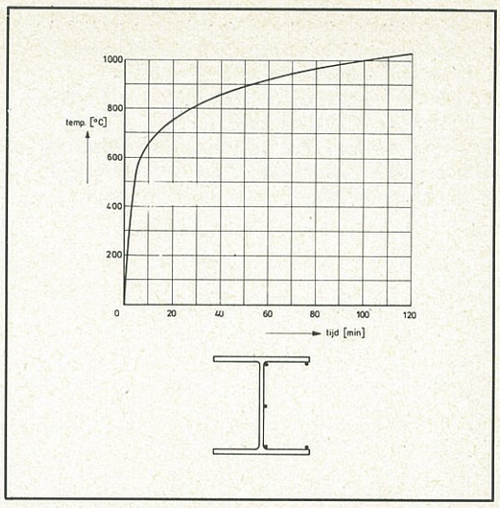
Hout als brandwerende bekleding voor stalen kolommen

door ir. L. Twilt en ir. J. Witteveen
IBBC-TNO



1, 2

In de bouw kunnen zich gevallen voordoen waarin voor staalconstructies een brandwerendheid van 30 à 60 minuten wordt geëist. In dergelijke gevallen kan het voordelen hebben om in plaats van de traditionele bekledingsmaterialen voor stalen kolommen gebruik te maken van een houten bekleding. Onderzocht is daarom in hoeverre hout technisch gezien kan voldoen aan de eisen die aan een brandwerende bekleding gesteld dienen te worden. Hiertoe zijn brandproeven verricht en is een rekenkundige benadering gegeven voor de warmtedoorgang van een vurehouten bekleding. Uit het onderzoek blijkt dat met behulp van een vurehouten bekleding brandwerendheden kunnen worden bereikt van 60 minuten.

In de praktijk doen zich gevallen voor waarbij de vraag moet worden beantwoord of een brandwerende bekleding van staalprofielen al dan niet noodzakelijk is. Besluit men in een bepaald geval tot een brandwerende bekleding dan beperkt de eis van brandwerendheid zich meestal tot maximaal 60 minuten. Lichte bekledingen zoals pleisterwerk op steengaas, spuitlagen e.d. komen dan in aanmerking. Dergelijke bekledingen zijn echter kwetsbaar, vooral bij kolommen.

Past men echter minder kwetsbare bekledingen toe, zoals metselwerk, beton of vormstukken van steenachtig materiaal dan is op grond van praktische overwegingen vaak een vrij grote minimumdikte noodzakelijk. De bekleding wordt volumineus, is bewerkelijk en heeft meestal een brandwerendheid die de vereiste verre overtreft.

Daarom is nagegaan of in die gevallen, waarin relatief lage eisen aan de brandwerendheid worden gesteld een bekleding van staal met hout mogelijkheden biedt.

Het lijkt op het eerste gezicht misschien wat paradoxaal, om een brandbaar materiaal als hout nu eenmaal is, te gebruiken om de brandwerendheid te vergroten.

De relatief gunstige brandwerende eigenschappen van houten constructies van voldoende dikte-afmetingen zijn door de vele beproevingsresultaten in binnen- en buitenland thans echter wel algemeen bekend.

Door een houten bekleding wordt weliswaar de vuurbelasting enigszins verhoogd; maar daar deze verhoging niet meer dan ca. 4 à 5 kg/m² bedraagt, speelt dit ten opzichte van de totale vuurbelasting van een gebouw nauwelijks een rol. De brandduur zal hierdoor, bij niet ingrijpen van de brandweer met globaal 4 à 5 minuten worden verlengd [1].

Men hoeft niet beducht te zijn voor een vergroting van de bijdrage tot brandvoortplanting[1] in een gebouw door een houten bekleding van de kolommen. Het totale brandbare oppervlak wordt in het algemeen immers niet noemenswaard vergroot. Bovendien vallen houtsoorten met een dichtheid $\geqq$ 790 kg/m³ zonder meer reeds in klasse II van de brandvoortplanting [2]. Vurehout, afgewerkt met het gangbare binnenverfsysteem (kleur wit) valt ook in de klasse II [3]. Zonodig kan hout met brandvertragende middelen in klasse I of II worden gebracht.

Esthetisch heeft hout het voordeel van zijn decoratieve, natuurlijke uiterlijk, terwijl de slankheid van de staalprofielen behouden kan blijven. Economisch gezien is de aantrekkelijke prijs van hout van belang; voorts is het goed bestand tegen mechanische beschadigingen. Bovendien kan een houten bekleding worden geprefabriceerd en op de bouwplaats 'droog' worden gemonteerd.

Derhalve diende te worden onderzocht of hout technisch gezien kan voldoen aan de eisen die aan een brandwerende bekleding van kolommen gesteld dienen te worden. Bekleden van liggers behoort in principe ook tot de mogelijkheden.

Werkwijze

Het onderzoek is verricht door het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, daarbij geadviseerd door de werkgroep 'Hout op Staal'[2] van het Centrum voor Houtresearch (HVI-TNO-THD). Besloten werd een aantal oriënterende proeven te verrichten ten einde vergelijkbare waarden te verkrijgen voor de mate van brandwerendheid bij toepassing van een houten bekleding als functie van de houtsoort, de houtdikte en de bevestigingswijze hout-staal.

Daarna werden, ter verifiëring van de resultaten, proeven verricht op belaste kolommen op ware grootte. Daarnaast is naar een rekenkundige benadering van de warmtedoorgang door een houten bekleding gezocht, teneinde extrapolatie van de verkregen resultaten naar andere, niet expliciet onderzochte gevallen, mogelijk te maken.

De brandproeven werden verricht bij het Centrum voor Brandveiligheid van het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies te Rijswijk (Z.H.) en bij het 'Station Experimental du Feu' van de Convention Européenne de la Construction Metallique (CECM) te Metz (Fr.).

Technische adviezen voor de bevestigingswijze van de bekleding werden gegeven door: N.V. Bouw- en Aannemingsbedrijf G. E. J. Peters en Zn. te Amsterdam.

Dit artikel geeft een samenvatting van het onderzoek. Voor meer uitvoerige informatie wordt verwezen naar [4]

De oriënterende proeven

In de eerste plaats is nagegaan welke houtsoorten en eventuele houtprodukten de voorkeur verdienden. Hiertoe is de isolerende werking onderzocht van bekledingen bestaande uit vurehout, afzelia, vurehout in combinatie met spaanplaat en verschillende soorten samengestelde panelen (Picus brandpaneel, Vedex-plaat en Multiplex-okoumé).

Met dit doel werden staalprofielen (van 1 m lengte) bekleed met de genoemde houtsoorten, onderworpen aan alzijdige verhitting volgens de standaardbrandkromme [5] (zie afb. 1).

