I and II.
Bulletin of the Government Forest Exp. Sta., Tokyo, No. 263, p. 1-33, 1974.
- Holm C.:
Med brandskyddsmedel skyddat byggnadsträ. Del 1: Undersökningsresultat (helt på finska).
VTI, Helsingfors 1965.
- Holmes C. A.:
Effect of fire-retardant treatments on performance properties of wood.
In Goldstein I., Am. Chem. Soc. Symposium ser. 43, p. 82-107, 1977.
- Imaizumi K.:
Stability in fire of protected and unprotected glued laminated beams.
New Zealand For. Serv., Inform. Ser. No. 47, Wellington, N.Z., 1963.
- Jessome A. P.:
Strength properties of wood treated with fire-retardants.
Canada Dep. of Forestry, For. Prod. Res. Branch, Ottawa, Rep. No. 193, 12 p., 1962.
- Johansson F.:
Pyrolys av lignocellulosamaterial, teorier för eldskyddsbehandling, eldskyddskemiaklier.
Wallboardindustrins Centrallaboratorium meddelande nr 43 B, 1967.

- Johnson J. W.:
Bending strength of small joists of Douglas fir treated with fire-retardants.
Oregon State University, For. Res. Lab., Report T-23, 12 p, 1967.
- Johnson J. W.:
Lateral bearing strength of Douglas fir lumberplywood joints treated with fire retardants.
For. Prod. J. 25 (11), p. 38-40, 1975.
- Johnson J. W.:
Tests of fire retardant treated and untreated lumber-plywood nailed and stapled joints.
For. Prod. J. 29 (4), p. 23-30, 1979.
- King E. G., Matteson D. A.:
Effect of fire-retardant treatment on the mechanical properties of Douglas fir plywood.
Douglas fir Plywood Assoc. Lab. Rep. 90, 1961.
- King E. G., Matteson D. A.:
Effect of fire-retardant treatment on the strength of plywood.
Am. Plywood Assoc. Lab. Rep. 90, Tacoma, WA, Rev. Edition Aug. 1972.
- Kordina K., Meyer-Ottens C.:
Holz-Brandschutz-Handbuch
Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.v.
München 1983.
- LeVan S.:
Chemistry of fire retardancy.
In: Rowell R. (ed.).
The chemistry of solid wood.
Adv. in Chem. Ser. No. 207, p. 531-574, Am. Chem. Soc., Washington D.C., 1984.
- Lipska A. E., Martin S. B.:
The effect of flame retardants on thermal degradation of alfa-cellulose in nitrogen.
Contract DAHC20-70-C-0219, OCD Work Unit 2531C, SRI Project PYU-8150.
Stanford Research Institute, Final Report, Aug. 1971.
- Lipska A. E.:
The fire retardance effectiveness of high molecular weight, high oxygen containing inorganic additives in cellulosic and synthetic materials.
Contract DAHC20-70-C-0219, DCPA Work Unit 2561H, SRI Project PYU-8150.
Stanford Research Institute, Annual Report, Aug. 1972.
- Lyons J.W.:
The chemistry and uses of fire retardants.
John Wiley & Sons Inc., 1970.
- Melhotra H. L., Rogowski B. F. W.:
Fire resistance of laminated timber columns.
JFR0 Symposium No. 3, Fire and structural use of timber in buildings,
London, p. 16-51, 1970.

- Mearns R. D.:
Intumescent or other flame retardant points-horses for courses.
Fire Prevention No. 190, p. 32-34, 1986.
- Middleton J. C., Draganov S. M., Winters F. T.:
An evaluation of borates and other inorganic salts as fire retardants
for wood products.
Forest Prod. J. 15 (12), p. 463-7, 1965.
- Mitchell N. D.:
Fire tests of treated and untreated wood walls.
AWPA Proc. 43, p. 353-60, 1947.
- Norén, J., Östman B.:
Träpanelers bidrag till brandmotståndet.
TräteknikCentrum, Rapport I 8609054, 1986.
- Novotny V.:
Investigation on the effect of the increased temperature on the proper-
ties of wood impregnated with flame-retardants. (In Czech.)
Drevo 35 (7), p. 194-197, 1980.
- Ohuchi T., Kumagai Y., Ono M.:
Effect of flame retardant on the pyrolysis of wood. (In Japanese,
summary in English.)
Mokuzai Gakkaishi (Journal of the Japan Wood Res. Soc.), 18 (11),
p. 557-63, 1972.
- Parker W. J., Lipska A. E.:
A proposed model for the decomposition of cellulose and the effect of
flame retardants.
USNRDL TR-69, May 1969.
- Percival D. H., Suddarth S. K.:
An investigation of the mechanical characteristics of truss-plates on
fire retardant treated wood.
For. Prod. J. 21 (1), p. 17-22, 1971.
- Rogowski B. F. W.:
Charring of timber in fire tests.
JFRO Symposium No. 3, Fire and structural use of timber in buildings,
HMSO, London, p. 53-59, 1970.
- Rykov R. I.:
The strength characteristics under high-temperature heating of wood
treated with fire-retardant. (In Russian.)
Lesnoi Zhurnal, No. 2, p. 64-68, 1983.
- Schaffer E.L.:
Charring rate of selected woods - transverse to grain.
U.S. Forest Serv. Res. Pap., FPL 69. Forest Prod. Lab, Madison, WI,
1967.
- Schaffer E. L.:
Effect of fire-retardant impregnations on wood charring rate.
J. Fire and Flammability, Fire Retardant Chem. Suppl. 1, p. 96-109,
May 1974.

