



# LUND UNIVERSITY

## Jämförelse av två modeller för analys av trä som pyrolyseras

Fredlund, Bertil

1986

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Fredlund, B. (1986). *Jämförelse av två modeller för analys av trä som pyrolyseras*. (LUTVDG/TVBB--3027--SE; Vol. 3027). Division of Building Fire Safety and Technology, Lund Institute of Technology.

*Total number of authors:*

1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00



LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY · LUND · SWEDEN  
DIVISION OF BUILDING FIRE SAFETY AND TECHNOLOGY  
REPORT LUTVDG/(TVBB - 3027)  
ISSN 0282 - 3756

BERTIL FREDLUND

# JÄMFÖRELSE AV TVÅ MODELLER FÖR ANALYS AV TRÄ SOM PYROLYSERAS

LUND 1986

Division of Building Fire Safety  
and Technology  
Lund Institute of Technology  
Box 118  
S-221 00 LUND, Sweden  
Tel +46-46-10 73 60

Report LUTVDG/(TVBB-3027)(1986)

ISSN 0282-3756

Bertil Fredlund

JÄMFÖRELSE AV TVÅ MODELLER FÖR ANALYS AV TRÄ SOM PYROLYSERAS

LUND 1986

INNEHÅLL	Sida
1 Värmeavgivningsmodell enligt Parker	1
1.1 Teoretisk behandling	1
1.2 Datorprogram	5
1.3 Erforderliga indata	8
1.4 Utdata	8
1.5 Validering	10
1.6 Begränsningar	13
1.7 Utvecklingsmöjligheter	15
2 Temperatur och förenklingsmodell enligt Fredlund	16
2.1 Teoretisk behandling	16
2.2 Datorprogram	21
2.3 Erforderliga indata	25
2.4 Utdata	27
2.5 Validering	29
2.6 Begränsningar	34
2.7 Utvecklingsmöjligheter	34
3 Diskussion	36
REFERENSER	39

# 1 VÄRMEAVGIVNINGSMODELL ENLIGT PARKER

## 1.1 Teoretisk behandling

Den kinetiska modellen enligt Parker /1/ bygger på arbeten av Atreya /2/. Målsättningen är att med hjälp av modellen bestämma värmeavgivning från trämaterial vid termisk påverkan.

Trämaterialet delas inledningsvis in efter träets beståndsdelar cellulosa, hemicellulosa och lignin, samt vatteninnehåll. Varje komponents avtagande i massa vid pyrolysen antas följa var sin Arrheniusfunktion.

Värmeavgivningen vid en given tidpunkt beräknas genom att summera energiinnehållet i de individuellt producerade pyrolysgaserna i hela tvärsnittet och med antagande om att dessa förbränns fullständigt utanför materialytan. Det antas att termodynamisk jämvikt existerar mellan den fasta fasen och pyrolysgaserna dvs pyrolysgaserna och den fasta fasen har samma temperatur i en liten omgivning till en viss koordinat. Vidare antas att de producerade gaserna fritt kan röra sig ut ur den fasta fasen dvs inga tryckgradienter eller hastigheter för pyrolyprodukterna kan beräknas. Några ytterligare kemiska reaktioner i träkolsfasen beaktas ej.

I modellen delas en träbaserad skiva in i ett antal lika stora skivor parallella med ytan. För varje subskiva definieras en massfaktor  $Z_i$  enligt

$$Z_i = \frac{m_i}{m_i^0} = \frac{\rho}{\rho_0} \ell_x \ell_y \ell_z \quad (1)$$

där

$m_i$  = ugnstorr massa av subskiva  $i$  vid tiden  $t$

$m$  = ursprunglig ugnstorr massa

$\rho$  = ugnstorr densitet vid tiden  $t$

$\rho_0$  = ursprunglig ugnstorr densitet

$\ell_x$  = krympfaktor i x-led, tjocklek

$\ell_y$  = krympfaktor i y-led, bredd

$\ell_z$  = krympfaktor i z-led, höjd

Massfaktorn erhålls som en summa från de individuella träkomponenterna

$$Z_i = \sum_{k=1}^h Z_{i,K} \quad (2)$$

där

$Z_{i,k}$  = massan av komponent k för subskiva i dividerad med den ursprungliga massan för hela subskivan.

Fukttinnehållet behandlas på ett analogt sätt genom att införa en fukt-faktor

$$Z_{w_i} = \frac{m_{w_i}}{m_i^0}$$

där

$m_{w_i}$  = är massan av adsorberat vatten i subskiva i vid tiden t

Den vattenånga som bildas vid pyrolysen inkluderas i  $Z_i$  faktorn.

Massförlusthastigheten  $\dot{m}_i$  per tids- och ursprunglig ytenhet för ugnstorr material ges av

$$\dot{m}_i(t) = \rho_0 \frac{\Delta x_0}{\Delta t} \cdot (Z_i(t) - Z_i(t + \Delta t)) \quad (3)$$

$\Delta x_0$  = ursprunglig tjocklek för samtliga subskivor

t = tid

$\Delta t$  = tidsinkrement

Förbränningsvärmen för pyrolysgaserna antas som en funktion av massfaktorn Z enligt

$$F_i(t) = F1 - F2 \cdot Z_i(t) \quad (4)$$

där

F1 och F2 är empiriskt beständiga konstanter.

Med uttrycket för förbränningsvärmen enligt ekv (4) och massförlusthastigheten enligt ekv (3) beräknas bidraget från varje subskiva till förbränningen av pyrolysgaserna utanför materialytan som

$$\dot{q}_i''(t) = \dot{m}_i''(t) \cdot F_i(t) \quad (5)$$

Genom summation över samtliga subskivor erhålls den totala förbränningsenergin.

Den grundläggande värmeflödesekvationen för endimensionell värmeledning med inre konvektivt flöde och intern värmeproduktion kan enligt /3/ skrivas

$$\frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} - \kappa \frac{\partial T}{\partial x} + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

där

k = konduktivitet

$\kappa$  = konvektiv term

Q = intern värmeproduktion

$\rho$  = densitet

c = specifik värme

T = temperatur

x = lägeskoordinat

t = tid

Parker tecknar differensuttryck för de i ekvation (6) ingående termerna för en inre subskiva med beaktande av krympfaktorerna  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $l_z$  samt att  $\kappa$ ,  $\rho$  och c varierar under pyrolysen. Nedan redovisas ingående termer förenklat skrivet.

För entalpitillskott:

$$\rho c \Delta T \cdot V = \rho c \Delta T \Delta x l_y l_z = \rho c \Delta T \Delta x_0 l_x l_y l_z = \rho_0 \Delta x_0 \Delta T |Z + Z_w| \quad (7)$$

där

V = volym av subskiva

Värmeledning:

$$k \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot A \cdot \Delta t = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \ell_y \ell_z \cdot \Delta t \quad (8)$$

där

A = area av subskiva

Inre konvektivt värmefflöde:

$$k \Delta T \cdot \Delta t = (c_g + c_w) \cdot \dot{m}_i \Delta T \Delta t \quad (9)$$

där

$c_g$  = specifikt värme för pyrolysgas

$c_w$  = specifikt värme för vattenånga

$\dot{m}$  = summan av alla massförlustbidrag enligt ekvation (3) för samtliga subskivor innanför aktuell skiva i.

Intern värmeproduktion

$$Q \cdot \Delta x = h_p \dot{\Delta m} + L_v \dot{\Delta m}_w = \rho_o \Delta x_o \left[ h_p \Delta Z + L_v \Delta Z_w \right] \quad (10)$$

Energibalans ekvationen skrivs om på matrisform och löses för  $T(t + \Delta t)$  med implicit metod.

För den ena randen, baksidan, gäller randvillkoren att massflödet är noll och adiabatiskt förhållande. Yttemperaturen extrapoleras fram med hjälp av de två närmaste liggande gitterpunkterna.

Randvillkoren mot den strålningsexponerade ytan innefattar strålningsutbyte och konvektivt värmefflöde. Före antändning antas ytan kylas av fri laminär konvektion. Efter antändning fås ett strålningsbidrag från brinnande pyrolysgaser och konvektionen ändras till att gälla mellan flamma och materialyta. Den konvektiva värmeövergången korrigeras med hänsyn till den ändrade temperaturprofil som erhålls närmast materialytan pga utströmmande pyrolysgaser med hjälp av "Spaldings mass transfer number" se t ex referens /3/ sid 7. Absorbtion och

emission av strålning sker endast vid materialytan dvs strålningsutbyte på djupet via sprickor i träkolet försummas.

## 1.2 Datorprogram

Även om det i modellen inledningsvis antas en uppdelning av trämaterialiet i dess tre huvudkomponenter cellulosa hemicellulosa och lignin så förenklas behandlingen i datorprogrammet till endast en aktiv del som pyrolyseras och ger pyrolysgaser samt en inaktiv del, träkol samt det adsorberade vattnet som förångas. Det finns även i övrigt vissa avvikelser mellan modellen i Parkers rapport /1/ och den som finns i programlistningen daterad 85.11.20. Redovisningen mellan baseras i fortsättningen på programlistning eftersom denna förmodas vara mest aktuell då den är av senare datum än rapporten.