De dikte van de toegepaste bekleding werd gevarieerd, evenals de bekledingswijze en de profielvorm (zie tabel 1).

Steeds is uitgegaan van kamerdroog hout (vochtgehalte < 10 pct.) van een goede kwaliteit. De isolerende eigenschappen van de verschillende soorten bekledingen stonden hierbij centraal. Daarom werd de verbinding hout-staal zodanig uitgevoerd dat deze tijdens de proef intact bleef.

De proefstukken werden horizontaal opgesteld. Tijdens elke proef werd de temperatuur van het staal in een aantal punten van het profiel

1 De standaardbrandkromme volgens NEN 1076
2 Plaatsing thermokoppels bij de oriënterende proeven (middeldoorsnede staalprofiel)
3 Gemeten temperaturen (vurehouten bekleding 27 mm dik, profiel HE 200 B)
4, 5 Proefstukken vlak voor en na de brandproef
6 Doorsneden van de onderzochte verbindingen
7 Vorming koollaag bij verbranden van hout

Tabel 1 Wijzen van bekleden en gebruikte materialen bij het oriënterend onderzoek

Bekledingswijze[1]	*Materialen*	*Bekledingsdikte mm*
	vurehout	div. tussen 22 en 50,8[2]
	afzelia	div. tussen 22 en 49,3[2]
	vurehout in combinatie met spaanplaat	div. tussen 18,5 en 35
	Picus brandpaneel[3]	19
	Vedex[4]	19
	Multiplex okoumé[5]	19
	vurehout	22
	afzelia	22
	vurehout	26,7
	spaanplaat	18,5-22

1. Als staalprofiel werd gebruikt: HE 200 B.
2. Voor een gespecificeerd overzicht van toegepaste dikten en meetresultaten: zie tabel H.
3. Het Picus-brandpaneel bestaat uit twee lagen multiplex met daartussen een plaat asbest met een dikte van 4,5 mm onderling verbonden d.m.v. lijnen; de plaat was gefineerd met gestoken mahonie.
4. De Vedex-plaat is geïmpregneerd multiplex afkomstig uit Denemarken, gefineerd Oregon Pine.
5. De multiplex-plaat was gefineerd met gestoken mahonie.

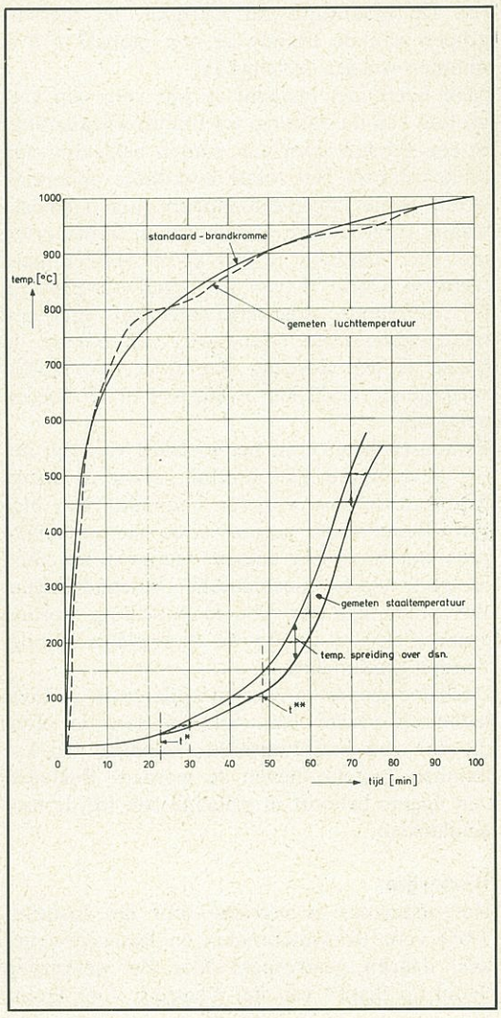
Tabel 2 Overzicht van de oriënterende proeven met een kokervormige bekleding van vurehout en afzelia op een HE 200 B profiel (profielfactor 102 m^{-1})

	Bekledingsdikte mm	*Tijd in minuten waarbij een gem. staaltemp. werd bereikt van:* 200 °C	300 °C	450 °
Vurehout	22,0	42	50	59
	27	55	61	69
	45,0	69	77	83
	50,8	76	89	101
Afzelia	22,0	42	47	52
	25,4	57	64	71
	37,5	76	88	101
	45,0	80	90	>120
	49,3	>120	>120	>120

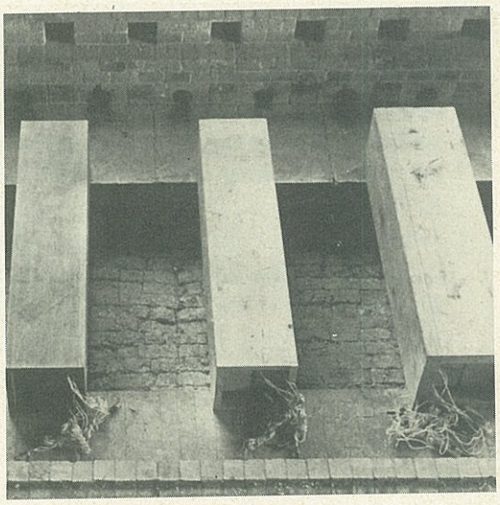
door middel van thermokoppels (afb. 2) gemeten en geregistreerd als functie van de tijd. Afbeelding 3 geeft een beeld van de meetresultaten van een proef. Afbeelding 4 en 5 laten proefstukken zien vóór en na de brandproef. Voor een meer gedetaileerde beschrijving van de proefstukken, de uitvoering en de meetresultaten wordt verwezen naar [4].

De resultaten van het oriënterend onderzoek wettigden de verwachting dat, althans bij toepassing van kokervormige bekledingen bestaande uit vurehout of afzelia, een brandwerendheid in de orde van 60 minuten kan worden bereikt (zie tabel 2).

Afzelia, waarmee weliswaar en zeker bij grotere dikten aanzienlijk betere resultaten werden bereikt, is verder niet onderzocht omdat bij deze houtsoort mag worden verwacht dat de resultaten altijd beter zullen zijn dan bij vurehout. De overige onderzochte bekledingsmaterialen en -typen werden uitgesloten vanwege de voor dit doel minder geschikte eigenschappen [4].