Shafizadeh F.:

The chemistry of pyrolysis and combustion.
In: Rowell R. (ed.) The chemistry of solid wood,
Adv. in Chem. Ser. No. 207 p. 489-529, Am. Chem. Soc., Washington D.C.,
1984.

Statens Planverk:

Godkännandelista B.
Typgodkännanden brandskydd (utkommer minst en gång per år).

Stefaniak J., Masnica J.:

Effect of treating beech wood with a fire-retardant on its gluability
and mechanical properties. (In Polish, summary in English.)
Prace Komisji Technologii Drewna, Poland, Vol. 9, p. 93-105, 1979

Svensson G., Östman B.:

Laksäkert och miljövänligt brandskydd av trä. Kunskapsöversikt 1983.
TräteknikRapport nr 48, 1984.

Tang W. K.:

Effect of inorganic salts on pyrolysis of wood, alpha-cellulose and
lignin by dynamic thermogravimetry.
U.S., For. Serv., Res. Pap., FPL 71, 1967.

TRADA

Flame retardant treatments for timber.
TRADA Wood Information, Dec 1982.

Van Kleeck A.:

Corrosion studies with certain fire retardant chemicals.
AWPA Proceedings, p. 160-171, 1942.

B Vilhelm Byggprodukter:

Provningsrapport från SP, Nr 76040,269A, 1977.

Webster C. T., Ashton L. A.:

Investigations on building fires. Part 4. Fire resistance of timber
doors.
DSIR. Nat. Bldg. Studies. Tech. Pap. No. 6, 1951.

White R. H.:

Use of coatings to improve fire resistance of wood.
In: M. Lieff and F. M. Stumpf. (eds.) Fire Resistive Coatings: The
Needs for Standards.
ASTM STP 826, Am. Soc. for Testing and Materials, p. 24-39, 1984.

White R. H.:

Design of fire-resistive coated wood members.
In: Spinna, R.J., Jr., (ed.) Retrofitting, Maintenance and Management
for Fire Safety - The Role of Engineering, Education and Enforcement.
Proceedings of the 3d Annual Fire Engineering Conference, Manhattan
College Fire Engineering Institute; Riverdale, NY, p. 107-125, 1985.

White R. H.:

An empirical model for predicting performance of fire-resistive
coatings in wood construction.
J. of Testing and Evaluation, 14 (2), p. 97-108, 1986.

Winandy J. E., Rowell R.M.:

The chemistry of wood strength.

In: Rowell R. (ed.) The chemistry of solid wood,
Adv. in Chem. Ser. No. 207, p. 211-255, Am. Chem. Soc.,
Washington D.C., 1984.

Odéen K.:

Fire resistance of glued, laminated timber structures.

JFRO Symposium No. 3, Fire and Structural Use of Timber in Buildings,
HMSO, London, p. 7-15, 1970.

Detta digitala dokument
skapades med anslag från
**Stiftelsen Nils och Dorthi
Troëdssons forskningsfond**

TräteknikCentrum

INSTITUTET FÖR TRÄTEKNISKE FORSKNING

Box 5609, 114 86 STOCKHOLM
Besöksadress: Drottning Kristinas väg 67
Telefon: 08-14 53 00
Telex: 14445 tratek s
Telefax: 08-11 61 88
Huvudenhet med kansli

Asenvägen 9, 552 58 JÖNKÖPING
Telefon: 036-12 60 41
Telefax: 036-16 87 98

931 87 SKELLEFTEA
Besöksadress: Bockholmsvägen 18
Telefon: 0910-652 00
Telex: 65031 expolar s
Telefax: 0910-652 65

ISSN 0283-4634