



LUND UNIVERSITY

Enkel tvåzonsmodell för brandflödessimulering

Jensen, Lars

2007

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, L. (2007). *Enkel tvåzonsmodell för brandflödessimulering*. (TVIT; Vol. TVIT-7012). Avd Installationsteknik, LTH, Lunds universitet.

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

Enkel tvåzonsmodell för brandflödessimulering

Delrapport - BRANDFORSK 313-001

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2007
Rapport TVIT--07/7012



Lunds Universitet

Lunds Universitet, med nio fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 100 400 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 000 anställda och 41 000 studerande som deltar i ett 90-tal utbildningsprogram och ca 1000 fristående kurser erbjudna av 88 institutioner.

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmda hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspredning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Enkel tvåzonsmodell för brandflödessimulering

Delrapport - BRANDFORSK 313-001

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2007

ISRN LUTVDG/TVIT--07/7012--SE(31)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
22100 LUND

Innehållsförteckning

1	Inledning och problemställning	5
2	Tvåzonsmodell	7
3	Känslighetsanalys	11
3.1	Parameter rumsgolvarea med konstant rumshöjd	14
3.2	Parameter rumshöjd med konstant rumsvolym	15
3.3	Parameter rumshöjd med konstant volym	16
3.4	Parameter rumshöjd med konstant rumsyta	17
3.5	Parameter rumsväggfaktor	18
3.6	Parameter konvektiv värmeövergångstal	19
3.7	Parameter ytmaterialtjocklek	20
3.8	Parameter ytmaterialtyp	21
3.9	Parameter nedre utluftningsandel	22
3.10	Parameter strålningsandel	23
3.11	Parameter gasabsorptionskoefficient	24
3.12	Brandens placering	25
3.13	Brandens nivå	26
3.14	Brandeffekt enligt t^2 -brandförlopp	27
3.15	Brandeffekt enligt t^n -brandförlopp	28
3.16	Brandeffekt enligt t^0 -brandförlopp	29
3.17	Brandeffekt för konstant brandflöde	30
3.18	Sammanfattning	31

1 Inledning och problemställning

Syftet med denna arbetsrapport är att beskriva en tvåzonsmodell för brandflödesberäkning och redovisa resultat för en känslighetsanalys för den aktuella modellen. Tvåzonsmodellen har använts för att genomföra ett stort antal beräkningar med olika bränder, lokaler och utluftning. Detta arbete finns redovisat i Jensen (2006), en slutrapport för BRANDFORSK-projekt 313-001 Skydd mot rökspridning via ventilation med stoppade fläktar och förbigångar – riskbedömning och dimensionering.

Brandflödets största värde för en given brand är av intresse att känna till för att kunna bedöma om brandgasspridning via ventilationssystemet mellan olika lokaler i en byggnad kan inträffa. Andra samhörande variabler är brandtemperaturen, brandgaslagrets höjd, här benämnt brandhöjden, brandtiden, tiden för när största brandflöde inträffar, och givetvis den totala brandeffekten.

Kvoten mellan brandflöde och brandeffekt kommer också att ganskas, eftersom det finns en enkel grov tumregel, som anger att brandflödet i m^3/s är lika med brandeffekten i MW. Denna enkla tumregel tar hänsyn till att en mindre del av brandeffekten tillförs rummets luftvolym och en större del går ut genom rummets begränsningsytor.

Syftet med modellen är att beräkna på den första delen av ett brandförlopp i icke tryck-avlastade lokaler, eftersom det inte kan ske någon brandgasspridning via ett driftsatt ventilationssystem till andra lokaler om brandlokalen är tryckavlastad till exempel med ett öppet fönster eller en öppen dörr.

Brandtrycket som uppstår i en lokal beror helt på brandens effekt, lokalens täthet och ventilationssystemets egenskaper. Detta innebär att för att brandtrycket skall kunna modelleras krävs det uppgifter på lokalens täthet och en modell för ventilationssystemet.

Om brandtrycket inte modelleras utan sätts lika med omgivningens tryck, kan brandflödet beräknas med den till luftvolymen tillförda effekten. Detta leder till en obetydlig överskattning av brandflödet. Den ackumulering som egentligen sker när brandtrycket tillåts öka är liten och ändringen sker på kort tid. Antag att brandtrycket ändras 10, 100 eller 1000 Pa på 1, 10 respektive 100 s för en lokalvolym på 1000 m^3 . Något termodynamiskt förenklat med konstant temperatur innebär detta att 0.1, 1 respektive 10 m^3 har ackumulerats eller att ett brandflöde på $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ saknas. Detta kan tyckas vara ett stort fel, men större delen av ackumuleringen har skett innan det största brandflödet uppnås.

Notera att en lokal på 1000 m^3 är en ganska stor lokal. Samma analys för en lokal med volymen 100 och 10 m^3 ger motsvarande ackumulerande brandflöden 0.01 respektive $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$. De tre brandflöden med tillhörande lokalstorlek kan också omräknas till en luftomsättningstid, vilken blir 10 000 s eller nästan 3 h i samtliga tre fall. Detta är mindre än ett minsta möjliga ventilationsflöde, som för normala rumshöjder har en luftomsättningstid på 2 h. Kravet är minst 0.35 l/sm^2 .

Den förenklade tvåzonsmodellen beskrivs i avsnitt 2 .

En omfattande känslighetsanalys genomförs i avsnitt 3.

2 Tvåzonsmodell

En tvåzonsmodell med rumsvolymen uppdelad i en nedre och övre delvolym har tagits fram för att kunna simulera brandförlopp i brandutsatta rum utan stora öppningar till omgivningen såsom fönster eller dörrar. Den övre volymen beskriver brandgaslagret och den nedre volymen ett rent rumsluftlager bortsett från brandplymen. Modellen bygger på en simuleringsmodell redovisad i Hägglund (1986). Denna modell är något förenklad vad gäller tryckskillnad till omgivning, öppningar till omgivning och ventilation, eftersom syftet med modellen är att beräkna brandflöde, sprinklertemperaturer och fönstertemperaturer och särskilt högsta brandflöde.

De tryckskillnader som kan uppstå mellan ett brandutsatt rum och omgivningen kan högst uppgå till några tusen Pa och detta påverkar inte branden och brandflödet. Tryckskillnaden mellan det brandutsatt rummet och omgivningen kan försummas eller sättas till noll. Något inflöde till rummet antas heller inte finnas. Det enda flödet som finns är brandflödet som kan delas upp i ett utflöde från den nedre zonen och ett utflöde från den övre zonen.

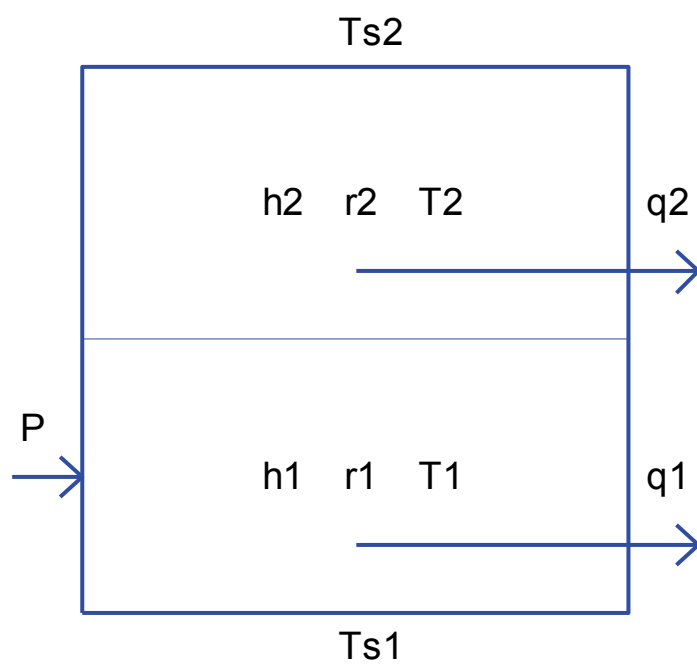
Notera dock att brandflödet kan bli negativt vid brandeffektminskningar, vilket leder till ett inflöde till modellen. Denna del av brandförloppet är inte av intresse utan det är det största brandflödet som kan inträffa som är av intresse.