3



4

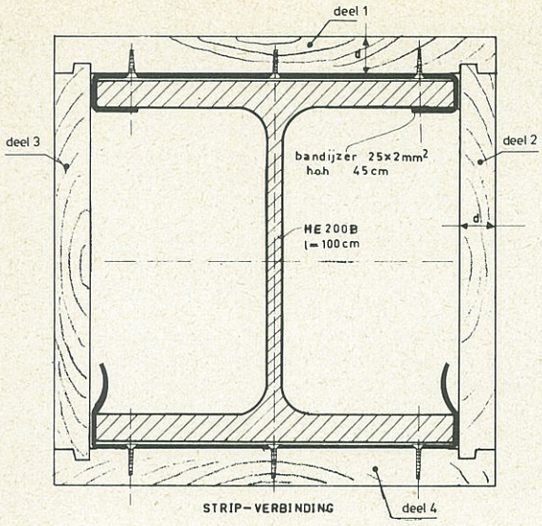
5

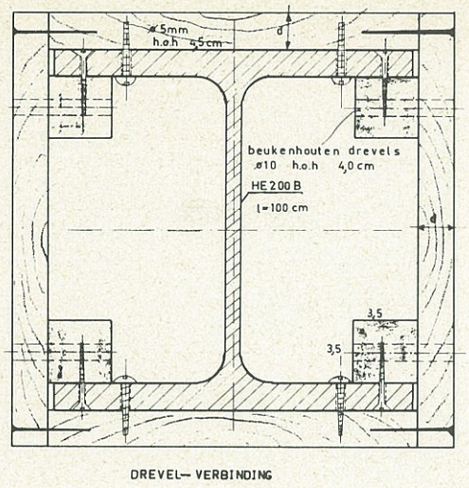
Bevestigingswijze

We hebben daarna gezocht naar een geschikte bevestigingswijze van de bekleding. De verbinding hout-staal dient namelijk zodanig te zijn dat het verloop van de staaltemperaturen er niet ongunstig door wordt beïnvloed.

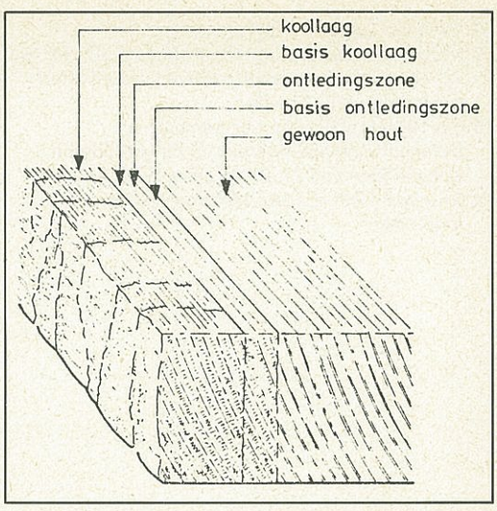
Met twee typen verbindingen was dit betrekkelijk eenvoudig te realiseren (afb. 6a en 6b). Bij de eerste verbinding wordt gebruik gemaakt van bandijzeren strippen (h.o.h. 450 mm) die om de flenzen van het staalprofiel kunnen worden geklemd. De houten delen sluiten met een tandverbinding in elkaar. Om kiervorming zo-

6





7



veel mogelijk te voorkomen werden de houten delen bovendien verlijmd met Resorcinol Formaldehydelijm.[3]

Bij het tweede verbindingstype is de bekleding met m.b.v. schroeven met het staalprofiel verbonden. De benodigde latten zijn door middel van drevels aan de houten bekleding bevestigd. Het toepassen van deze houten drevels geschiedde om inbranding ten gevolge van verhitting van de schroeven te voorkomen. Ook in dit geval zijn, om kiervorming te voorkomen de houten delen met Resorcinol Formaldehydelijm verlijmd. Bovendien zijn met dit doel nagels (h.o.h. 20 cm) aangebracht. Teneinde het gedrag van deze verbindingen onder brandomstandigheden te onderzoeken werden ovenproeven verricht.

Hierbij zijn de beklede proefstukken van 1 m lengte onderworpen aan een temperatuurstijging volgens de standaardbrandkromme. De proefstukken werden verticaal opgesteld.

In tabel 3 is aangegeven na hoeveel minuten een gemiddelde staaltemperatuur van respectievelijk 200, 300 en 450°C werd bereikt. Ter vergelijking zijn ook de resultaten van overeenkomstige proeven uit het oriënterend onderzoek aangegeven. Hieruit blijkt dat de proefresultaten niet significant verschillen met die van de proeven waarbij uitsluitend de isolerende werking van het hout werd onderzocht. Dit betekent dat door de toegepaste verbindingstypen het temperatuurverloop in de staalprofielen niet ongunstig wordt beïnvloed.

De thermische isolatie bij de verbindingstypen blijkt gelijkwaardig. Het boren van gaten in de flenzen van een staalkolom in het werk zal echter op bezwaren stuiten, daar de timmerman meestal niet over de juiste boorapparatuur beschikt. Ook is het schroeven in het staalprofiel ongemakkelijk, vooral bij kleinere profielen. Door fixatie aan het staal is het risico van scheuren van het hout door krimp bovendien groot. Op grond hiervan is gekozen voor de oplossing volgens afbeelding 6a.

Uitvoering

De bandijzeren strippen dienen van tevoren op de delen 1 en 4 te worden aangebracht (de strippen eventueel in 2 delen te maken zodat ze voor elk profiel passend zijn).

De schroefgaten moeten ruim of sleuvend zijn gemaakt om eventuele krimp te kunnen opvangen. Rondom het profiel dient minstens 3 mm vrijgehouden te worden, eveneens in verband met krimp.

Het monteren gaat als volgt. Deel 1 eerst bevestigen, beugels omslaan. Na alle verbindingsplaatsen van lijm te hebben voorzien, de delen 2 en 3 insteken, daarna deel 4 om het profiel snappen. Het geheel vervolgens met lijmtangen klemmen.

De hartzijde van het kunstmatig gedroogde (vochtgehalte ca. 10 pct.) hout moet bij de delen 1 en 4 naar buiten, bij 2 en 3 naar binnen worden gericht. Hierdoor zullen bij eventuele krimp (hout krimpt van het hart af), de lijmnaden worden dichtgedrukt. Bij kwartiersgezaagd hout speelt dit natuurlijk geen rol.

Analyse van de warmte-overdracht door een vurehouten bekleding

Met het doel de gevonden resultaten te kunnen interpreteren voor profielen met een willekeurige profielfactor[4] en bekledingsdikte, is gezocht naar een rekenkundige beschrijving van de warmte-overdracht. Hiertoe was een nadere analyse noodzakelijk van de gemeten temperatuurverlopen.

Bij verhitting van hout neemt men aanvankelijk een zwarte verkleuring van het verhitte oppervlak waar, die weldra overgaat in een duidelijke verkoling (afb. 7). Deze verkoling is een chemische omzetting waarbij de buitenste lagen ontleden in houtskool en brandbare gassen. De houtskoollaag oefent een beschermende werking uit, doordat de temperatuur waarbij houtskool verbrandt hoger is en het warmtegeleidingsvermogen ca. 4x kleiner is dan bij hout. De vorming van de houtskoollaag betekent in eerste instantie dus een gunstige factor met betrekking tot de thermische isolatie van een houten bekleding.