Förbränningsvärmen antas följa sambandet

$$F = F_1 - F_2 \cdot Z \quad (11)$$

där

$$F_1 = 24.280 \text{ kJ/hg}$$

$$F_2 = 19.580 \text{ kJ/hg}$$

Krympfaktorerna har uppmätts i experiment och redovisas i rapporten /1/ i figurer 7 och 8 på sidan 71 och 72. De värden som finns inlagda som defaultvärden tycks gälla spånskiva enligt fig 8. Krympfaktorn anges med ett polynom enligt

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 1 - E_1 (1 - Z) - E_2 (1 - Z)^2 \quad (12)$$

där

$$E_1 = -0.3$$

$$E_2 = 0.7$$

$$\epsilon_z = 1 - E_3 (1 - Z) - E_4 (1 - Z)^2 \quad (13)$$

där

$$E_3 = -0.3$$

$$E_4 = 0.7$$

Massfaktorn Z har i programmet begränsats neråt till 0.22 vilket motsvarar andelen kvarvarande träkol efter fullständig pyrolys. Om  $Z = 0.22$  sätts in i ekvationerna (12) och (13) erhålls den maximala krympning som uppstår efter fullständig pyrolys

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = 1 + 0.3 (1 - 0.22)^2 - 0.7 (1 - 0.22)^2 = 0.81 \quad (14)$$

Konduktiviteten för trä som funktion av densitet och fukthåll vid rumstemperatur uppges följa ett uttryck enligt MacLean 1941 /4/

$$k_0 = (237 + \rho(k_2 + 4V)) 10^{-7} \quad (15)$$

där

$V$  = fuktkvot

$k_2$  = konstant som är 2.0 för massivt trä och plywood, 1.4 för spån-skiva och 1.1 för fiberskiva

$k_0$  = värmekonduktivitet kW/mK.

Ekvation (15) sägs gälla upp till 37 % massförlust men utnyttjas pga brist på annat inom hela massförlustområdet dvs t o m  $Z = 0.22$ .

Temperaturområdet hos värmekonduktiviteten följer ett samband enligt Kollmann /5/ som gäller under  $100^\circ\text{C}$

$$k = k_0 [1 + (A - B\rho) (T - T_0)] \cdot 10^{-5} \quad (16)$$

där

$k_0$  = värmekonduktivitet enligt ekv (15)

$A$  = 1100

$B$  = 0.98

$k$  = temperaturkorrigerad värmekonduktivitet kW/mK

Enligt Parker stämmer den temperaturberoende värmekonduktiviteten väl med utförda experiment med spånskiva. Däremot erhålls ett mycket mindre uppmätt temperaturberoende jämfört med beräknat för försöken med "southern pine". Anledningen till det kan för närvarande ej förklaras.

Träets värmekapacitet som funktion av temperaturen antas följa ett samband enligt Koch /6/. Värmekapaciteten för träkol har hämtats från Dunlap /7/ och givits samma temperaturberoende som för trä. Genom att anta att värmekapaciteten varierar rätlinjigt mellan ursprungliga trä och träkol erhålls

$$c = (a + b T) (d + (1 - d) Z) \quad (17)$$

där

$$a = 1.11$$

$$b = 0.0042$$

$$d = 0.43$$

$$c = \text{värmekapacitet}$$

I programversionen 85.11.20 har den inre konvektionen som uppstår pga utströmmande pyrolysgaser stängts av. Detta innebär en halvering av beräkningstiderna. Inverkan av detta är mindre än 5 % räknat på värmeavgivningskurvas första del. För det andra maxvärdet i värmeavgivning som erhålls mot simuleringens slut då i stort sett hela skivan har pyrolyserats blir värmeavgivningen 13 % större.

Reaktionsvärmern vid pyrolysen har liksom hos Atreya /1/ satts till 0 och aktiveringsenergin är 121 kJ/mol med en hastighetskonstant  $5.94 \cdot 10^7$  1/s.

I programmet har dessutom följande defaultvärden angivits

$$\text{emmissionstal } \epsilon = 0.8$$

$$\text{strålning från brinnande pyrolysgaser} = 10 \text{ kW/m}^2$$

$$\text{flamtemperatur} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{konvektivt värmeövergångskoefficient} = 0.017 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$\text{antal subskivor} = 60 \text{ st vid samtliga provtjocklekar}$$

Den termiska exponeringen anges som en konstant strålningsnivå.

### 1.3 Erforderliga indata

Nedan ges en uppräknig av erforderliga indata i Parkers modell.  
Vissa av dessa ges som defaultvärden i programmet.

Hastighetskonstant för pyrolys  
Hastighetskonstant för vattnets förångning  
Värmekapacitet för trä  
Värmekapacitet för pyrolysgas  
Värmekapacitet för vattenånga  
Värmekapacitet för vatten  
Densitet trä  
Densitet träkol  
Emissionstal  
Förbränningsvärme för pyrolysgaser  
Konvektiv värmeövergångskoefficient före antändning  
Konvektiv värmeövergångskoefficient från flammor  
Konduktivitet för trä  
Krympfaktorer  
Aktiveringsenergi för vatten  
Aktiveringsenergi för pyrolys  
Ångbildningsvärme  
Pyrolysvärme  
Fuktkvot  
Gaskonstanten  
Termisk exponering, konstant strålning  
Omgivningstemperatur  
Träskivans tjocklek  
Antal subskivor  
Simuleringstid

### 1.4 Utdata

Modellen beräknar temperatur-tidfält, massförlust, avgiven energi (RHR), förkolningsdjup och specifik värmeavgivning (RHR/massförlust).

Förkolningsdjupet definieras som det läge där kvarvarande massandel = 0.95.

Programmet skriver ut en sammanfattning av viktigaste indata och listar under beräkningen tiden, de två yttemperaturerna, massförlust, värmeavgivning, förkolningsdjup samt specifik värmeavgivning. Nedan ges ett exempel på utdata från Parkers program.

```
DATE IS 18:09:55
MATERIAL IS FIR
in the form of particleboard
CHAR CONTRACTION COEFFICIENTS ARE
  c=-.3 , d= .7 , e=-.3 and f= .7
FINAL CHAR FRACTION IS .22
HEAT OF COMBUSTION COEFFICIENTS ARE
  F1= 24280 and F2= 19580
ACTIVATION ENERGY IS 121 kJ/mole
FREQUENCY FACTOR IS 5.94E+07 1/sec
EMISSIVITY IS .8
HEAT OF PYROLYSIS IS 0 kJ/kg
HEAT CAPACITY COEFFICIENTS ARE 1.11 , b= .0042 and d= .43
TEMPERATURE COEFFICIENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY ARE
  a= 1100 and b= .98
FLAME RADIATION IS 10 kW/m^2
FLAME TEMPERATURE IS 1200 C
CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT FROM FLAME IS .017 kW/m^2/K
NUMBER OF GRID POINTS IS 60
AMBIENT TEMPERATURE THERMAL CONDUCTIVITY IS 1.2296E-04 kW/(m.K)
DENSITY IS 709 KG/M^3
MOISTURE CONTENT IS 0 PERCENT
THICKNESS IS 12.7 MM
EXTERNAL FLUX IS 50 KW/M^2
AMBIENT TEMPERATURE IS 25 C
```

```
T-front = front surface temperature
T-rear = rear surface twemperature
RML = rate of mass loss
RHR = rate of heat release
D-char = depth of char
H.C. = effective heat of combustion
```