Tvåzonsmodellens primära variabler är de två zonernas temperaturberoende densitet och höjder. Summan av de två höjderna skall vara lika med rumshöjden. Detta ger en kontrollmöjlighet av modellen och av integrationen. Det hade varit tillräckligt med en zonhöjd som variabel. De fyra grundvariablernas bestämmande differentialekvationer utgår från mass- och volymbalans för de två zonerna. Tvåzonsmodellens huvudtillstånd visas i Figur 2.1.

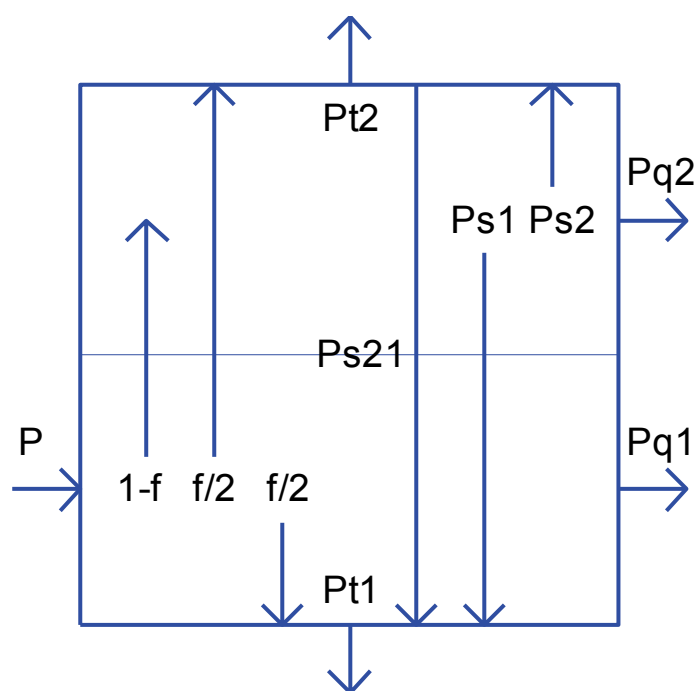
Varje zon har värmeutbyte med motsvarande rumsyta och med värmeledning på djupet, som beskrivs med tio temperaturtillstånd för varje zonyta. Tvåzonsmodellens alla värmeflöden beskrivs i Figur 2.2.

Fem temperaturtillstånd finns också för att simulera sprinklertemperaturer eller fönstertemperaturer. Det är av intresse att veta när en sprinkler löser ut eller när en fönsterruta kan sprängas av temperaturspänningar, eftersom risken för brandgasspridning minskar betydligt om en sprinkler löser ut och upphör helt om ett fönster sprängs med fläktar i drift. Det senare är dock tveksamt, eftersom ett normalt fönster består av i regel minst två fönsterrutor. En yttre ruta skyddas troligen ganska väl av en skadad inre ruta som kan sitta kvar till stora delar.

Beräkningsprogrammet är skrivet i Matlab och själva den matematiska/fysikaliska modellen redovisas i form av de programrader, vilka ingår i en funktion som anropas av en integrationsrutin. Huvudprogrammet, som startar och avslutar simuleringen, redovisas inte.



Figur 2.1 Tvåzonsmodellens fem grundtillstånd, temperaturtillstånd och utflöden.



Figur 2.2 Tvåzonsmodellens olika värmeeffekter och brandeffektens uppdelning.

De fem första modelltillstånden döps om till sina tekniska namn.

```
h1=x(1); % höjd nedre zon
h2=x(2); % höjd nedre zon
r1=x(3); % densitet nedre zon
r2=x(4); % densitet nedre zon
P=x(5); % brandeffekt
```

Tvåzonsmodellens två volym- och yttemperaturer tas fram, där a_T är en konstant. Alla temperaturer i modellen anges med den absoluta temperaturskalan med sorten K och har startvärdet 293 K eller 20 °C.

```
T1=aT/r1; % temperatur nedre zon
T2=aT/r2; % temperatur övre zon
Ts1=x(11); % yttemperatur nedre zon
Ts2=x(21); % yttemperatur övre zon
```

De två zonernas kontaktytor tas fram, där A är golvyta och O är rummets väggomkrets.

```
A1=A+O*h1; % yta nedre volym
A2=A+O*h2; % yta övre volym
```

De två zonvolymerna värmeförlust beräknas, där h är det konvektiva värmeövergångstalet.

```
Pt1=A1*h*(Ts1-T1); % konvektiv värmeförlust nedre volym
Pt2=A2*h*(Ts2-T2); % konvektiv värmeförlust övre volym
```

De tre strålningsutbytena mellan brandgaslager och zonytor och mellan zonytor beräknas enligt nedan, där k är gasabsorptionskoefficienten och s är Stefan-Boltzmanns konstant. Matlabs notation med upphöjt till ^ har tagits bort.

```
eg=1-exp(-k*h2); %
Ps2=A*s*eg*(T2^4-Ts2^4); % strålningsutbyte brandgas övre ytor
Ps1=A*s*eg*(T2^4-Ts1^4); % strålningsutbyte brandgas nedre ytor
Ps21=A*s*(1-eg)*(Ts2^4-Ts1^4); % strålningsutbyte övre till nedre zon
```

Brandplymens massflöde och effektbehov beräknas, där a_p är en konstant och parametern m anger brandplymens placering i rummet, mitt, sida eller hörn med siffervärdena 1, 2 respektive 4. Parametern c är det specifika värmet vid konstant tryck.

```
mp=ap*r1*P1/3*h15/3/m2/3; % plymassflöde
Pp=mp*c*(T2-T1); % plyeffektbehov
```

Brandflödet q_b och dess uppdelning beräknas, där a_q är en konstant och u anger nedre utluftningsandelen.

```
qb=aq*((1-f)*P+Pt1+Pt2-Ps1-Ps2); % brandflöde
q1=u*qb; % utflöde nedre zon
q2=(1-u)*qb; % utflöde övre zon
```

Differentialekvationerna för de två zonhöjderna redovisas nedan, vilka egentligen bygger på volymbalans. Båda ekvationerna för volymbalans divideras med golvytan A, vilket ändrar volym till höjd.

$$\begin{aligned} dx(1,1) &= (aq \cdot Pt1 - q1 - mp/r1)/A; & \% x(1) \text{ höjd nedre zon} \\ dx(2,1) &= (aq \cdot ((1-f) \cdot P - Pp + Pt2 - Ps1 - Ps2) - q2 + mp/r2)/A; & \% x(2) \text{ höjd övre zon} \end{aligned}$$

Differentialekvationerna för de två zonernas densitet redovisas nedan, vilka egentligen bygger på massbalans. Båda ekvationerna divideras med motsvarande volymer $A \cdot h1$ respektive $A \cdot h2$, vilket ändrar massa till densitet. Brandplymens massflöde ges av variabeln mp.

$$\begin{aligned} dx(3,1) &= (-r1 \cdot A \cdot dx(1,1) - mp - r1 \cdot q1)/(A \cdot h1); & \% x(3) \text{ densitet nedre zon} \\ dx(4,1) &= (-r2 \cdot A \cdot dx(2,1) + mp - r2 \cdot q2)/(A \cdot h2); & \% x(4) \text{ densitet övre zon} \end{aligned}$$