De verkoling is echter een voortschrijdend proces. Naarmate de koollaag dikker wordt, zullen er barsten in optreden of zelfs stukken van afspringen. Ook is het mogelijk dat scheuren optreden in de achterliggende laag.

Duidelijk zal zijn dat de isolerende werking van een houten bekleding hierdoor ongunstig wordt beïnvloed.

Bij doorgaande verkoling zal ten slotte de samenhang verloren gaan. Bij een houten bekleding betekent dit dat deze zal bezwijken. De thermische isolatie is in dit stadium grotendeels teniet gegaan.

De thermische isolatie van een houten bekleding wijzigt dus als functie van de brandduur. Een belangrijke parameter is hierbij de snelheid waarmee de verkoling voortschrijdt (de zgn. inbrandsnelheid van hout).

Naar de factoren die de inbrandsnelheid be-

Tabel 3 Overzicht en resultaten van het modelonderzoek naar de verbinding hout-staal

Proef no.	*Profiel*	*Omkledings-wijze*	*Omkledings-materiaal*	*Omkledings-dikte [mm]*	*Profiel-factor [m⁻¹]*	*Tijd in min. waarbij een gemiddelde staaltemp. wordt bereikt van** 200 °C	300 °C	450 °C	*Resultaten overeenkomstige proeven waarbij slechts de isolerende werking der bekleding werd onderzocht* 200 °C	300 °C	450 °C
V-1	HE 200B		vurehout	27	102	50	55	62			
V-1[1]						51	59	67	55	61	69
V-2	HE 200B		vurehout	22	102	42	48	57			
V-2[1]						43	50	60	42	50	59
V-3	HE 200B		vurehout	27	102	50	55	62			
V-3[1]						51	60	67	55	61	69
V-4	HE 200B		vurehout	22	102	44	51	55			
V-4[1]						43	48	54	42	50	59

* Zie voor toelichting op het begrip 'profielfactor': [7], [8]

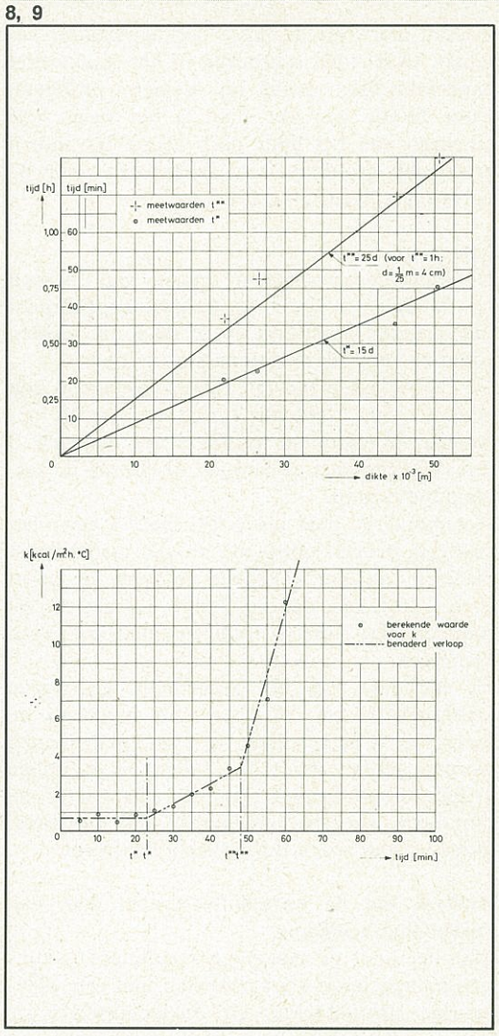
8 Verband tussen houtdikte en t*, t**
9 Verband tussen warmtedoorgangscoëff. en tijd bij één der oriënterende proeven (vurehouten bekleding: d = 27 mm)
10 t/m 13 Vergelijkingen van gemeten en berekende staaltemperaturen bij vurehouten bekledingen van 22, 27, 45 resp. 50 mm dikte
14 Interieur oven te Metz, met een van de kolommen

Tabel 4 De fasen in het gedrag van een vurehouten bekleding tijdens brand

Fase	*Brandduur*	Warme-doorgangscoëff. k	*Fysische achtergrond*
I	$o < t < t^*$	k is praktisch constant	gesloten koollaag
II	$t^* < t < t^{**}$	k neemt lineair toe met de tijd	voortgaande verkoling; eerste defecten in koollaag
III	$t > t^{**}$	k neemt lineair toe met de tijd; toename aanzienlijk groter dan bij II	bekleding is doorgebrand