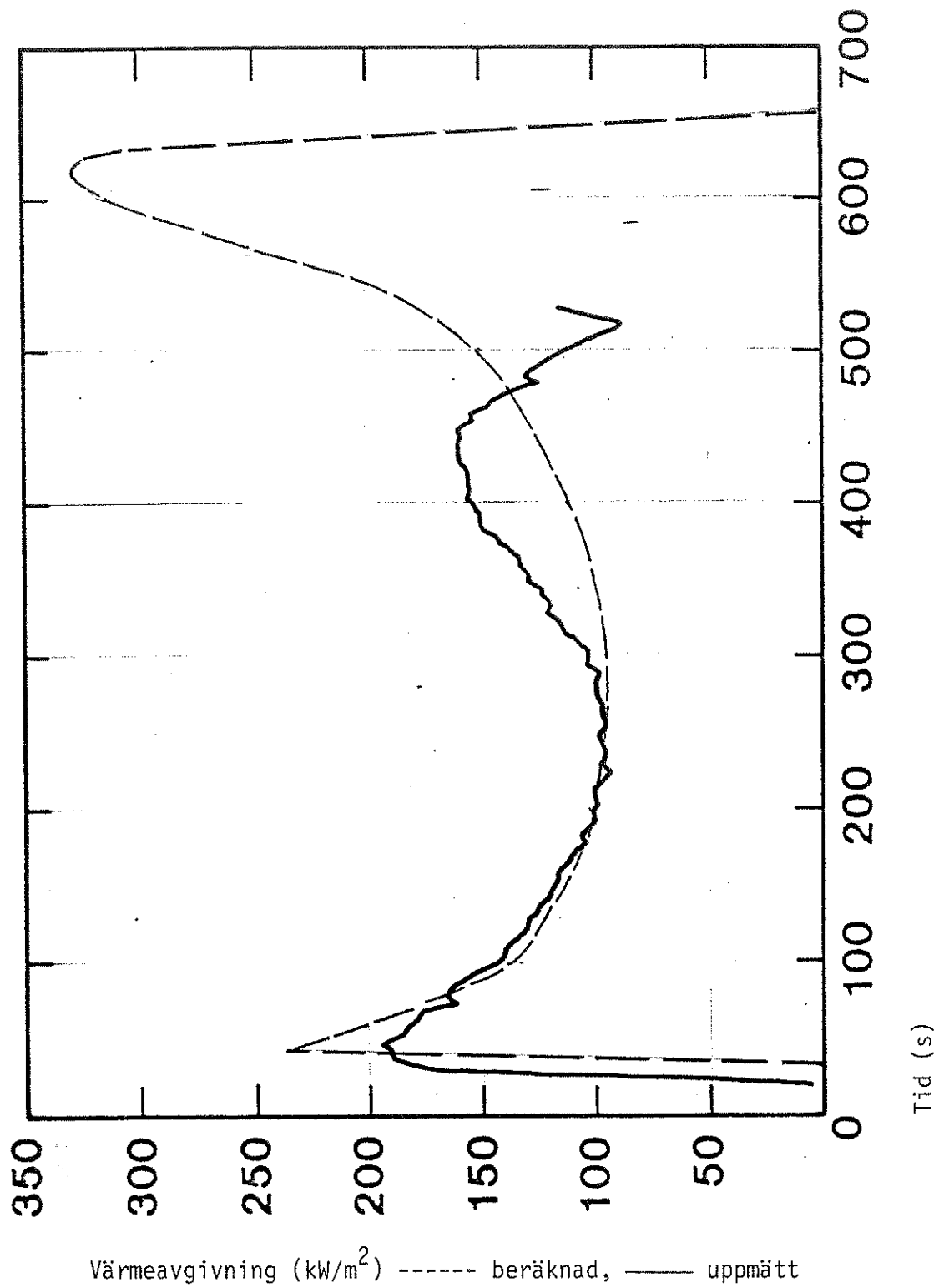
18:10:31

TIME (sec)	T-front (deg C)	T-rear (deg C)	RML (g/m <sup>2</sup> )	RHR (kW/m <sup>2</sup> )	D-char (mm)	H.C. (MJ/kg)
0.00	25.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	42.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	67.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.30	85.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.40	99.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	110.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.60	120.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.70	128.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.80	135.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.90	141.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	147.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00
'	'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'	'
40.10	465.00	25.00	14.64	129.00	0.63	8.81
40.50	466.00	25.00	15.05	135.00	0.63	8.97
40.90	467.00	25.00	15.45	142.00	0.63	9.19
41.30	469.00	25.00	15.83	149.00	0.63	9.41
41.70	470.00	25.00	16.20	156.00	0.63	9.63
42.10	472.00	25.00	16.31	161.00	0.63	9.87
42.50	473.00	25.00	16.64	167.00	0.63	10.04
42.90	474.00	25.00	16.90	173.00	0.63	10.24

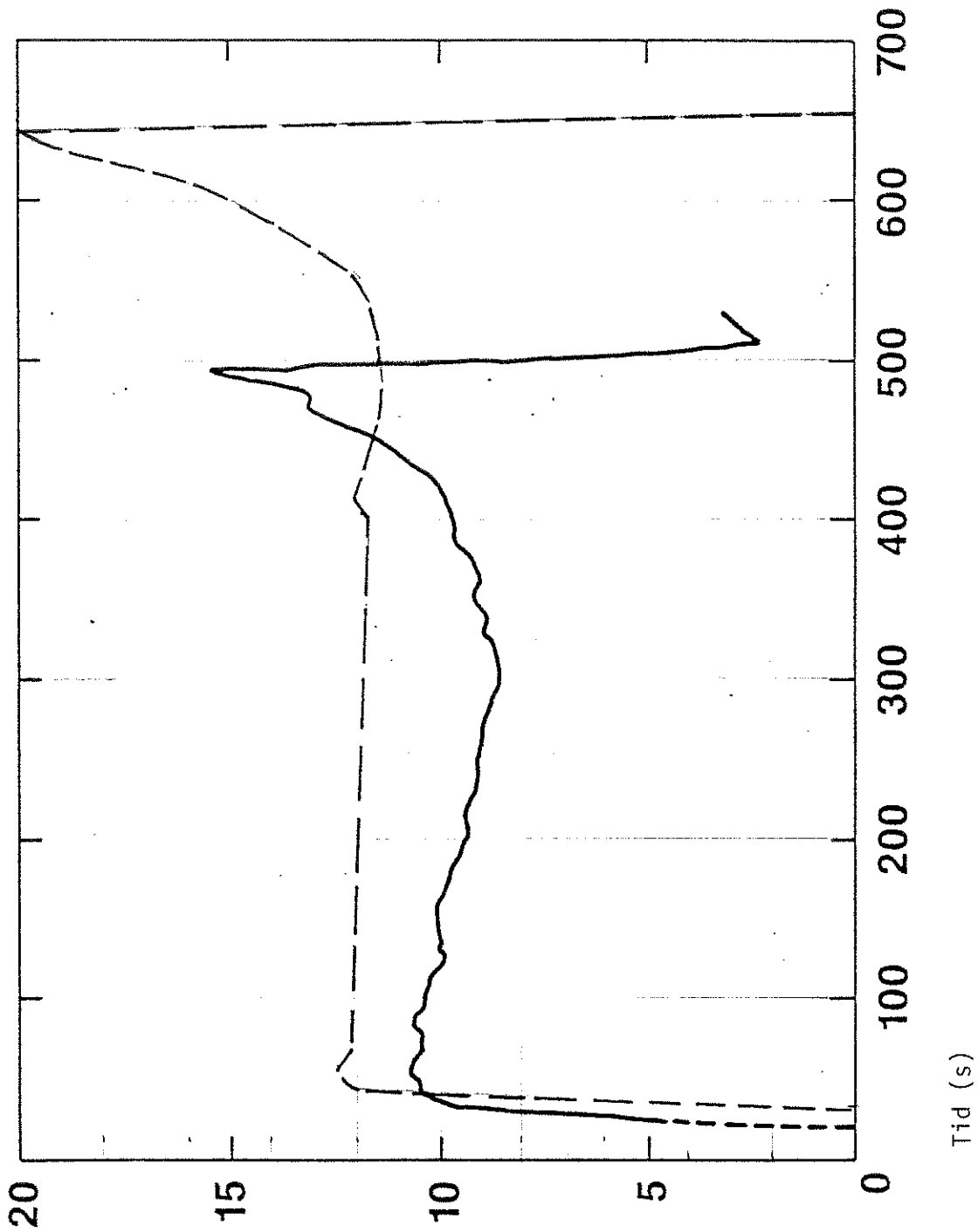
### 1.5 Validering

Jämförelsen mellan beräkningar och försök i Parkers rapport gäller endast för värmeavgivning och specifik värmeavgivning. Experimenten har utförts i en NBS konkalkorimeter. Träproverna har varit av 12.7 mm tjock spånskiva av typ Douglas fir. Provbitarna har testats vertikalt. Värmeavgivningen i försöken har bestämts enligt standardförfarande baserat på syrgaskoncentration och volymflödesmätning. Proverna har utsatts för konstant strålningsnivå 25, 50, 75 och 100 kW/m<sup>2</sup>.

I rapporten redovisas ett antal diagram över uppmätta och beräknade värmeavgivnings-tidkurvor vid olika strålningsnivåer. En direkt jämförelse försvåras eftersom mätta och beräknade samband redovisas i separata figurer och dessutom i olika skalor. Nedan i figur 1.1 och 1.2 har för jämförelse beräknade och uppmätta samband inritats i samma



Figur 1.1 Uppmätt och beräknad värmeavgivning för torr, 12.7 mm tjock, spånskiva av Douglas Fir exponerad med konstant strålning  $50 \text{ kW/m}^2$



Effektiv värmeavgivning (MJ/kg) ----- beräknad, — uppmätt

Figur 1.2 Uppmätt och beräknad effektiv värmeavgivning för torr, 12.7 mm tjock, spånskiva av Douglas Fir exponerad med konstant strålning  $50 \text{ kW/m}^2$

diagram. Figurerna gäller för spånskivan utsatt för en konstant strålningsnivå  $50 \text{ kW/m}^2$ .

Parker uppger att den första toppen i värmeavgivningen ökar med infallande strålningsnivå men är ca 20 % mindre än de beräknade. Den andra toppen är lägre än den första vid mätningarna vilket antagligen beror på värmeförlusten vid den bakre randen. För de beräknade sambanden sjunker värmeavgivningen snabbare vid den första toppen och den andra toppen uppkommer betydligt senare. Parker antar att skillnaderna beror på ofullständiga indata för de termiska egenskaperna för träkol vid höga temperaturer eller orealistisk beskrivning baserad på en första ordningens pyrolysisreaktion.

Någon jämförelse mellan beräknade och uppmätta temperaturnivåer i tvärsnittet finns ej. Det är naturligtvis svårt att montera temperaturgivare exakt i tvärsnitt som är endast 12.7 mm tjocka. Tidsskalan för samtliga de redovisade sambanden är påtagligt olika för försöken och beräkningarna. Det är även naturligt att nivån för specifik värmeavgivning bör stämma bättre än värmeavgivningssambanden eftersom ett fel på beskrivningen av pyrolysen påverkar massförlusten och värmeavgivningen i samma riktning.