Differentialekvationen för brandeffekten redovisas nedan. Brandeffekten kan begränsas till en högsta effekt P_{max} . De fyra brandfunktionerna konstant, linjärt, kvadratisk eller kubiskt ökande brandeffekt fås med motsvarande fyra parametrar $aPt0$, $aPt1$, $aPt2$ och $aPt3$. Högerledet anger brandeffektens tidsderivata. Brandeffekten integreras fram på detta sätt.

$$\begin{aligned} \text{if } P < P_{max} \\ dx(5,1) &= aPt1 + 2 \cdot aPt2 \cdot t + 3 \cdot aPt3 \cdot t^2; & \% x(5) \text{ brandeffekt} \\ \text{else} \\ dx(5,1) &= 0; \\ \text{end;} \end{aligned}$$

De fem temperaturtillstånden för sprinkler- eller fönstertemperaturer beräknas med temperaturviktningssmatrisen T_{sm} mellan tvåzonsmodellens två volym- och två yttemperaturer och en omgivande temperatur T_s . Sprinklers dynamiska egenskaper beskrivs med en tidskonstantvektor T_{sc} . Notationerna ./ och ' anger elementvis division respektive transponering.

$$dx(6:10,1) = (T_{sm} \cdot [T1 \ T2 \ Ts1 \ Ts2 \ Ts]') ./ T_{sc}; \quad \% \text{ sprinklertillstånd}$$

De två zonyttillstånden beräknas med värmeöverföringsmatrisen Q och värmelagringsvektorn C . Matrisen T_{sm} är tridiagonal med över- och underdiagonalelement lika med q . Huvuddiagonalens element är lika med $-2q$ med undantag för ändarna som är lika med $-q$. Parametern q är lika med värmeöverföringsförmågan för 1 m^2 rumsyta med en 1/9-del av materialtjockleken. Värmelagringsvektorn C för de tio temperaturtillstånden består av två yttre delar och åtta inre delar med värdet $c/2$ respektive c . Parametern c anger värmelagringsförmåga hos 1 m^2 rumsyta med 1/9-del av materialtjockleken.

$$\begin{aligned} dx(11:20,1) &= (Q \cdot x(11:20) + [ps1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]') ./ C; & \% \text{ nedre väggstillstånd} \\ dx(21:30,1) &= (Q \cdot x(21:30) + [ps2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]') ./ C; & \% \text{ övre väggstillstånd} \end{aligned}$$

De specifika värmeeffekterna $ps1$ och $ps2$ till de två zonytorna beräknas enligt nedan, där f är strålningsandelen för branden. Sambanden visar att brandens strålning fördelas lika mellan de två zonerna ytor. De två rumsytorna har endast kontakt in mot rummet. De yttre ytorna är idealt isolerade utan någon värmeförlust.

$$\begin{aligned} ps1 &= (-Pt1 + Ps1 + Ps21 + f \cdot P/2)/A; & \% \text{ specifik värmetillförsel nedre yta} \\ ps2 &= (-Pt2 + Ps2 - Ps21 + f \cdot P/2)/A; & \% \text{ specifik värmetillförsel övre yta} \end{aligned}$$

3 Känslighetsanalys

Hur det dimensionerande brandflödet påverkas av olika tretton parametrar undersöks med en tvåzonsmodell och utgående från ett basfall, vilket anges med en sammanställning nedan som en mittkolumn flankerad av ett minfall och ett maxfall. De första sex parametrarna beskriver rummet och de resterande sju beskriver branden. Notera att endast en parameter från minfallet eller maxfallet kombineras med basfallets övriga parametrar. Några parametrar nedan är självklara och behöver inte kommenteras.

Parametern rumsväggfaktor anger hur stor väggytan är utgående från ett kvadratisk rum. Faktorn noll innebär att väggytor försummas. Faktorn 2 att väggytor fördubblas och för en kvadratisk rumsgolvvyta om 100 m² och i stället en omkrets på 80 m. Detta kan tolkas som att rummet egentligen består av fyra rum om 25 m² vardera.

Parametern nedre utluftsandel anger hur utluftningen sker och med siffervärdet 1.0 fås endast utluftning från den nedre zonen i modellen och omvänt med siffervärdet 0.0.

Parameter för brandtillväxt motsvarar för basfallet det geometriska medelvärdet mellan medium och fast eller mellan slow och ultra fast. Min- och maxfallet är ytterlighetsfallen slow och ultra fast.

Tabell 3.1 Basfall och övriga beräkningsfall

parameter	beteckning	sort	minfall	basfall	maxfall	figur
rumsgolvvyta	A	m ²	50	100	200	3.1
rumshöjd - konstant golvyta	h	m	2.4	3.0	3.6	3.2
rumshöjd - konstant rumsvolum	h	m	2.4	3.0	3.6	3.3
rumshöjd - konstant rumsyta	h	m	2.4	3.0	3.6	3.4
rumsväggfaktor	o	-	0	1	2	3.5
konvektivt värmeövergångstal		W/Km ²	0	5	20	3.6
ytmaterialtjocklek	d_m	m	0.004	0.020	0.100	3.7
ytmaterialtyp	-	-		betong		3.8
nedre utluftsandel	u	-	0.0	0.5	1.0	3.9
strålningsandel	f	-	0.0	0.2	0.4	3.10
absorptionsfaktor	k	-	0.6	0.8	1.0	3.11
brandens placering	m	-	-	1	-	3.12
brandens nivå	z	-	-0.5	0.0	0.5	3.13
brandeffekt enligt $P(t)=\alpha_2 t^2$	α_2	W/s ²	2.93	23.44	187.52	3.14
brandeffekt enligt $P(t)=\alpha_n t^n$	n	-	1	2	3	3.15
brandeffekt enligt $P(t)=\alpha_0$	α_0	MW	0.95	1.90	3.80	3.16
brandeffekt - konstant brandflöde	q_b	m ³ /s	-	-	-	3.17

Den omslutande ytan ökar inte särskilt mycket med rummets form i förhållande till ett kvadratisk rum. Det kvadratiske fallet med golvytan 100 m² och en rumshöjd på 3 m har en omslutande yta på 320 m² varav endast 120 m² är väggyta. Fallen med kortsida 5 m och 2.5 m ger en långsida på 20 m respektive 40 m och en omslutande yta 350 m² respektive 455 m², vilket motsvarar en rumsväggfaktor på 1.25 respektive 2.125. Någon känslighetsanalys av rumsformens betydelse har inte gjorts.

Varje av de fjorton första känslighetsfallen beskrivs på en sida med ett diagram för brandgasflödet och brandeffekt för de tre delfallen, minsta, bas och största värde. Det dimensionerande brandflödet för basfallet är något avrundat 1.00 m³/s, vilket gör det lätt att skatta relativa variationer i brandflöde för andra fall. Ett undantag är att för fall 8 har fem olika ytmaterial undersökts.

Sist i Tabell 3.1 finns tre udda fall, vilka redovisas på samma sätt som tidigare fall. Fall 15 har linjärt, kvadratisk eller kubiskt med tiden ökande brandeffekt, men med samma maximala brandtid. Fall 16 med konstant brandeffekt och fall 17 konstant brandflöde har tagits med för att visa att trots ökande brandeffekt i fall 1-15 finns det alltid ett största brandflöde innan brandgaslagret når golvnivå. Förklaringen är att rummets värmeförluster ökar snabbare än vad brandeffekten ökar och därmed har brandflödet ett största värde.

Den totala brandeffekten redovisas även den i samma diagram. Detta ger en enkel möjlighet för att kunna kontrollera tumregeln, brandflödet i m³/s är lika med brandeffekten i MW. Samma sifferskalor används för flöde m³/s och effekt MW. Detta innebär att i den punkt där effektkurvan sammanfaller med flödeskurvan är tumregeln uppfylld.