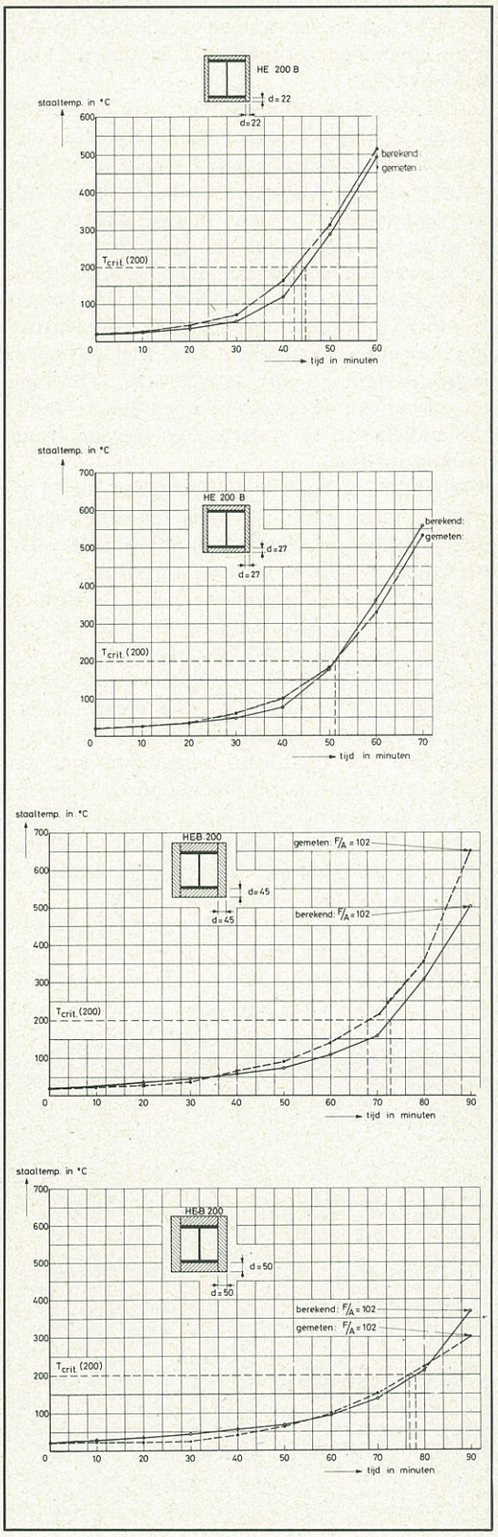
invloeden is door verschillende onderzoekers gezocht [6].
De uitgangspunten die aan deze onderzoekingen ten grondslag hebben gelegen zijn vaak verschillend en ondoorzichtig. Niettemin is het mogelijk om uit de verschillende resultaten, althans voor naaldhout een vuistregel op te stellen. Deze luidt inbrandsnelheid: 4 cm/uur = 0,67 mm/min. [6]
Ondersteld wordt hierbij een volumegewicht van het hout van ca. 450 kg/m³ bij een vochtgehalte van 10 pct. (kamerdroog).
Daar in géén van de literatuurbronnen wordt ingegaan op de consequenties van de inbrandsnelheid op de isolatie-eigenschappen is besloten op dit punt nader onderzoek te verrichten. Met dit doel is het staaltemperatuurverloop, gevonden bij de proeven met een vurehouten bekleding aan een nadere analyse onderworpen. Hiervoor kwamen in het totaal acht proeven in aanmerking met bekledingsdikten van 22, 27, 45 en 50,8 mm.
Het verband tussen temperatuur en tijd, gevonden bij één der proeven (afb. 3) bleek symptomatisch voor alle overige proefresultaten.
Tot een zekere tijd (= t*) blijken de gemeten staaltemperaturen zeer dicht bijéén te liggen; daarna treedt spreiding op in de staaltemperatuur van de doorsnede. Voorbij t** blijkt de stijging van de gemiddelde staaltemperatuur aanzienlijk toe te nemen.
Voor de hand ligt te onderstellen dat bij t* de eerste belangrijke barsten en scheuren in de koollaag zich gaan vormen, terwijl bij t** de houten bekleding is doorgebrand maar nog niet geheel is weggevallen.
In afbeelding 8 zijn waarden van t* en t** uitgezet als functie van de houtdikte. Het blijkt dat t* en t** bij redelijke benadering lineair met de dikte verlopen.
Voor t** blijkt dit verband, zoals te verwachten was, redelijk overeen te stemmen met de bekende waarde voor de inbrandsnelheid (40 mm/uur).
Om een rekenkundige benadering van het verloop van de staaltemperatuur mogelijk te maken, is het nodig de isolerende eigenschappen van de bekleding te kennen.
De isolerende eigenschappen van een bekleding met een zekere dikte kunnen worden gekarakteriseerd door de zgn. warmtedoorgangscoëfficiënt (= K) [7].
In afbeelding 9 is K uitgezet tegen de tijd voor de proef waarvan in afbeelding 3 het verloop van de staaltemperatuur is weergegeven. De

8, 9



k-waarden zijn teruggerekend uit de gemiddelde staaltemperatuur.
De eerder genoemde fasen (zie tabel 4) afgebakend door t* en t**, zijn duidelijk te onderscheiden. In deze fasen is het verband tussen K en de tijd (afb. 9) met goede benadering lineair. Dit bleek ook uit de overige proeven. Het bleek mogelijk analytische uitdrukkingen te vinden voor de verschillende fasen van het verloop van K met de tijd als functie van de bekledingsdikte [4].
Om tot enigszins hanteerbare formules te komen was het echter noodzakelijk de k-t-diagrammen, zoals die volgden uit de proefresultaten, te schematiseren. Dit betekent dat de overeenkomst tussen rekenmodel en proefresultaat niet altijd even goed is.
Een indruk van de gemaakte fouten is te

10 t/m 13

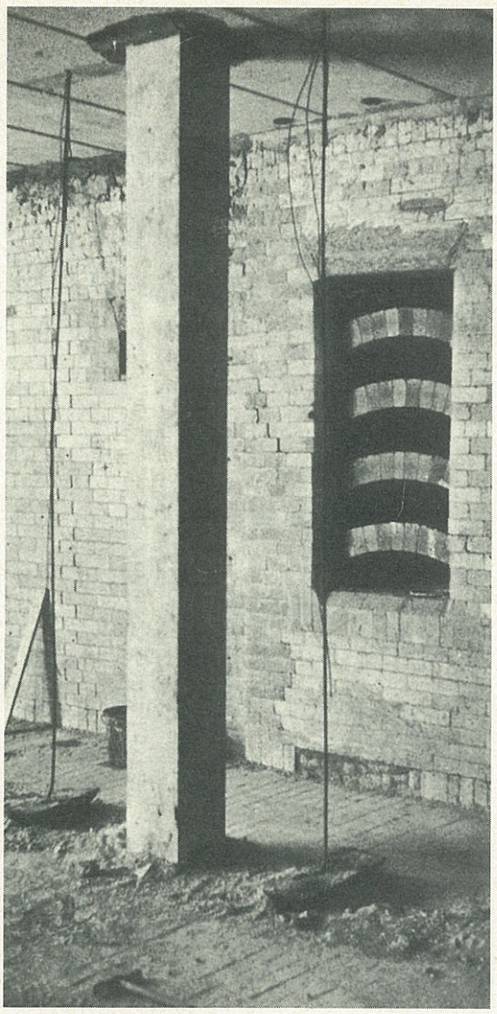


verkrijgen door met behulp van de gevonden uitdrukking voor K de temperatuur-tijddiagrammen terug te rekenen.
De op deze wijze verkregen resultaten zijn in de afbeeldingen 10 t/m 13 vergeleken met de meetresultaten.
Het blijkt dat met name voor d = 45 mm afwijkingen optreden tussen het berekende en het gemeten temperatuurverloop. Gezien de vrij grote spreiding van de gemeten temperaturen over de staaldoorsnede (afb. 2) lijken de gevonden afwijkingen echter niet alarmerend.
De in het voorgaande geschetste analytische benadering van de warmtedoorgang opent daarom de mogelijkheid tot een extrapolatie van de gevonden proefresultaten naar andere houtdikten en profielfactoren. Op de resultaten van deze extrapolatie wordt nog teruggekomen. In dit verband wordt opgemerkt dat bij zeer kleine houtdikten de genoemde betrekkingen hun betekenis verliezen. Verwacht moet worden dat reeds bij de eerste scheuren de samenhang van de bekleding verloren zal gaan. Welke dikte in dit verband kritisch is, is op grond van het onderzoek niet te zeggen. Daarom wordt voorgesteld de geldigheid van de genoemde betrekkingen te beperken tot 20 mm (≈ dunste bekledingsdikte, waarvan experimentele gegevens ter beschikking staan). De beperking zal praktisch van weinig belang zijn daar bekledingsdikten kleiner dan 20 mm door hun kwetsbaarheid (mechanische beschadiging, krimpscheuren) weinig zinvol lijken.
In principe zal ook bij zeer grote bekledingsdikten de geldigheid van de genoemde betrekkingen verloren gaan. In dergelijke gevallen mag echter verwacht worden dat de theoretische benadering wèl een veilige waarde voor K zal opleveren. [4] Te meer daar planken met een dikte van meer dan 100 mm in de handel niet voorkomen lijkt het aangeven van een bovengrens voor de bekledingsdikte in verband met de voorgestelde berekeningsmethode niet nodig.