## 1.6 Begränsningar

- 1 Modellen förutsätter en termisk exponering definierad som en konstant strålningsnivå.
- 2 Den bakre randen simuleras som adiabatisk.
- 3 Programmet förutsätter till skillnad från modellen i rapporten att trämaterialiet endast indelas i en aktiv del som ger pyrolysgaser och en inaktiv del som ger träkol.
- 4 Modellen tar ej hänsyn till att träkolet kan förbrukas vid materialytan. Reduceringen i träkolstvärsnittet beaktas som en krympning som maximalt kan uppgå till en tvärsnittsminskning till 80 % vid givna defaultvärden. Detta innebär att modellen troligen endast kan användas för relativt korta simuleringar. Dessutom blir det svårt att jämföra beräknade och uppmätta temperatur-

profiler då kolskiktet förutsätts sjunka ihop och beräkningsnoderna härvid flyttas.

- 5 Modellen tar ej hänsyn till att vattenånga pga temperaturgradienten trycks inåt i tvärsnittet. Se t ex fig 5.4 i /2/.
- 6 Beräkningsnätet är fixerat till 60 gitterpunkter med samma inbördes avstånd.
- 7 Tidsinkrementet är i princip fixerat vilket kan innebära numeriska problem om andra material eller höga termiska exponeringar skall simuleras. Modellen är känslig för tidsstegen.
- 8 Hela programmet måste skrivas om vid eventuell övergång till det tvådimensionella fallet.

Programmet är skrivet i BASIC och kan köras på IBM-kompatibla datorer under operativsystemet DOS. Några testkörningar har genomförts på en Ericsson PC och en IBM AT med matematikprocessor. Programmet har testats för en 12.7 mm tjock spånskiva utsatt för en termisk exponering av  $50 \text{ kW/m}^2$  och simulerats under ca 500 sekunder. Följande beräkningstider erhöles.

#### Ericsson PC

Kompilerad BASIC	23 min
Intepraterande BASIC	174 min

#### IMB AT

Kompilerad BASIC	7 min
Intepraterande BASIC	78 min

En simulering med strålningsnivån  $110 \text{ kW/m}^2$  provades även. Detta gav numeriska problem redan efter 12 sekunders simulerad strålningsexponering. Parker har lyckats simulera  $100 \text{ kW/m}^2$  men har då troligen behövt minska tidsstegen i betydande omfattning i förhållande till de som finns i programversionen 85.11.20. Uppskattningsvis ökar beräkningstiden drygt 10 ggr för detta fall.

Som jämförelse kan nämnas att en simulering på Sperry datorn vid Lunds datacentral av en strålningsexponerad träkub under 42 min vid nivån  $110 \text{ kW/m}^2$  kräver 27 min simuleringstid. Då är även det inre konvektiva värmeflödet inkluderat. Se vidare under avsnitt 2.

### 1.7 Utvecklingsmöjligheter

Parker nämner följande punkter som erforderliga för att förbättra modellen.

- 1 Bestämning av termiska egenskaper för trä och träkol vid höga temperaturer.
- 2 Nödvändigt att dela upp de kinetiska konstanterna efter träets komponenter cellulosa, hemicellulosa och lignin.
- 3 Bestämning av egenskaper för andra trämaterial som träfiberskiva, hård träfiberskiva och plywood.
- 4 Effekten av brandhämmande tillsatser.
- 5 Tärare beräkningsnät.
- 6 Överföring till större dator för att nedbringa beräkningstiderna.
- 7 Förbättrad beskrivning av värmeövergångsförhållanden mellan yta och flamma.
- 8 Förbättrat antändningskriterium. För närvarande används kriteriet att värmeavgivningen  $\leq 30 \text{ kW/m}^2$ .
- 9 Förbättra randvillkoren för den bakre randen.
- 10 Hänsynstagande till inverkan av sprickbildning i träkolet.

Mitt intryck av modellen och framförallt datorprogrammet är att det i första hand skall ses som ett hjälpmedel att utvärdera de experiment som behövs för att bestämma materialegenskaper. En fortsatt utveckling av punkterna 1 t o m 3 och ev 10 får anses som mest angelägna. När det gäller punkterna 5, 6 och 9 finns det redan program för detta.

## 2 TEMPERATUR OCH FÖRKOLNINGSMODELL ENLIGT FREDLUND

### 2.1 Teoretisk behandling

Den kinetiska modellen /3/ bygger bl a på arbeten av Munson och Spindler /8/ och Fredlund /9/.

Den grundläggande värmeflödesekvationen för endimensionell värmeledning och inre konvektion i ett material är

$$\frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} - \kappa \frac{\partial T}{\partial x} + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

där

$k$  = konduktivitet, W/mK

$\kappa$  = konvektiv term, W/m<sup>2</sup>K

$Q$  = internt genererad värme per volymenhet, J/m<sup>3</sup>

$\rho$  = densitet, kg/m<sup>3</sup>

$c$  = specifikt värme, J/kg K

$T$  = temperatur, K

$x$  = lägeskoordinat, m

$t$  = tid, s

Den konvektiva termen definieras enligt

$$\kappa = c_{pg} \dot{m} \quad (2.2)$$

där

$c_{pg}$  = specifikt värme för pisolysgaser, J/kg K

$\dot{m}$  = massflöde per ytenhet och tidsenhet, kg/m<sup>2</sup>s

Det grundläggande antagandet är här att termodynamisk jämvikt existerar lokalt för varje  $x$ , dvs att den fasta fasen och gasfasen i materialet i en liten omgivning kring  $x$  antar samma temperatur.

Om momentum ekvationen ej beaktas fås massbalansekvationen

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.3)$$

Förenklingen innebär att pyrolysgaserna antas fritt kunna röra sig i den fasta fasen och tryckgradienter eller pyrolysgasernas hastighet kan således ej beräknas.

Antagandet om att pyrolysgaserna fritt kan röra sig inom den fasta fasen strider egentligen mot det grundläggande antagandet om att termodynamisk jämvikt existerar lokalt. Termodynamisk jämvikt mellan faserna innebär ju en god termisk kontakt mellan dessa.

För att lösa ekvation (2.1) måste randvillkor och begynnelsevillkor specificeras. Begynnelsevillkoren ges av en initiell temperaturfördelning för den fasta fasen vid referenstidpunkten noll. Randvillkoren ges som föreskrivna energiflöden eller temperaturer vid ränderna.

Energiflödet vid randen måste satisfiera värmebalansekvationen

$$q_n = - n k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.4)$$

där

$n$  = utåtriktade normalen från randen

$q_n$  = föreskrivet flöde vid randen

Vid en fri rand antas fyra energiflöden förekomma, nämligen

- konvektion mellan fast fas och omgivande gas
- strålning mellan fast fas och omgivande gas
- kemisk reaktionsenergi vid materialyta
- utströmmande pyrolysgaser.

Samtliga dessa fenomen är komplicerade varför endast approximativa samband kan ges. Konvektionstermen antas följa ekvationen

$$q_n^c = h (T_s - T_g) \quad (2.5)$$

där

$q_n^c$  = värmetransport genom konvektion,  $W/m^2$

$h$  = värmeövergångskoefficient,  $W/m^2 K$

$T_s$  = yttemperatur, K

$T_g$  = omgivande gastemperatur, K

Strålningen från materialytan approximeras enligt

$$q_n^r = \epsilon_r \sigma (T_s^4 - T_g^4) \quad (2.6)$$

där

$q_n^r$  = värmetransport genom strålning,  $W/m^2$

$\epsilon_r$  = resulterande emissionstal

$\sigma$  = Stefan-Boltzmann:s konstant

$T_s$  = absoluta yttemperaturen, K

$T_g$  = absoluta gastemperaturen, K

Det resulterande emissionstalet varierar med ytegenskaper och geometri. I en brandteknisk tillämpning sker strålningsutbytet mellan omgivande flammor och materialytan. Ett vanligt antagande är då att beräkna det resulterande emissionstalet som mellan två oändligt långa parallella plan enligt

$$\epsilon_r = \frac{1}{1/\epsilon_s + 1/\epsilon_g - 1} \quad (2.7)$$

där

$\epsilon_s$  = ytans emissionstal

$\epsilon_g$  = gasens emissionstal

Energi från den kemiska reaktionen vid ytan följer sambandet

$$q_n^{ch} = n \Delta H_s \cdot \dot{s} \quad (2.8)$$

där

$H_s$  = genererat värme vid reaktionen vid ytan, J/kg

$\dot{s}$  = materialytans hastighet på grund av reaktionen, m/s

Den kemiska reaktionen vid materialytan antas beskrivas av ett förlopp enligt följande empiriska ekvation

$$\dot{s} = T_s \beta e^{- (E_A/RT_s)} \quad (2.9)$$

där

$T_s$  = yttemperatur, K

$\beta$  = empirisk konstant, 1/s K

$E_A$  = aktiveringsenergi

$R$  = allmänna gaskonstanten

Energiflödet vid materialytan på grund av utströmmande pyrolysgaser ges av

$$q_n^{mf} = n \kappa_s (T_s - T_o) \quad (2.10)$$

där

$\kappa_s$  = konvektiv term enligt ekvation (2.2) vid materialytan

$T_s$  och  $T_o$  enligt tidigare definition.