Den maximala simuleringstiden t_s för varje fall begränsas genom att beräkna när allt syre i lokalen är förbrukat enligt uttrycken nedan.

$$P(t) = \alpha_n t^n \quad (\text{W}) \quad (3.1)$$

$$E(t) = \alpha_n t^{n+1} / (n+1) \quad (\text{J}) \quad (3.2)$$

$$E(t_s) = \rho V s k \quad (\text{J}) \quad (3.3)$$

$$t_s = [(n+1) \rho V s k / \alpha_n]^{1/(n+1)} \quad (\text{s}) \quad (3.4)$$

där

ρ	luftens densitet, kg/m ³
V	lokalvolym, m ³
s	massandel O ₂ , -
k	förbränningsvärme, J/kgO ₂
α_n	tillväxthastighet, W/s ⁿ
n	tidspotens, -

Simuleringen startar med den övre zonhöjden lika med 1 mm och avbryts när den nedre zonhöjden är lika med 1 mm. Det är detta krav som avbryter simuleringen, när beräkningen egentligen skulle fortsätta med en enzonsmodell. Innan simulering avbryts på detta sätt, har det största brandflöde inträffat. Den maximala simuleringstiden enligt (3.4) redovisas i Tabell 3.2 för en del av de fall som kommer att beräknas.

Tabell 3.2 Maximal simuleringstid enligt 3.4

rumsvolym $V \text{ m}^3$	tidsexponent n -	konstant $\alpha_n \text{ W/s}^n$	brandtid $t_s \text{ s}$
150	2	23.440	391
300	2	2.930	986
300	2	23.440	493
300	2	187.520	246
600	2	23.440	621

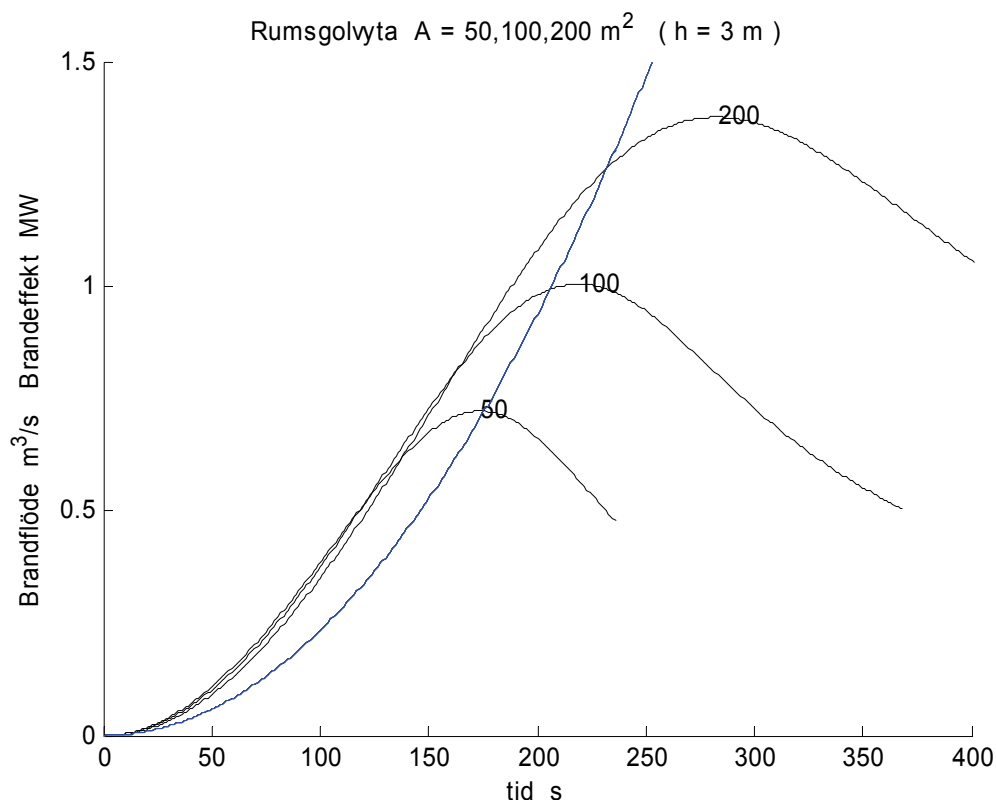
3.1 Parameter rumsgolvyta med konstant rumshöjd

Rumsvolymen begränsar en brands storlek. Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med rumsgolvytorna 50, 100 och 200 m^2 , vilket ger rumsvolymer 150, 300 respektive 600 m^3 . Rumshöjden är 3 m. De avkylande rumsytorna är 184.9, 320 respektive 569.7 m^2 .

De tre fallen i Figur 3.1 visar tydligt att rumsvolymen har stor betydelse för det dimensionerande brandflödet. Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

Siffrorna för brandflödet visar att en fyrdubbling av rumsgolvytan eller rumsvolymen nästan fördubblar brandflödet.

fall	rumsgolvyta $A \text{ m}^2$	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	50	0.72	1.01
bas	100	1.00	0.89
max	200	1.38	0.73



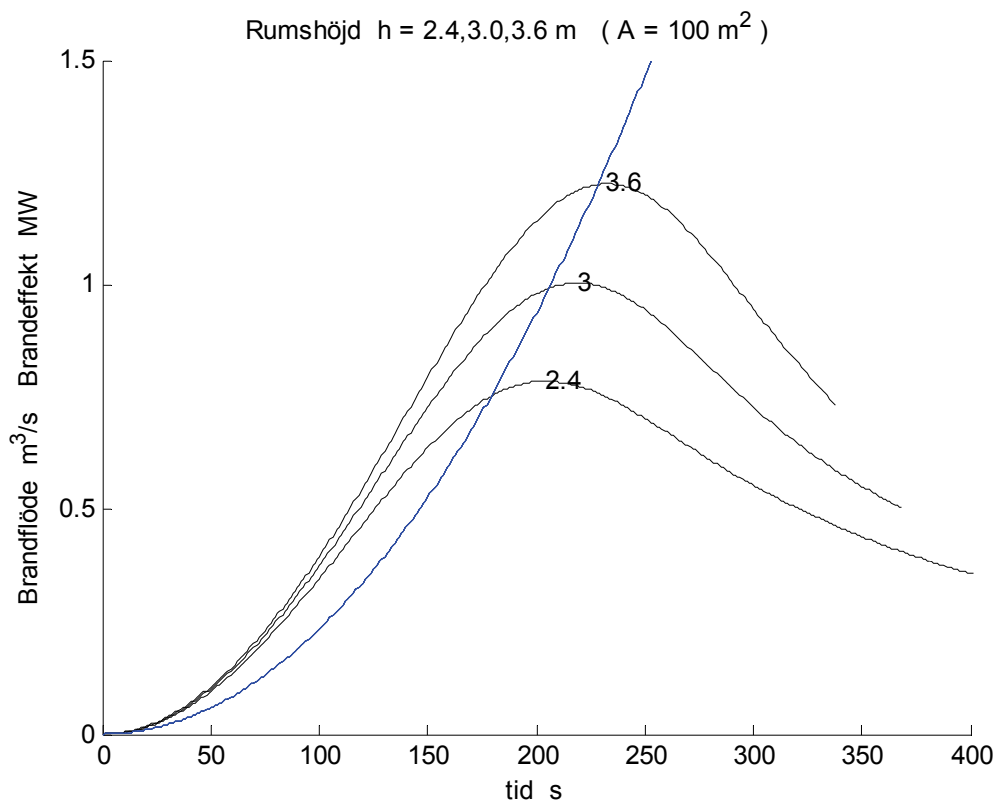
Figur 3.1 Brandflöde och brandeffekt för olika rumsgolvyta $A = 50, 100$ och 200 m^2 .