Proeven op ware grootte

Ter controle van de resultaten van het modelonderzoek, werden twee identieke ovenproeven uitgevoerd op kolommen op ware grootte, met een lengte van 3,40 m en centrisch belast volgens de T.G.B. 1972-Staal. De kolommen werden bekleed met vurehout (dikte 28 mm). Deze proeven werden uitgevoerd bij het Station Experimental du Feu van de Commission Européenne de la Construction Metallique (CECM) te Metz (Fr.) (zie afb. 14).

14

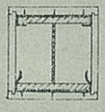


Als bevestigingstype werd de stripverbinding volgens 6a gekozen. De staaltemperatuur werd gemeten in de middendoorsnede en in de twee doorsneden op een afstand van ca. 1150 mm hiervan. Per doorsnede werd in zeven punten de staaltemperatuur gemeten.
De luchttemperatuur werd in de oven opgevoerd volgens de standaardbrandkromme. Er werd voor gezorgd dat de belasting op de kolom tijdens de proef constant bleef. De staaltemperaturen werden geregistreerd als functie van de brandduur.
De beide kolommen bleken een vrijwel gelijke brandwerendheid op bezwijken te bezitten. De gemiddelde staaltemperatuur bij bezwijken varieert nogal sterk over de verschillende doorsneden. Ook zijn per doorsnede aanzienlijke temperatuurvariaties gemeten, (tabel 5) die zijn veroorzaakt door het plaatselijk ontstaan van gaten in de bekleding (zie afb. 15 en 16).
Bij proef W-I ontstond zo'n gat na ca. 50 minuten; bij proef W-II na ca. 40 minuten. Heeft zich eenmaal een gat gevormd dan wordt dit vrij snel groter. De plaats waar het defect ontstaat is willekeurig. Zo was dit bij proef I het geval vlak onder het dak van de oven. Ter plaatse van het defect zal de staaltemperatuur per doorsnede aanzienlijk variëren, terwijl de gemiddelde temperatuur in zo'n doorsnede veel sneller zal stijgen dan op plaatsen waar de bekleding nog intact is gebleven.
Bij de modelproeven werden effecten als hierboven omschreven niet of in veel mindere mate waargenomen.
Er wordt op gewezen dat het temperatuurverloop in die doorsneden van de kolommen, waarbij géén duidelijke defecten in de omkleding zijn opgetreden redelijk kan worden benaderd met behulp van het rekenmodel (afb. 15 en 16).
Bij het dimensioneren van een brandwerende bekleding zal men ervoor dienen te zorgen dat bij een voorgeschreven brandduur de kritische temperatuur[5] niet wordt bereikt. Voor kolommen kan worden aangenomen dat deze kritische temperatuur, bij belasten volgens de geldende voorschriften en gelijkmatige verhitting ca. 400 à 450°C bedraagt[6].
Gezien het optreden van de aanzienlijke temperatuurvariaties, zowel over de doorsnede als ook over de lengte van de met hout omklede kolommen, lijkt het niet juist ook in deze gevallen te rekenen met een kritische temperatuur van 400 à 450°C.
Dit spreekt eens te meer, daar de ontwikkelde methode ter bepaling van de staaltemperatuur slechts gemiddelde temperaturen oplevert. Bovendien is ze gebaseerd op de modelproeven, waarbij de gemeten temperatuurvariaties aanzienlijk kleiner waren dan bij de proeven op ware grootte.
Daarom wordt voorgesteld de kritische temperatuur van kolommen met een vurehouten bekleding, berekend op de aangegeven wijze, te stellen op 200°C.

Op deze wijze gedefinieerd, wordt voor de brandwerendheid van de onderzochte kolommen gevonden:

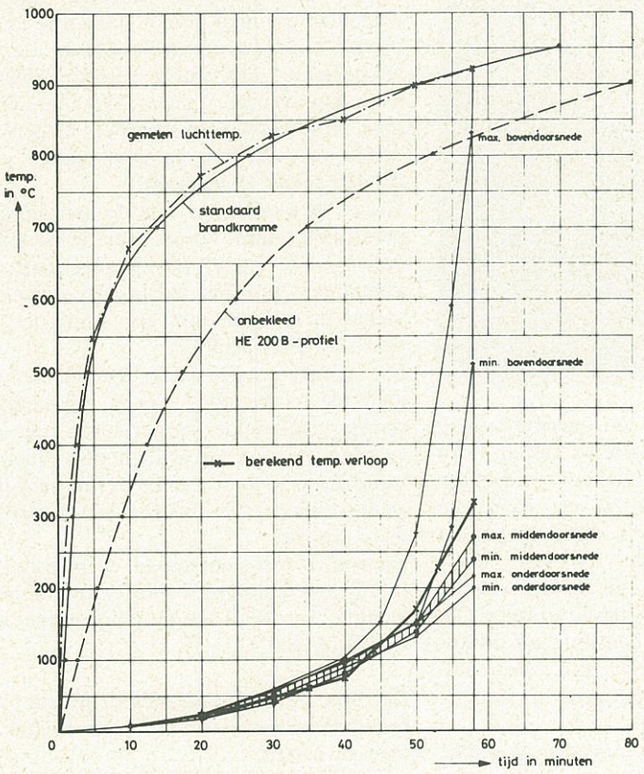
	brandwerendheid in minuten	
	berekend	*gemeten*
Proef W-I:	52	59
Proef W-II:	52	54