Det totala värmeflödet beräknas genom att summera de fyra bidragen från konvektion, strålning, ytreaktioner och massflöde

$$q_n = q_n^c + q_n^r + q_n^{ch} + q_n^{mf} \quad (2.11)$$

Pyrolysgaserna som avges vid materialytan påverkar de konvektiva värmeövergångsförhållandena. Den i gränsskiktet utträngande pyrolysgasen påverkar temperaturgradienten över gränsskiktet så att den inte längre blir linjärt fördelad.

Det konvektiva värmeutbytet mellan den fasta fasen och den omgivande gasen kan skrivas

$$q_n^c = h (T_s - T_g) E (b) \quad (2.12)$$

med

$$E(b) = \frac{\kappa}{h} \left( \frac{1}{e^{\kappa/h} - 1} \right) \quad (2.13)$$

För små värden  $\kappa/h$  dvs litet massflöde vid materialytan går funktionen  $E(b)$  mot ett, för stora värden  $\kappa/h$  går  $E(b)$  mot noll.

Pyrolysen av trä sker med ett flertal komplicerade kemiska reaktioner. Pyrolysförloppet antas följa en medelreaktion beskriven av en Arrheniusfunktion enligt

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho b e^{- (E_A/RT)} \quad (2.14)$$

där

$E_A$  = aktiveringsenergi, J/mol

$R$  = allmänna gaskonstanten, J/mol K

$b$  = konstant, 1/s

$\rho$  = densiteten i snitt  $x$  vid tiden  $t$ , kg/m<sup>3</sup>

Det ursprungliga trämaterialiet antas uppdelat i en oreducerbar del 2 som ger träkol som oxideras vid materialytan och en aktiv del 1 som ger pyrolysgaser vid pyrolysen. Uttryck i densiter fås

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 \quad (2.15)$$

Trämaterialiets specifika värme antas följa en linjär variation med entalpin för de ingående delmaterialen 1 och 2 vilket ger följande funktion av densiteten

$$c_p = \frac{\rho_0}{\rho} \left( \frac{\rho - \rho_2}{\rho_0 - \rho_2} \right) c_{p0} + \frac{\rho_2}{\rho} \left( \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0 - \rho_2} \right) c_{p2} \quad (2.16)$$

där

$c_{p0}$  = specifika värmets för trämaterial, J/kg K

$c_{p2}$  = specifika värmets för träkol, J/kg K

$c_p$  = specifika värmets i snitt  $x$  vid tiden  $t$ , J/kg K

$\rho$  = densiteten i snitt  $c$  vid tiden  $t$ ,  $\text{kg/m}^3$

$\rho_0$  = densiteten för ursprungligt trämaterial,  $\text{kg/m}^3$

$\rho_2$  = densiteten för träkol,  $\text{kg/m}^3$

Värmekonduktiviteten antas som en linjär variation av ingående delmaterials densiteter enligt

$$k = \left( \frac{\rho - \rho_2}{\rho_0 - \rho_2} \right) k_0 + \left( \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0 - \rho_2} \right) k_2 \quad (2.17)$$

där

$k$  = värmekonduktivitet i snitt  $x$  vid tiden  $t$ ,  $\text{W/m K}$

$k_0$  = värmekonduktivitet för ursprungligt trämaterial,  $\text{W/m K}$

$k_2$  = värmekonduktivitet för träkol,  $\text{W/m K}$

## 2.2 Datorprogram

De redovisade värmebalans-ekvationerna innehåller icke linjära randvillkor och materialegenskaper som varierar med temperaturen och densiteten. Analytiska lösningar existerar endast för linjära tillämpningar med enkla randvillkor och geometrier. En enda framkomlig väg är därför numeriska metoder. Den metod som valts här och som är lätt att utöka till flera dimensioner är finita elementmetoden.

Beräkningsprogrammet WOOD1 har utvecklats för att lösa värmebalans-ekvationerna. Samtliga subrutiner är programmerade i Fortran 77. Subrutinerna är utvecklade för endimensionell värmeledning och förutsätter torrt virke. Med vissa modifikationer kan programmet utvidgas till tvådimensionell värmeledning samt att gälla även för fuktigt virke. Utvidgningen för att möjliggöra beräkningar med fukttinhåll bygger i det förenklade fallet på att modifiera värmekapacitetsmatrisen och energiinnehållet i de strömmande gaserna under pyrolysen, samt att ansätta en Arrhenius funktion för förångning av vattnet.

Vissa subrutiner har ursprungligen skrivits av Ulf Wickström och motsvaras i förekommande fall av endimensionella varianter till rutiner i beräkningsprogrammet TASEF-2.

I figur 2.1 presenteras en översikt över de i WOOD1 förekommande subrutinerna och hur de är kopplade till varandra.

Nedan ges en kort beskrivning för respektive subrutin.

<u>Subrutin:</u>	<u>Beskrivning:</u>
AFFE	Beräknar värmeövergångstalets strålningsandel
ASSA1	Beräknar den globala värmekonduktivitetsmatrisen
ASSK1	Beräknar nodernas konvektiva term
ASSP1	Beräknar den globala värmekapacitetsmatrisen
BOUND1	Summerar energiflöden till noder. Delflöden är konvektion i materialet, energi från pyrolysisprocessen samt bidrag från ränderna
BOUNDS	Beräknar det totala värmeutbytet vid materialytorna
CAP1	Beräknar nodernas värmekapacitet
CENTX	Beräknar koordinaten $x_c$ för det snitt där pyrolysgaserna för $x < x_c$ strömmar mot randen 1 och för $x > x_c$ strömmar mot randen 2
COND1	Ger elementens värmekonduktivitet
DTIME1	Beräknar det kritiska tidssteget
FEM1	Huvudrutin för den inkrementella proceduren
GEOC01	Tilldelar elementen geometriska konstanter
INIT1	Initierar temperaturfältet i den fasta fasen
INPUT	Läser utskriftstidpunkter
KONVER	Beräknar randelementens egenskaper avseende värmekapacitet och konduktivitet innan elementindelningen vid randen uppdateras
MAIN1	Dimensionerar maximala fältstorlekar
MASS1	Beräknar bidraget i massflöde från respektive element
MAT1	Läser fysikaliska indata för ingående material
MPACKV	Beräknar värmeväxlingen på grund av värmeledning till respektive nod
NET1	Skapar beräkningsnätet med inlästa geometriska data

<u>Subrutin:</u>	<u>Beskrivning:</u>
OUT1	Skriver utdata för i indata angivna tidpunkter
PACKFW	Beräknar det konvektiva värmeflödet i materialet
PROG1	Dimensionerar för aktuell beräkningsuppgift erforderliga fältstorlekar
REG1	Beräknar till vilken region ett visst element hör
SELEM1	Anger när beräkningsnätet skall förändras genom att lägga samman de två vid randen 1 närmast liggande elementen
SELEM2	Motsvarande som för SELEM1 men för randen 2
SURFT	Beräknar rändernas reaktionshastighet $s$
TIMTB	Kontrollerar om flera beräkningsfall skall analyseras. Läser indata som brandrumstemperatur som funktion av tiden för de två ränderna
TSTART	Ger första tidsinkrementet
VELRI	Beräknar pyrolyshastigheten $\rho$
XCHAR	Anger koordinaten för pyrolyszonen

Samtliga materialberoende egenskaper ges i form av indata för att möjliggöra simulering av ett godtyckligt material som pyrolyseras och bildar kolskikt.

Programmet genererar med hjälp av indata elementstorlekar som kan varieras godtyckligt t ex med extra små element närmast den brandutsatta ytan. Flera skikt av olika materialtyper kan kombineras. De båda materialtyperna kan utsättas för var sin godtycklig termisk exponering i form av en brangas temperatur-tidkurva eller en strålnings-tidkurva. Materialet kan pyrolyseras och förbrännas med start från ena eller båda ränderna.

I programmet finns inga materialberoende ekvationer av typen som redovisas i Parkers modell ekvation (11) t o m (17). Motsvarande samband ges i detta fall som indata i form av talpar som beskriver t ex konduktiviteten som funktion av temperaturen.



### 2.3 Erforderliga indata

Indata till beräkningsprogrammet WOOD1 utgörs av följande typer:

- Geometriska indata som används för att generera ett beräkningsnät.
- Materialdata skall anges för ingående materialen, pyrolysgas, träkol och ursprungliga trämaterial. För träkol och trä anges specifika värmnet och värmekonduktiviteten som funktion av temperaturen och för pyrolysgaserna endast specifika värmnet som funktion av temperaturen.
- Kinetiska indata för pyrolysisreaktionen och ytans reaktioner anges. Dessutom specificeras den densitet för materialet i pyrolyszonen som definierar kolskiktets inträngningsdjup.
- Indata som beskriver utskriftstidpunkter.
- Randvillkoren för randen 1 och 2 ges som brandgastemperaturen som funktion av tiden.
- Villkorlig inläsning och simulering av fler beräkningsfall.

Nedan redovisas ett exempel på indata till en simulering. I tabellen är även förklarande kommentarer införda.