3.2 Parameter rumshöjd med konstant golvyta

Rumshöjden påverkar främst temperaturen för den övre zonen genom att brandplymens temperatur avtar med höjden, men samtidigt ökar plymflödet som går från den undre till den övre zonen. En lägre temperatur i brandgaslagret minskar värmeförluster och ökar därmed brandflödet. Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med rumshöjderna 2.4, 3.0 och 3.6 m med samma golvyta som för basfallet, nämligen 100 m^2 . Rumsvolymererna blir 240, 300 respektive 360 m^3 . Rumsytorna är 296, 320 respektive 344 m^2 .

De tre fallen i Figur 3.2 visar att rumshöjden har en viss betydelse för det dimensionerande brandflödet, men i praktiken finns den genomgående två rumshöjder 2.4 m för bostäder och 2.7 m för lokaler. Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	rumshöjd h m	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	2.4	0.79	0.81
bas	3.0	1.00	0.89
max	3.6	1.22	0.97



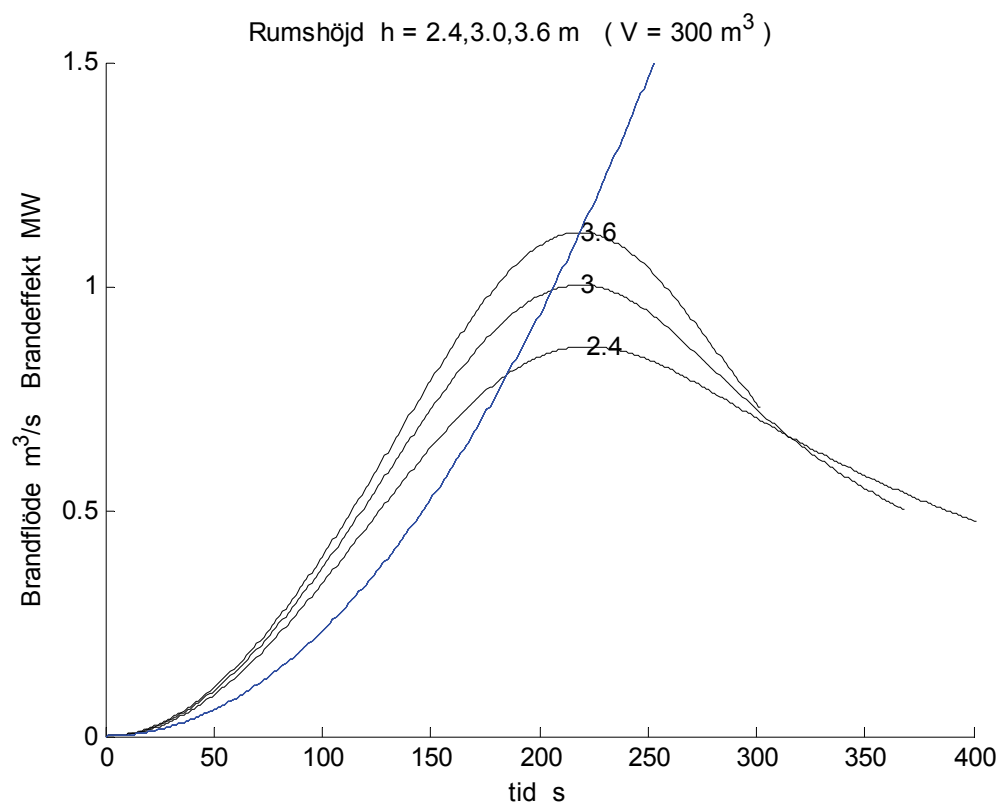
Figur 3.2 Brandflöde och brandeffekt för olika rumshöjd $h = 2.4, 3.0$ och 3.6 m och konstant golvyta 100 m^2 .

3.3 Parameter rumshöjd med konstant rumsvolym

Rumshöjden påverkar främst temperaturen för den övre zonen genom att brandplymens temperatur avtar med höjden, men samtidigt ökar plymflödet som går från den undre till den övre zonen. En lägre temperatur i brandgaslagret minskar värmeförluster och ökar därmed brandflödet. Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med rumshöjderna 2.4, 3.0 och 3.6 m med samma rumsvolym som för basfallet, nämligen 300 m^3 . Rumsgolvytorna justeras därför till 125, 100 respektive 83.3 m^2 och de omslutande ytorna är 357.3, 320 respektive 298.1 m^2 .

De tre fallen i Figur 3.3 visar att rumshöjden har en viss betydelse för det dimensionerande brandflödet, men i praktiken finns den genomgående två rumshöjder 2.4 m för bostäder och 2.7 m för lokaler. Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	rumshöjd h m	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	2.4	0.87	0.75
bas	3.0	1.00	0.89
max	3.6	1.12	1.00



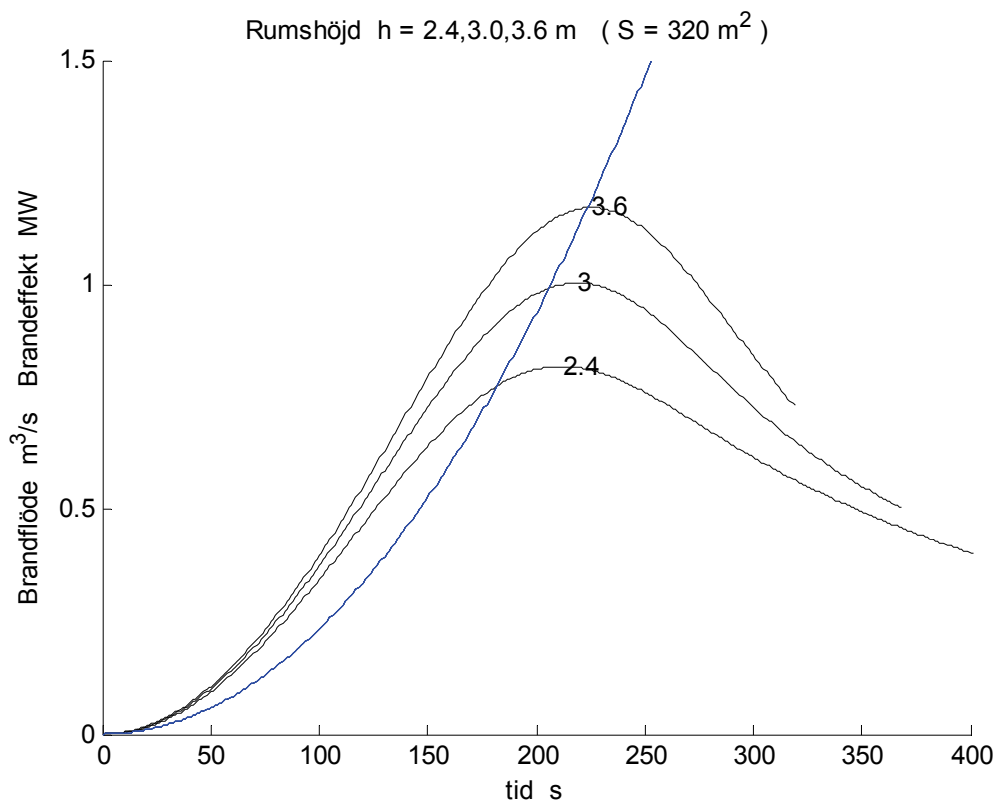
Figur 3.3 Brandflöde och brandeffekt för olika rumshöjd $h = 2.4, 3.0$ och 3.6 m och konstant rumsvolym 300 m^3 .