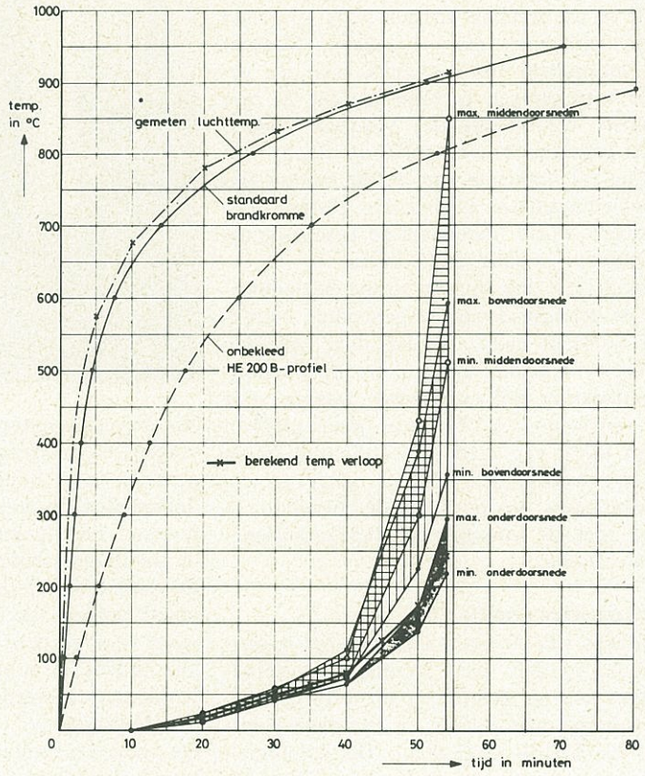
Tabel 5 Overzicht en resultaten van het onderzoek op kolommen op ware grootte

Proef no.	*Profiel*	*Omkledingswijze*	*Omkledingsmateriaal*	*Omkledingsdikte [mm]*	*Profielfactor [m⁻¹]*	*Brandwerendheid gecorreleerd aan bezwijken [min]*	*Gemiddelde temperatuur bij bezwijken [°C]*		
							bovendsn.	middendsn.	onderdsn.
W - 1	HE 200B		vurehout	28	102	59	700	250	212
W - 2	HE 200B		vurehout	28	102	54	460	700	250

15 Verband tussen brandtijd en staaltemperatuur bij proef W-1
16 Verband tussen brandtijd en staaltemperatuur bij proef W-2
17 Verband tussen elasticiteitsmodulus en staaltemperatuur
18 Ontwerpgrafiek ter bepaling van de dikte van vurehouten bekledingen

15





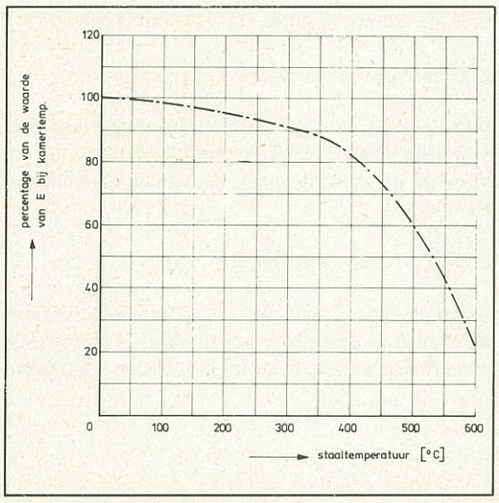
De veiligheid van 200 à 250°C die op deze wijze in acht wordt genomen ten opzichte van de gebruikelijke kritische temperatuur, moet gezien worden als een additionele zekerheid voor het optreden van temperatuurvariaties tengevolge van plotseling tot stand komende defecten.
De drastische verlaging van de kritische temperatuur heeft betrekkelijk geringe gevolgen voor de te vinden brandwerendheid. Dit wordt veroorzaakt door het vrij steile verloop van de berekende temperatuurlijnen bij staaltemperaturen hoger dan ca. 200°C.

Samenvatting en conclusies; praktijkregels
In het voorgaande is aangetoond dat het mogelijk is door middel van een houten, kokervormige bekleding afhankelijk van houtdikte en houtsoort, voor kolommen een brandwerendheid te verkrijgen van ca. 60 minuten.
Voor vurehout als bekledingsmateriaal en een houtdikte van meer dan 20 mm is een methode ontwikkeld om de staaltemperatuur onder beproevingsomstandigheden ook rekenkundig te benaderen.
Op grond van proeven op centrisch belaste kolommen van ware grootte is besloten de kritische temperatuur van met hout beklede stalen kolommen, berekend volgens de genoemde methode te stellen op 200°C. Deze relatief lage kritische temperatuur moet worden aangehouden als gevolg van het optreden van plaatselijke defecten in de bekleding.
In hoeverre de bovenstaande resultaten ook toepasbaar zijn voor het geval van met hout beklede stalen liggers is in het kader van dit onderzoek niet nagegaan. Liggers zullen voornamelijk op buiging worden belast, met gevolg dat het vervormingsgedrag bij verhitting ongunstiger zal zijn bij (centrisch belaste) kolommen. Dit betekent dat aan de vervormingscapaciteit van de houten bekleding hogere eisen gesteld moeten worden dan bij kolommen. Daar echter de kritische temperatuur op slechts 200°C is gesteld mag worden verwacht dat de vervorming van liggers bij de bereikte brandwerendheid betrekkelijk klein is (afb. 17). Daarom lijkt het verantwoord ook bij met hout beklede liggers uit te gaan van de vermelde resultaten.
Uitgaande van een kritische temperatuur van 200°C kan, via berekening, een ontwerpgrafiek als in afb. 18 worden getekend.
Het verband tussen houtdikte en brandwerend-

Tabel 6 Overzicht van de F/A-factoren voor kokervormig beklede HE-B en HE-M-profielen

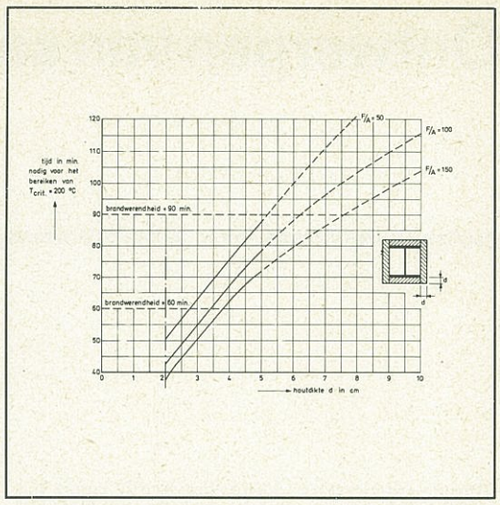
aanduiding HE-A profielen	*F/A* [m^{-1}]	*aanduiding HE-B profielen*	*F/A* [m^{-1}]	*aanduiding HE-M profielen*	*F/A* [m^{-1}]
100	184	100	152	100	84
120	184	120	142	120	80
140	173	140	130	140	76
160	160	160	118	160	72
180	154	180	110	180	68
200	144	200	102	200	65
220	132	220	96	220	61
240	122	240	92	240	52
260	118	260	88	260	50
280	112	280	85	280	49
300	104	300	80	300	43
320	98	320	76	320	43
340	96	340	74	340	43
360	90	360	72	360	44
400	86	400	70	400	44
450	82	450	69	450	46
500	80	500	67	500	48
550	78	550	67	550	50
600	80	600	67	600	51
650	76	650	66	650	52
700	74	700	64	700	52
800	74	800	66	800	54
900	73	900	65	900	56
1000	73	1000	65	1000	60