#### Exempel på erforderliga indata till beräkningsprogrammet WOOD1

```

1 F
2 .80 .010 1 30 F
3 .002 .004 .006 .008 .010 .012 .014 .016 .018 .020 .022 .024 .026 .028 .030
4 .032 .034 .036 .038 .040 .042 .044 .046 .048 .050 .052 .054 .056 .058 .060
5 DRY WOOD
6 10 1.
7 500. 150.
8 300.
9 5 0 . .15 50. .15 100. .15 200. .15 2000. .15
10 2 0. .10 2000. .10
11 3 0. 700. 1000. 900. 2000. 1100.
12 3 0. 1000. 1000. 5000. 2000. 5000.
13 5 0. 1000. 500. 1117. 1000. 1200. 1500. 1263. 2000. 1409.
14 1.60E-7 1. 3.1E3
15 1500. 63000. 8.314
16 2 0. 0. 2000. 0.
17 0.
18 F
19 13 1.1
```

```

20 .06 .067 0.1 .2 .30 .40 .50 .60 .70 .80 .90 1.0 1.1
21 F F 1
22 TESTEXAMPLE
23 1
24 5
25 0. 20. .03333 846. .3333 903. .7333 916. 10. 916.

```

### Kommentarer

1. TRUE om programmet skall köras interaktivt
2. Total tjocklek (m), elementtjocklek (m), antal materialtyper, antal extra noder. TRUE om axialsymmetriskt fall
3. Koordinater för extra noder (m)
4. Koordinater för extra noder (m)
5. Materialnamn
6. >1 om materialegenskaper huvudregion 1, tvärsnittsarea (m<sup>2</sup>)
7. Densitet trä, densitet träkol (kg/m<sup>3</sup>)
8. Densitet för pyrolyszon. Definierar förkolningsdjupet (kg/m<sup>3</sup>)
9. Antal talpar, temperatur-konduktivitetstalpar för trä (°C,W/mK)
10. Antal talpar, temperatur-konduktivitetstalpar för träkol (°C,W/mK)
11. Antal talpar, temperatur-specifik värme-talpar för träkol (°C,J/kgK)
12. Antal talpar, temperatur-specifik värme-talpar för trä (°C,J/kgK)
13. Antal talpar, temperatur-specifik värme-talpar för pyrolysgas (°C,J/kgK)
14.  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  där  $\dot{s} = \beta_1 T_s^{\beta_2} \cdot e^{-(\beta_3/T_s)}$  beskriver materiallytans reaktion (1/sK,-,K)
15.  $b, E_A, R$  där  $\dot{\rho} = \rho b e^{-(E_A/RT)}$  beskriver pyrolyshastigheten (1/s, J/mole, J/mole K)
16. Antal talpar, temperatur-konsumerad energi vid ytreaktionen (°C, J/kg)
17. Konsumeras energi vid pyrolysen (J/kg)
18. TRUE om indata för utskriftstidpunkter ges i minuter
19. Antal utskriftstidpunkter, maximal simuleringstid (-, h eller minuter)
20. Utskriftstidpunkter (h eller minuter)
21. TRUE om samma temperaturkurva vid båda ränderna, TRUE om föreskrivet värmefflöde vid rand 2, antal simuleringarfall
- 21b Här anges föreskrivet värmefflöde för rand 2 om detta önskas enligt föregående indatarad (W/m<sup>2</sup>)
22. Överskrift för simuleringen, maximalt 80 tecken
23. Littera
24. Antal tid-gastemperatur-talpar
25. Tid-gastemperatur-talpar (h, °C)

## 2.4 Utdata

Modellen beräknar temperaturtidfält, massförlust, förkolningsdjup och ytans förbränning. Förkolningsdjupet definieras via indata som det läge där densiteten sjunkit till ett visst värde (i exempelvis  $300 \text{ kg/m}^3$ ). Programmet skriver först ut en sammanfattning av samtliga indata. Därefter listas följande data från beräkningarna vid önskade tidpunkter.

- Tid och antal beräkningssteg
- Tidstegets längd
- Ytelementens storlek
- Omgivningstemperatur vid de båda ränderna
- Ytnodernas hastighet
- Förkolningsdjup räknat från ytnodernas ursprungliga läge
- Förkolningshastighet
- Massflöde vid ränderna
- Samtliga noders temperatur
- Samtliga noders densitet samt densitetsminskning per tidsenhet.

All information enligt ovan samlas dessutom på en fil för att möjliggöra en senare plottning av utdata.

Nedan ges ett exempel på utdata från programmet.

```

***** TIME      .060 ***** STEP.NB      1868 *****
***** TIME-INCREMENT  .378-005
***** DX1              .002 ***** DX2              .010
***** FLUID1-CONDITION  905.333 ***** FLUID2-CONDITION  20.000
***** VELS1            .1828 ***** VELS2            .0000
***** CHARRING LENGHT  .0051 ***** CHARRINGRATE      1.422
*****

```

NOD	TEMP	DENS	DENS1-INCREMENT	MOIST
MASSFLUX	-7129.9668			
1	806.	150.0	.000	.000
2	716.	150.0	.000	.000
3	608.	155.2	-.731+000	.000
4	404.	414.2	-.275+001	.000
5	238.	453.9	-.818-001	.000
6	142.	455.0	-.267-002	.000
7	86.	455.0	-.154-003	.000
8	54.	455.0	.000	.000
9	37.	455.0	.000	.000
10	28.	455.0	.000	.000
11	24.	455.0	.000	.000
12	22.	455.0	.000	.000
13	21.	455.0	.000	.000
14	20.	455.0	.000	.000
15	20.	455.0	.000	.000
16	20.	455.0	.000	.000
17	20.	455.0	.000	.000
18	20.	455.0	.000	.000
19	20.	455.0	.000	.000
20	20.	455.0	.000	.000
21	20.	455.0	.000	.000
22	20.	455.0	.000	.000
23	20.	455.0	.000	.000
24	20.	455.0	.000	.000
25	20.	455.0	.000	.000
26	20.	455.0	.000	.000
27	20.	455.0	.000	.000
28	20.	455.0	.000	.000
29	20.	455.0	.000	.000
30	20.	455.0	.000	.000
31	20.	455.0	.000	.000
32	20.	455.0	.000	.000
33	20.	455.0	.000	.000

## 2.5 Validering

Modellen har testats dels mot egna försök där en träkub utsätts för en i det närmaste konstant strålningsnivå och dels mot limträbalkar utsatta för standardbrandprovning.

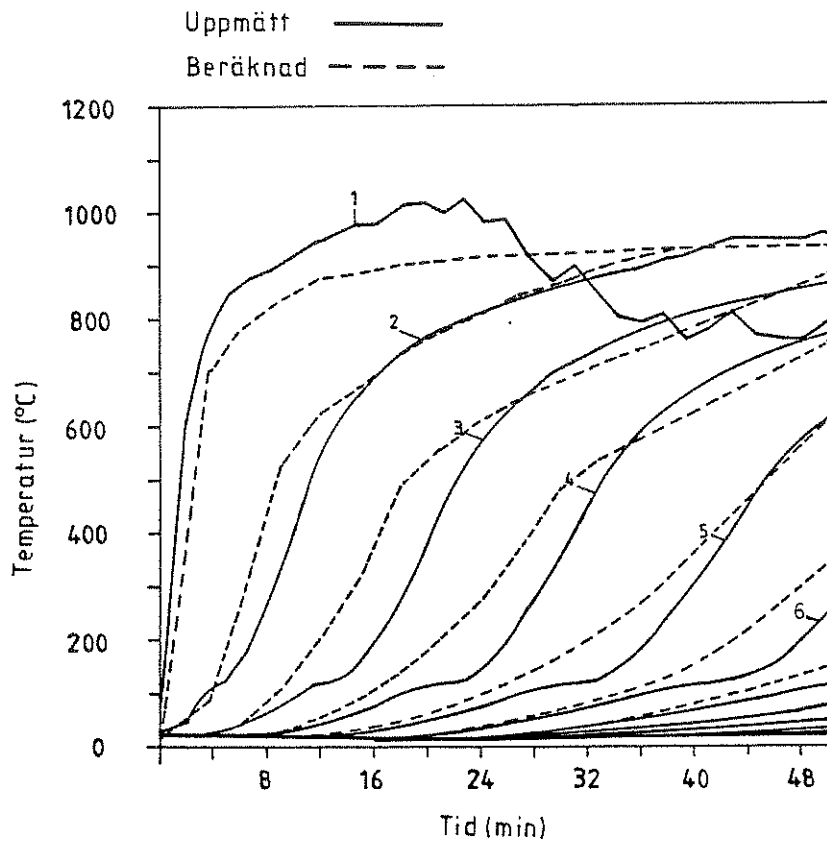
Testexempel med en strålningsexponerad träkub:

Experimentet består av en träkub med sidlängden 150 mm. I kuben har monterats temperaturgivare och termoelement och resistiva fuktgivare med ett inbördes avstånd av 10 mm med början 2 mm från den strålningsutsatta ytan.

Vinkelrätt mot den exponerade ytan har sidorna isolerats för att efterlikna endimensionell värmetransport. Dessa sidor har även försetts med fuktspärr.