3.4 Parameterkänslighet för rumshöjd för konstant rumsyta

Rumshöjden påverkar främst temperaturen för den övre zonen genom att brandplymens temperatur avtar med höjden, men samtidigt ökar plymflödet som går från den undre till den övre zonen. En lägre temperatur i brandgaslagret minskar värmeförluster och ökar därmed brandflödet. Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med rumshöjderna 2.4, 3.0 och 3.6 m med samma rumsyta som för basfallet, nämligen 320 m^2 . Rumsgolvytorna justeras därför till 109.7, 100 respektive 91.2 m^2 och motsvarande rumsvolymer blir 263.3, 300 respektive 328.3 m^3 .

De tre fallen i Figur 3.4 visar att rumshöjden har en viss betydelse för det dimensionerande brandflödet, men i praktiken finns den genomgående två rumshöjder 2.4 m för bostäder och 2.7 m för lokaler. Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	rumshöjd h m	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	2.4	0.82	0.78
bas	3.0	1.00	0.89
max	3.6	1.17	0.99



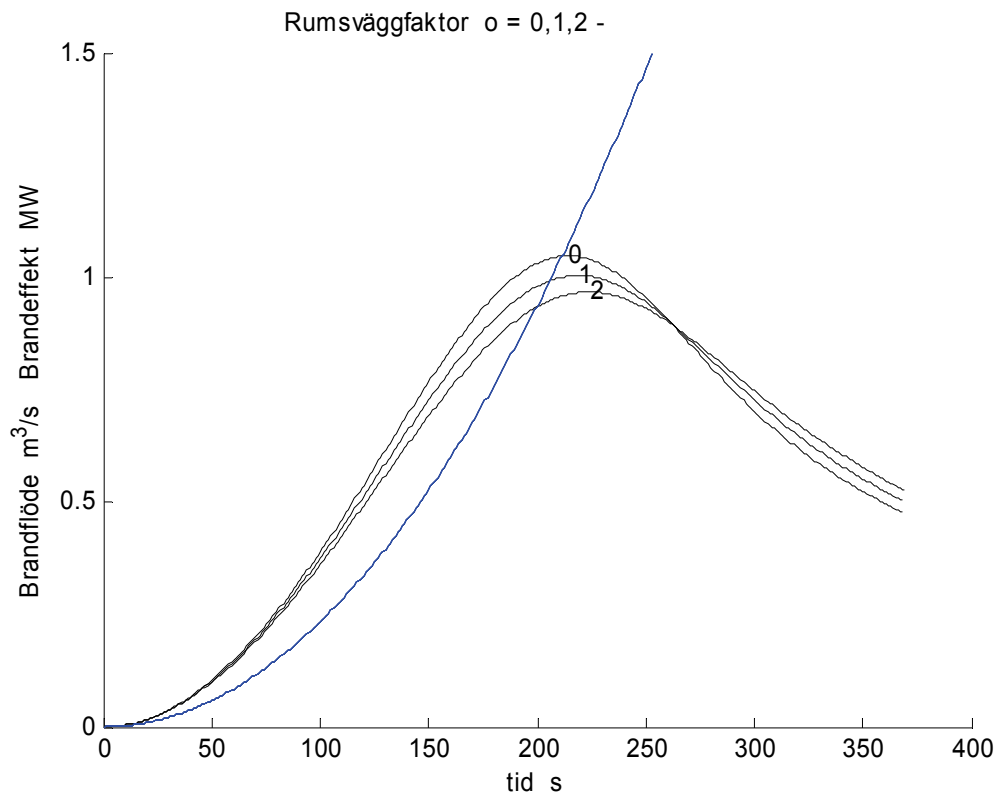
Figur 3.4 Brandflöde och brandeffekt för olika rumshöjd $h = 2.4, 3.0$ och 3.6 m och konstant rumsyta 320 m^2 .

3.5 Parameter rumsväggfaktor

Rumsväggfaktorn påverkar temperaturen genom att avkylningen ökar med kontaktytan. Ökad avkylning innebär minskat brandflöde. Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med rumsväggfaktorerna 0, 1 och 2. Den totala kontaktytan är för de tre fallen 200, 320 och 440 m^2 , varav 200 m^2 är golv- och takyta.

De tre fallen i Figur 3.5 visar att rumsväggfaktorn har en viss betydelse för det dimensionerande brandflödet, vilket avtar med ökande kontaktyta eller rumsväggfaktor. Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	rumsväggfaktor σ	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	0	1.05	0.98
bas	1	1.00	0.89
max	2	0.97	0.82



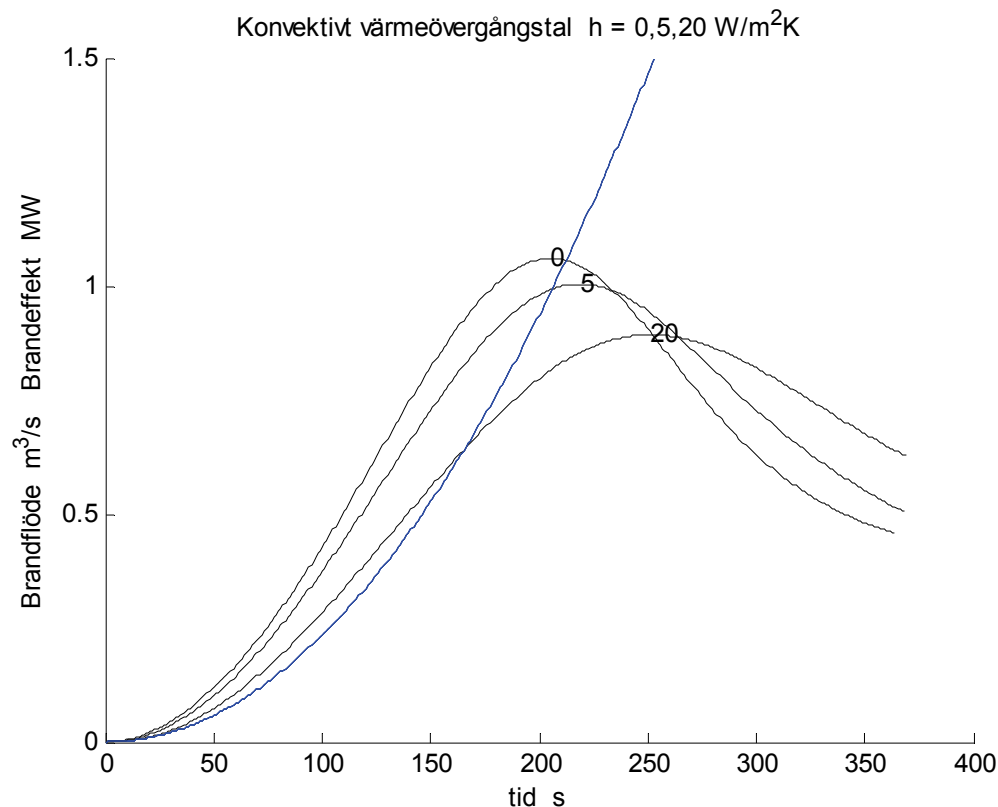
Figur 3.5 Brandflöde och brandeffekt för olika rumsväggfaktor $\sigma = 0, 1$ och 2 .

3.6 Parameter konvektivt värmeövergångstal

Ett stort konvektivt värmeövergångstal ökar värmeförlusterna och minskar därmed brandflödet. Värmeförlusterna genom rumsytorna påverkas till en del av strålningen från brandgaslagret. Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell för ett konvektivt värmeövergångstal på 0, 5 och 20 $\text{W}/\text{K}\text{m}^2$.