heid is afhankelijk van de profielfactor (= F/A). Hierbij is:
F = omtrek van de kolom per m¹, gemeten langs de binnenzijde van de omkleding (niet te verwarren met het verfoppervlak).
A = staalinhoud per m¹.
Zoals in hoofdstuk 5 wordt uiteengezet is gebruik van afb. 18 slechts gemotiveerd voor bekledingsdikten groter dan 20 mm.
De invloed van die profielfactor blijkt op de brandwerendheid althans bij courante houtdikten betrekkelijk gering.
Er wordt op gewezen dat bij de berekening is ondersteld dat na het doorbranden van de omkleding (fase III) de profielfactor geldend voor het onbeklede profiel maatgevend is.
Dit is in rekening gebracht door de profielfactor van het omklede profiel in fase 3 met een factor 1,4 te vermenigvuldigen. Deze vuistregel geldt bij goede benadering voor profielen die veel gebruikt worden voor kolommen zoals HE-M en HE-B profielen. De in afb. 18 gegeven ontwerplijnen gelden dan ook strikt genomen slechts voor deze profielseries. In tabel 6 zijn voor de HE-M en HE-B profielen de in rekening te brengen F/A-factoren opgenomen [8].
Bij toepassing van loofhoutsoorten[7] zoals afzelia zullen de ontwerplijnen van afb. 18 voor dikten van 20 à 30 mm een goede benadering vormen. Bij grotere dikten (40 à 50 mm) blijkt op grond van het oriënterende onderzoek loofhout zich gunstiger te gedragen dan vurehout.
De ontwerplijnen geven in dit geval dus een te lage waarde voor de brandwerendheid. Daar voor brandwerendheden van ongeveer 60 minuten de verschillen niet significant zijn wordt er de voorkeur aan gegeven voor loofhout geen aparte ontwerplijnen aan te geven, maar uit te gaan van de voor vurehout afgeleide betrekkingen.
Tenslotte wordt de aandacht erop gevestigd dat de gegeven conclusies en methoden slechts kunnen worden gehanteerd onder uitdrukkelijke voorwaarde dat de bekleding onder gebruiksomstandigheden een gesloten geheel blijft vormen. Met name wordt hierbij gedacht aan de mogelijkheid van scheurvorming tengevolge van uitdroging.
Het is daarom gewenst uit te gaan van goed gedroogd hout (minstens kamerdroog) en bovendien van Resorcinol Formaldehydelijm. Ook het aanbrengen van de bekleding zal, zoals ook bij andere bekledingen, met de nodige zorg moeten worden uitgevoerd. In dit verband



17

18



wordt gewezen op de aanwijzingen ten aanzien van de uitvoering van de verbinding houtstaal zoals gegeven onder 'uitvoering'.

1. In NEN 3883 is het begrip 'bijdrage tot brandvoortplanting' in de plaats gekomen van de begrippen 'vlamuitbreiding' en 'bijdrage tot vlamoverslag' zoals omschreven in NEN 1076.
2. De werkgroep 'Hout op Staal' ressorteerde onder de Commissie van Onderzoek VI 'Brandveiligheid en hout' van het Centrum voor Houtresearch en was als volgt samengesteld:
   Ir. W. N. de Bruijn - voorzitter. Technische Hogeschool - Delft. Ir. H. Kammer. Bond van Ned. Architecten BNA. Ir. F. J. van Sante. Ratiobouw. D. J. van Amstel - secretaris. Houtvoorlichtingsinstituut. Ir. W. K. Dikland. Technisch bureau Brandschadepreventie.
   J. M. W. Beenhakker, Regionaal Commandant Brandweerkring Walcheren (voordien: Technisch Bureau voor Brandschadepreventie).
   M. Wolthoff. Rijksinspectie voor het Brandweerwezen.
   Dr. J. F. van Elteren, Ir. J. Witteveen, Ir. L. Twilt. Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies en het Centrum voor Brandveiligheid van dit instituut.
3. Resorcinol-Formaldehydelijm is een thermohardende lijm die weinig drukgevoelig is, goed spleetvullend, prettig te verwerken en ook onder minder gunstige verwerkingsomstandigheden later alsnog uithardt. Uit vele brandproeven met gelamineerde balken in het buitenland bleek dat de lijmlagen van thermohardende lijmen bij verhitting niet loslieten.
4. Voor een toelichting op het begrip 'profielfactor' wordt verwezen naar [7], [8].
5. De kritische temperatuur — afhankelijk van de belasting en van de aard van de constructie — is de temperatuur waarbij de constructie of een constructiedeel zijn draagkracht verliest.
6. Een nader onderzoek naar het gedrag van stalen kolommen onder brandomstandigheden is momenteel gaande bij IBBC-TNO.
7. De uitdrukking hardhout is hier bewust niet gebruikt omdat in de handel hieronder mede Amerikaans naaldhout wordt verstaan waarover géén gegevens bekend zijn.

Literatuur

[1] NEN 3891: Richtlijnen brandbeveiliging van gebouwen, deel 1 - Algemeen gedeelte: Nederlands Normalisatie Instituut. December 1971.
[2] D. J. v. Amstel: Brandeigenschappen van hout: Invloed van het volumegewicht op de vlamuitbreiding. BOUW nr. 33/34 - 15/22-8-1970.
[3] D. J. v. Amstel: Invloed van verf en vernis op de brandeigenschappen van hout. BOUW nr. 5, 31-1-1970.
[4] Ir. L. Twilt, ir. J. Witteveen: Hout als brandwerende bekleding voor stalen kolommen. Rapport TNO-IBBC B-73-94.
[5] NEN 1076: Onbrandbaarheid, vlamuitbreiding, bijdrage tot vlamoverslag en ontvlambaarheid van bouwmaterialen. Brandwerendheid van bouwconstructies. Methoden van onderzoek. Nederlands Normalisatie Instituut. Oktober 1963.
[6] Dr. C. W. van Hoogstraten: Literatuurstudie inbrandsnelheid van hout. Rapport TNO-IBBC BV-69-57.
[7] Ir. J. Witteveen: Brandveiligheid staalconstructies. Publikatie van de Commissie Research Staalconstructies. Stichting Centrum Bouwen in Staal.
[8] Ir. L. Twilt, C. H. M. de Koning: De bepaling van de profielfactor van staalprofielen afhankelijk van de bekledingswijze. Rapport TNO-IBBC BI-69-65.