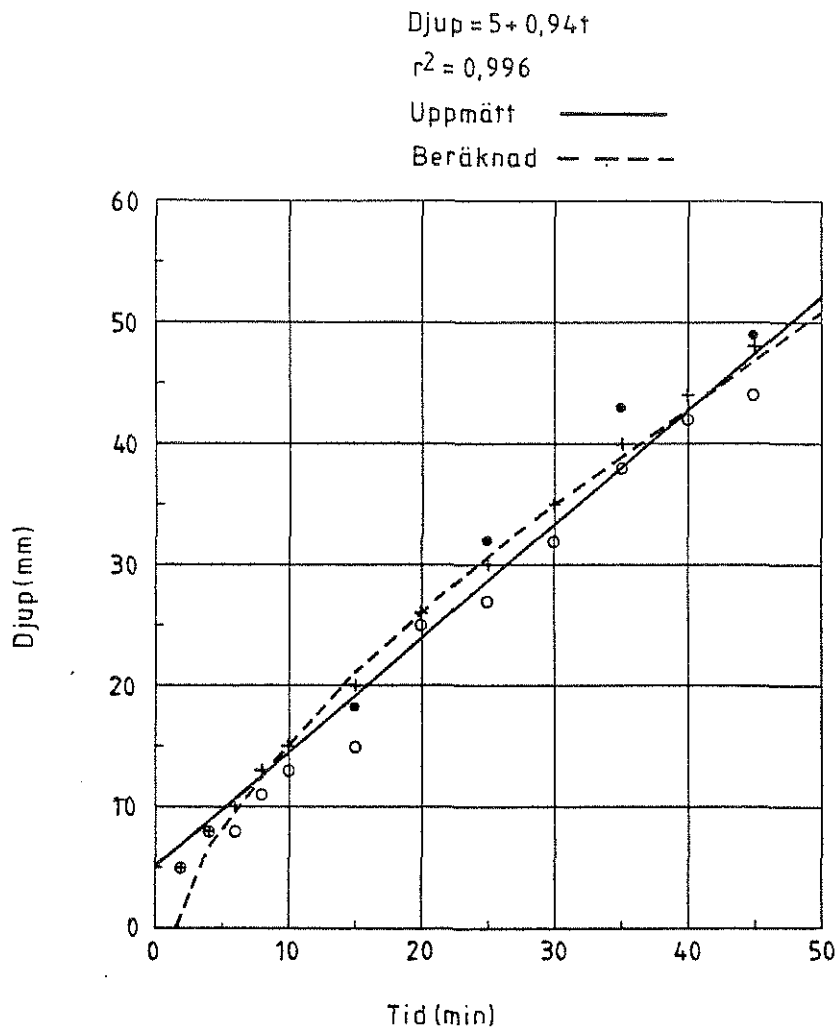
Provkroppen har monterats på en vagn för att möjliggöra en automatisk avståndsställning från ett datorstyrt mätinsamlingssystem. Invid träkuben har en strålningsmätare monterats för att mäta mot provkroppsytan infallande strålning. Som strålningskälla har använts en keramisk gaseldad strålningspanel med måtten 350 x 350 mm<sup>2</sup>. Försöket genomfördes med provkroppen i vanlig rumsatmosfär.

Kolskiktets inträngningsdjup avlästes manuellt med hjälp av tre stycken i träkuben inbördes trästickor ca 3 mm tjocka. Observerat förkolningsdjup redovisas i figur 2.3.



Figur 2.2 Uppmätt och beräknad temperaturökning som funktion av tiden på olika avstånd från träkubens strålningsexponerad yta,  $\rho_{\text{torr}} = 455 \text{ kg/m}^3$

Den strålningsexponerade träkuben har simulerats med beräkningsprogrammet WOOD1 med indata enligt tabell 2.1. Randvillkoren har på den brandutsatta ytan ansatts som en brandgastemperatur som motsvarar uppmätt instrålning mot materialytan. Den motstående materialytan gränsar till en konstant lufttemperatur  $20^{\circ}\text{C}$ .



Figur 2.3 Experimentell bestämt och beräknat förkolningsdjup som funktion av tiden för en strålningsexponerad träkub,  $\rho_{\text{torr}} = 455 \text{ kg/m}^3$

Elementlängden har på grund av konvergenskrav valts till endast 2 mm. För ytelement vid den brandutsatta ytan blir elementlängden successivt mindre då materialytan förbränns. Då ytelementet har minskat till  $0,3 \Delta L$  försummas detta beräkningsmässigt och randvillkoren appliceras på innanför liggande element.

I figur 2.2 och 2.3 har beräknad temperaturfördelning och förkolningsdjup redovisats som streckade linjer.

Tabell 2.1 Materialdata för simulering av strålningsexponerad träkub

Densitet trä	500	kg/m <sup>3</sup>
Densitet kol	150	kg/m <sup>3</sup>
Densitet som definierar pyrolyszonens läge	300	kg/m <sup>3</sup>
Konduktivitet trä	0.15	W/m K
Konduktivitet kol	0.10	W/m K
Specifikt värme trä	20, 1600 500, 3000	<sup>o</sup> C, J/kg K
Specifikt värme kol enligt Atreya	20, 700 1000, 1500	<sup>o</sup> C, J/kg K
Specifikt värme pyrolysgas (som för luft)	20, 1000 500, 1117 1000, 1200	<sup>o</sup> C, J/kg K
Reaktionskonstanter för materialytan		
$\beta_1$	$1 \cdot 10^{-6}$	1/s K
$\beta_2$	1	-
$\beta_3$	3100	K
Reaktionsvärme för ytan	0	J/kg
Reaktionskonstanter för pyrolysen		
b enligt Roberts	1500	1/s
$E_A$ enligt Roberts	63000	J/mole
Reaktionsvärme för pyrolysen	0	J/kg

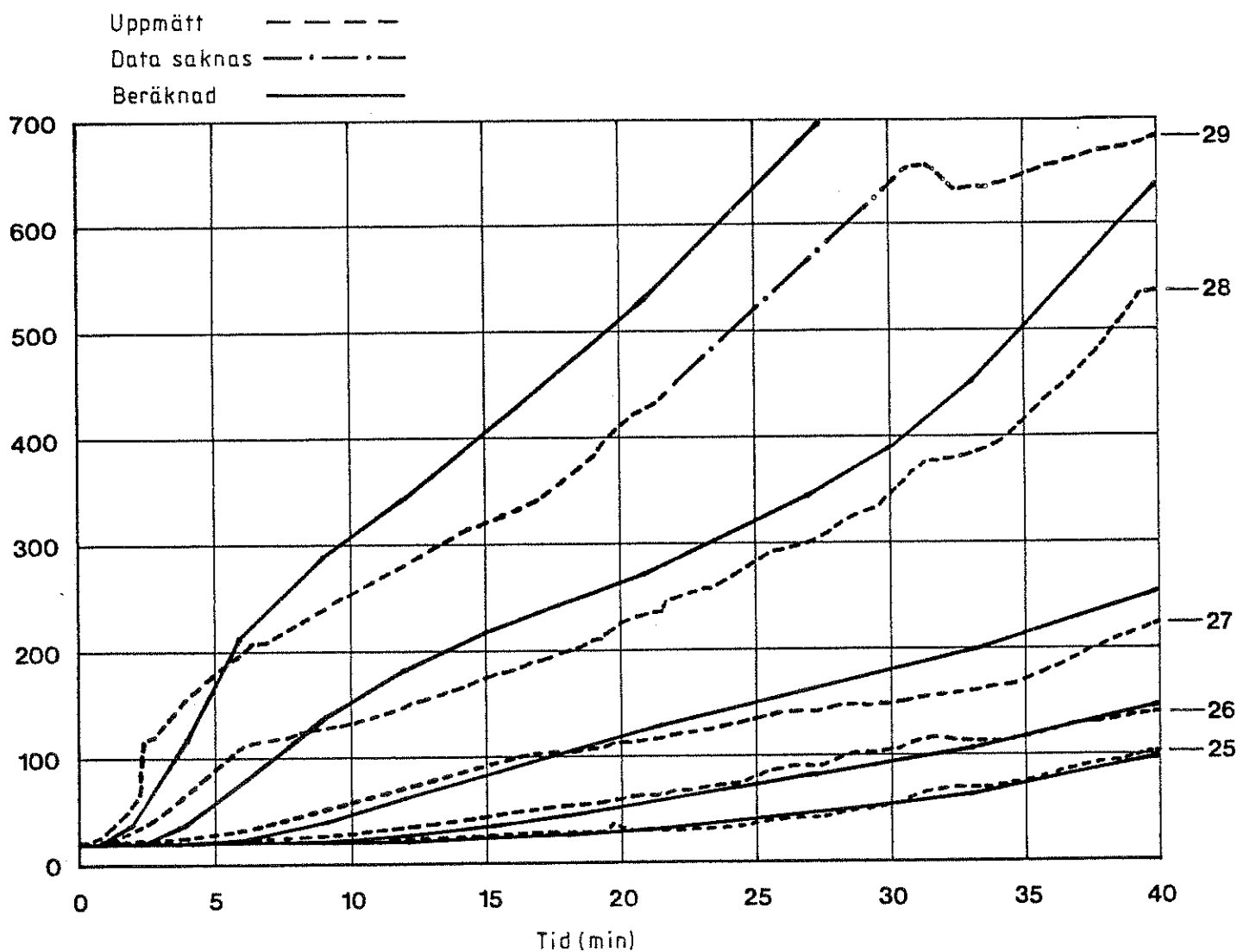
Eftersom simuleringarna har genomförts med förutsättningen om att trämaterialiet är torrt erhålls skillnader mellan uppmätt och beräknad temperaturfördelning då vatten förångas vid 100<sup>o</sup>C. När träet är uttorkat följer sambanden i figur 2.2 varandra väl men med en parallellförskjutning svarande mot den tid som åtgår vid förångningen.

Av figur 2.3 framgår att simulerad kolskiktineträngning väl överensstämmer med experimentellt uppmätt. Jämförelsen belyser nödvändigheten av att i modellen beakta träets vatteninnehåll. Detta kan t ex göras genom att ansätta en Arrheniusfunktion för förångningsprocessen och med reaktionsvärmets lika med förångningsvärmets. Konstanterna i tabell 2.1 har ej valts med speciellt syfte att anpassa beräkningarna till mätdata utan är exempel på i litteraturen förekommande värden.

Testexempel med limträbalk testad enligt ISO 834:

På uppdrag av Norsk treteknisk Institutt provades 5 stycken limträbalkar med bultar och beslag, uppdrag nr 250103.00178 vid The Norwegian Fire Research Laboratory. I balkarna monterades extra temperatur- och fuktgivare genom Moelven Limtre A/S försorg för att möjliggöra detaljerade mätningar av författaren utanför uppdraget till The Fire Research Laboratory.

Halva tvärsnittet för en av balkarna har simulerats med randvillkoret vid den ena randen enligt den uppmätta ugnstemperaturen och den andra randen med föreskrivet randflöde lika med 0. Randflödet noll motiveras med att balkens centrumlinje beaktas som ett symmetrisnitt.



Figur 2.4 Beräknat respektive uppmätt temperaturfält som funktion av tiden för limträbalk testad enligt ISO 834

I figur 2.4 jämförs uppmätt och beräknat temperaturfält som funktion av tiden. Även här konstateras betydelsen av träets fuktkvot.

Uppmätta fuktkvoter i balktvärsnittet låg mellan 9 och 12 %. Med införande av uttryck för fukttinnehållet i den teoretiska modellen bör även här god överensstämmelse kunna nås.

## 2.6 Begränsningar

- 1 Modellen tar ej hänsyn till vatteninnehåll i träet
- 2 Modellen delar endast in trämaterialiet i en aktiv del som ger pyrolysgaser och en inaktiv del som ger träkol
- 3 Sprickbildning eller krympning i träkolet försummas
- 4 Programmet beräknar ej träets värmeavgivning i form av brinnande pyrolysgaser.
- 5 Något antändningskriterium har ej införts.

## 2.7 Utvecklingsmöjligheter

- 1 Angelägenheten att ta hänsyn till fukttinnehållet har tidigare påpekats och bör snarast införas. Den förenklade behandling som Atreya /2/ och Parker /1/ använt sig av är enkel att tillföra.
- 2 Om det är önskvärt med möjligheten att bestämma värmeavgivningen pga brinnande pyrolysgaser enligt Parkers metod kan detta göras med relativt begränsade arbetsinsatser. Ett antändningskriterium måste då samtidigt införas.
- 3 En behandling av träkolets krympning vinkelrätt mot randytorna kan vara intressant pga uppkomsten av sprickbildning i kolskiktet. Detta bör då kombineras med strålningspåverkan på djupet genom sprickorna.
- 4 En övergång till det tvådimensionella fallet är möjlig med relativt begränsade programmeringsinsatser. Det kan dock innebära praktiska problem med besvärande långa simuleringstider.

Parker nämner att en förbättring av simuleringarna kräver bättre tillgång på termiska och kinetiska egenskaper för träbaserade material. En förbättrad kunskap om materialegenskaperna kommer båda modellerna tillgodo.

### 3 DISKUSSION

De båda modellerna har stora likheter och löser i princip samma energibalanskvationer. Målsättningarna, och därmed även modellernas användbarhet, är något olika. Parker koncentrerar sig på beräkning av energiavgivningen från träet och validerar modellen mot försök i en konkalorimeter. I WOOD1 är målsättningen i första hand att beskriva kolskiktinträngning och temperaturprofil i grövre träkonstruktioner. Därför måste även en långvarig termisk påverkan kunna simuleras. Bl a krävs att förbränningen av kolskiktets yta måste behandlas på ett rimligt sätt.

I Parkers modell inkluderas kolskiktets krympning vid termisk påverkan genom empiriskt bestämda krympfaktorer. Detta tillvägagångssätt fungerar endast under relativt kort termisk exponering eftersom kolskiktet aldrig, enligt definition i modellen, kan krympa mer än till 81 % av ursprunglig tvärsnittsstorlek. I modellen finns till skillnad från WOOD1 många inbyggda materialberoende ekvationer. I WOOD1 anges motsvarande samband med hjälp av indatatabeller.

Den största bristen i WOOD1 är avsaknaden av en behandling av fuktinnehållet. Detta avses därför snarast avhjälpas. Fördelarna med WOOD1 är framförallt, jämfört med Parkers modell, att programmet är mer generellt användbart. Det fungerar även vid höga strålningsnivåer och under långa termiska förlopp.

Båda modellerna behöver testas mot försök i större utsträckning och även mot varandra. Det sistnämnda kräver dock ändringar i båda programmen så att de presterar samma typ av utdata.

Vid en eventuell utveckling av förbättrade eller nya modeller och program inom området finns det användbart material i de båda beskrivna modellerna. Som de värdefullaste bidragen från Parker betecknar jag dock de experimentella arbeten som genomförts för att bestämma termiska och kinetiska data för trämaterial. En förbättring och utveckling av Parkers datorprogram kräver sannolikt stora omskrivningar eftersom det är skrivet i BASIC och består av en enda lång rutin.

En utveckling av programmet WOOD1 underlättas eftersom det består av ett antal subrutiner som kan utnyttjas även i andra program eller utbytas i det befintliga programmet.

I tabell 3.1 ges ett försök till sammanfattning av för-och nackdelar hos de två studerade modellerna och beräkningsprogrammen.

Det har varit intressant att ta del av Parkers arbete eftersom detta ligger så nära mitt eget intresseområde. Positivt är också att fler i Sverige vill arbeta inom samma område. Möjligheter öppnas därmed för att angripa problemställningarna utifrån flera håll. Det är dock min övertygelse att det inte i första hand är fler modeller för träets pyrolys som behövs utan fler väl genomförda experiment.

Tabell 3.1 Sammanfattning av för- och nackdelar med de två studerade modellerna och beräkningsprogrammen.

	+ klar fördel		
	- klar nackdel		
	≈ likvärdiga		
	( ) tveksamt		
Randvillkor	rand 1	Parker,	Fredlund
	antändning	(+)	(-)
	avbränning av träkol	-	+
	termisk exponering	-	+
Randvillkor	rand 2		
	antändning	(-)	(-)
	avbränning av träkol	-	+
	termisk exponering	-	+
Erforderliga indata		≈	≈
Krympning av träkol			
	vinkelrätt mot materialyta	+	-
	parallellt med materialyta	-	+
Träets värmeavgivning		+	-
Hänsynstagande till fukttinnehåll		+	-
Fukttransport		-	-
Valiering			
	temperaturprofil	-	+
	vägning	≈	≈
	energiavgivning	+	-
Beräkningstider			
Konvegenskriterium		-	+
Övergång till två dimensioner		-	+
Generella samband i programmet		-	+
Indatagenerering		(+)	(-)
Utvecklingsmöjligheter		(-)	+
Experimentell teknik		+	-

## REFERENSER

- /1/ Parker, I.P., Development of A Model for the Heat Release Rate of Wood - A Status Report. Center for Fire Research U.S. National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1985.
- /2/ Atreya, A., Pyrolysis, Ignition and Fire Spread on Horizontal Surfaces of WOOD. Harward University, Div. of Applied Sciences Cambridge. MA, 1984.
- /3/ Fredlund, B., A computer program for the analysis of timber structures exposed to fire. Lund Institute of Technology, Division of Building, fire safety and Technology. Report LUTVDG/(YVBB-3020) (SSN0282-3756), 1985.
- /4/ MacLean, J.D., Thermal Conductivity of WOOD. Heating, Piping and Air Conditioning 13:380-391, 1941.
- /5/ Kollmann, F.F.P. and Cote, W.A., Principles of Wood Science and Technology, Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag, New York, p. 250, 1984.
- /6/ Koch, P., Specific Heat of Oven-Dry Spruce Pine Wood and Bark. Wood Sci. 1:203-214, 1969.
- /7/ Dunlap, F., The Specific Heat of Wood. U.S. Dep. Agr. Bull. No. 110, Washington, DC, 1912.
- /8/ Munson, T.R. and Spindler, R.I., Transient Therman Behaviour of Decomposing Materials, Part I. General Theory and Application to Convective Heating, presented at the 30th Institute of Aero-space Science Meeting, New York, June 1962.
- /9/ Fredlund, B., Modell för beräkning av temperatur och fuktfördelning samt reducerat tvärsnitt i brandpåverkade träkonstruktioner. Institutionen för Byggnadsstatik. Intern rapport IR79-2, Lund 1979.