De tre fallen i Figur 3.6 visar att det konvektiva värmeövergångstalet har en viss betydelse för det dimensionerande brandflödet. Siffrvärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	parameter $\text{W}/\text{K}\text{m}^2$	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	0	1.06	1.08
bas	5	1.00	0.89
max	20	0.89	0.60



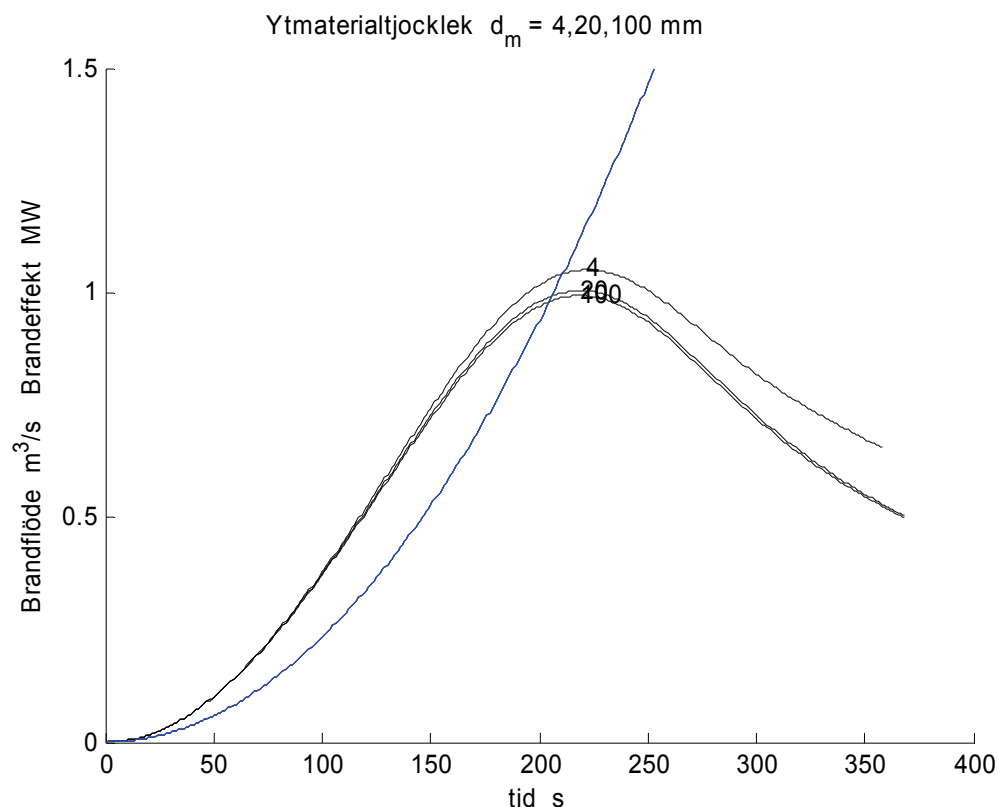
Figur 3.6 Brandflöde och brandeffekt för olika konvektivt värmeövergångstal $h = 0, 5$ och $20 \text{ W}/\text{Mm}^2$.

3.7 Parameter ytmaterialtjocklek för betong

Det inledande brandförloppet är tidsmässigt förhållandevis kort jämfört med normala värmetransportförlopp i byggnader. Endast en mindre del av en vägg, ett golv eller ett innertak påverkas av en brand under den inledande fasen. Detta innebär att det oftast är en liten skillnad mellan lätta och tunga byggnader eller mellan byggnader med tunna eller tjocka väggar och bjälklag, när det gäller temperaturpåverkan under kortare tid. Ytmaterialtjockleken för alla ytor har satts till 4, 20 (basfall) och 100 mm.

Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med ytmaterialtjockleken 4, 20 och 100 mm. De tre fallen i Figur 3.7 visar att skillnaden är liten mellan 20 mm-fallet och 100 mm-fallet för ett brandförlopp som är överspelat på mindre än 400 s. Notera att 4 mm-fallet har ett något större brandflöde, eftersom rummet kyler sämre och avslutas tidigare när den övre zonen når golvnivå. Siffrvärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	ytmaterialtjocklek d_m m	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	0.004	1.05	0.91
bas	0.020	1.00	0.89
max	0.100	0.99	0.88



Figur 3.7 Brandflöde och brandeffekt för olika ytmaterialtjocklek $d_m = 4, 20$ och 100 mm för betong.

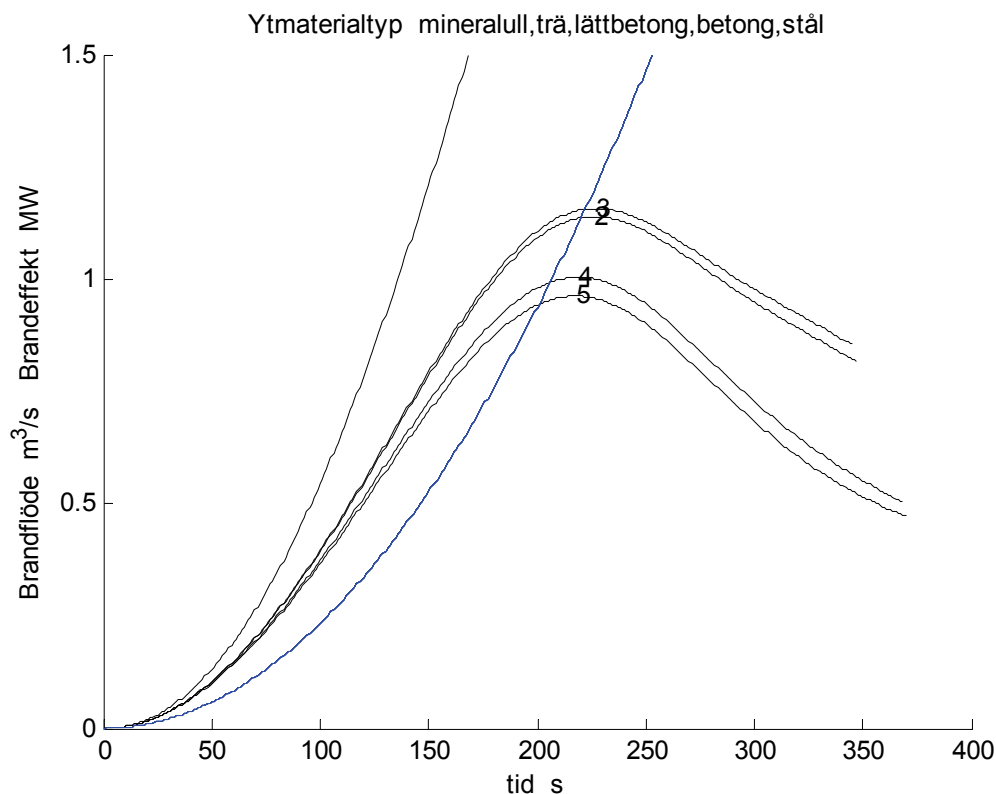
3.8 Parameter ytmaterialtyp

Brandflödet påverkas påtagligt genom rumsytors kylförmåga på grund av ytornas storlek och ytornas egenskaper. Detta har visats tidigare med rumsväggfaktorn. De fem materialen mineralull, trä, lättbetong, betong och stål har använts med något avrundade medelvärden. Det finns många olika varianter av dessa material.

Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med ytmaterialen mineralull, trä, lättbetong, betong (basfallet) och stål. De fem fallen i Figur 3.8 visar att mineralull skiljer sig betydligt från de övriga materialen. Trä och lättbetong verkar snarlika med betydligt lägre värmeledningsförmåga och något lägre värmelagringsförmåga ger ett större brandflöde än de andra två materialen betong och stål. Avkylningen blir sämst med rumsytor av mineralull, vilket var väntat och därefter kommer trä och lättbetong.

Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	material	kg/m^3	J/kgK	W/mK	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
1	mineralull	40	840	0.04	3.10	1.84
2	trä	500	2500	0.15	1.14	0.96
3	lättbetong	800	960	0.22	1.16	0.96
4(bas)	betong	2200	880	1.28	1.00	0.89
5	stål	7800	490	40.00	0.96	0.86



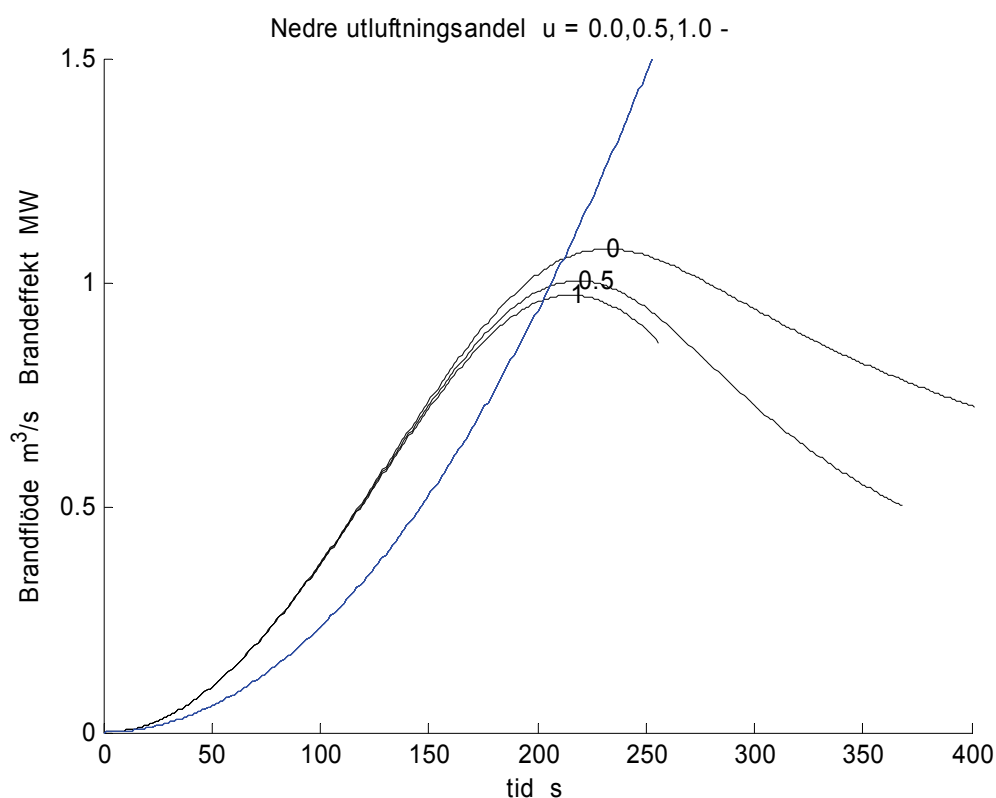
Figur 3.8 Brandflöde och brandeffekt för olika ytmaterial mineralull, trä, lättbetong, betong (basfallet) och stål.

3.9 Parameter nedre utluftsandelen

Hur utluftning sker från ett rum med en brand påverkar brandförloppet. Enbart utluftning överst i ett rum innebär att brandgaslagret delvis utluftas medan den nedre rena zonen inte utluftas. Den syrerika luften utluftas inte, vilket gör att branden kan pågå längre. Det omvända fallet med utluftning enbart nederst i rummet innebär att brandflödet driver ut den syrerika luften i den nedre zonen, vilket förkortar brandförloppet.

Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med nedre utluftsandel 0.0, 0.5 och 1.0. De tre fallen i Figur 3.9 visar att den nedre utluftsandelens andelen har en viss betydelse för det dimensionerande brandflödet, vilket avtar med ökande nedre utluftsandel. Notera att alla de tre kurvorna avslutas när den övre zonen når golvnivå. Siffrvärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	nedre utluftsandel u -	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	0.0	1.08	0.85
bas	0.5	1.00	0.89
max	1.0	0.97	0.90



Figur 3.9 Brandflöde och brandeffekt olika nedre utluftsandel $u = 0.0, 0.5$ och 1.0 .

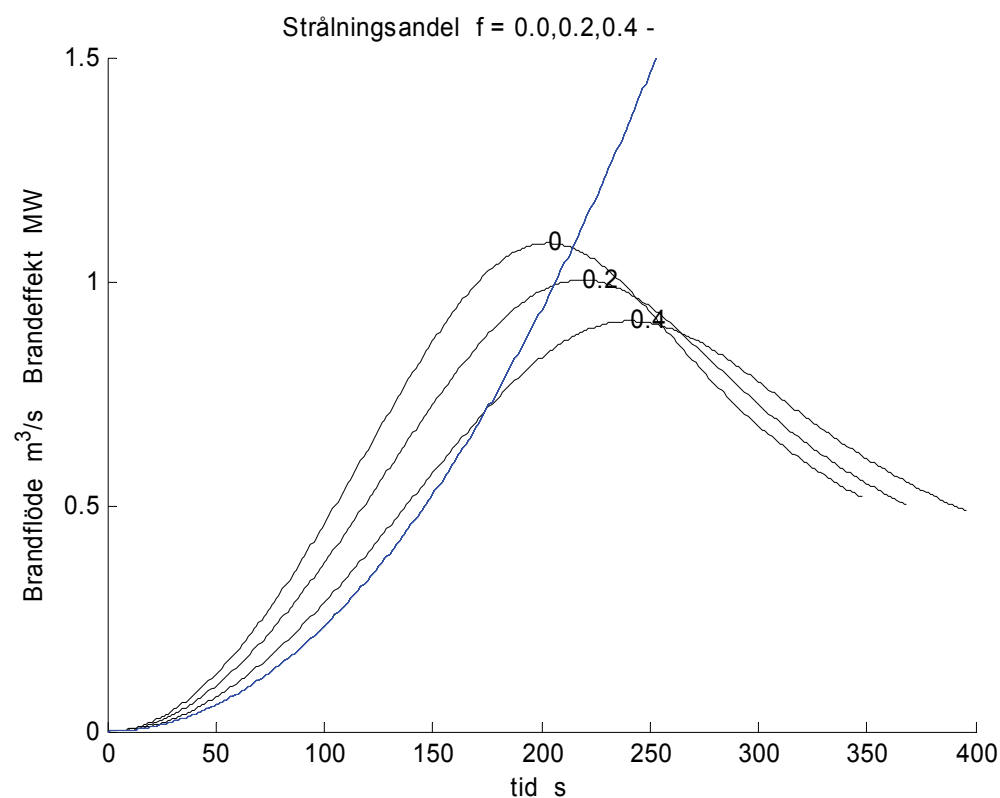
3.10 Parameter strålningsandel

Brandeffekten kan delas upp i en mindre strålningsdel och en större konvektiv del. Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med strålningsandelen 0.0, 0.2 och 0.4. De tre fallen i Figur 3.10 visar att strålningsandelen har en viss betydelse för det dimensionerande brandflödet genom att ökad strålning ökar den direkta avkylningen genom omgivande ytor, vilket minskar brandflödet. Ytorna kan oftast föra bort tillförd värmestrålning inåt materialet än att avge den tillförda värmen konvektivt till rumsluften.

Det konvektiva värmeövergångstalet mellan luft och en yta kan sättas till 5 W/Km^2 . Ett motsvarande värmeövergångstal kan beräknas för till ett betongskikt på 1.28 och 12.8 mm, vilket blir 1000 respektive 100 W/Km^2 . Detta visar att betongytors värmebortledande förmåga är mycket stor jämfört med den konvektiva förmågan för en yta. En liknande kalkyl för trä med skikten 1.4 och 14.0 mm ger högre men betydligt lägre siffervärdena 100 respektive 10 W/Km^2 .

Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	strålningsandel f	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	0.0	1.09	1.12
bas	0.2	1.00	0.89
max	0.4	0.91	0.67



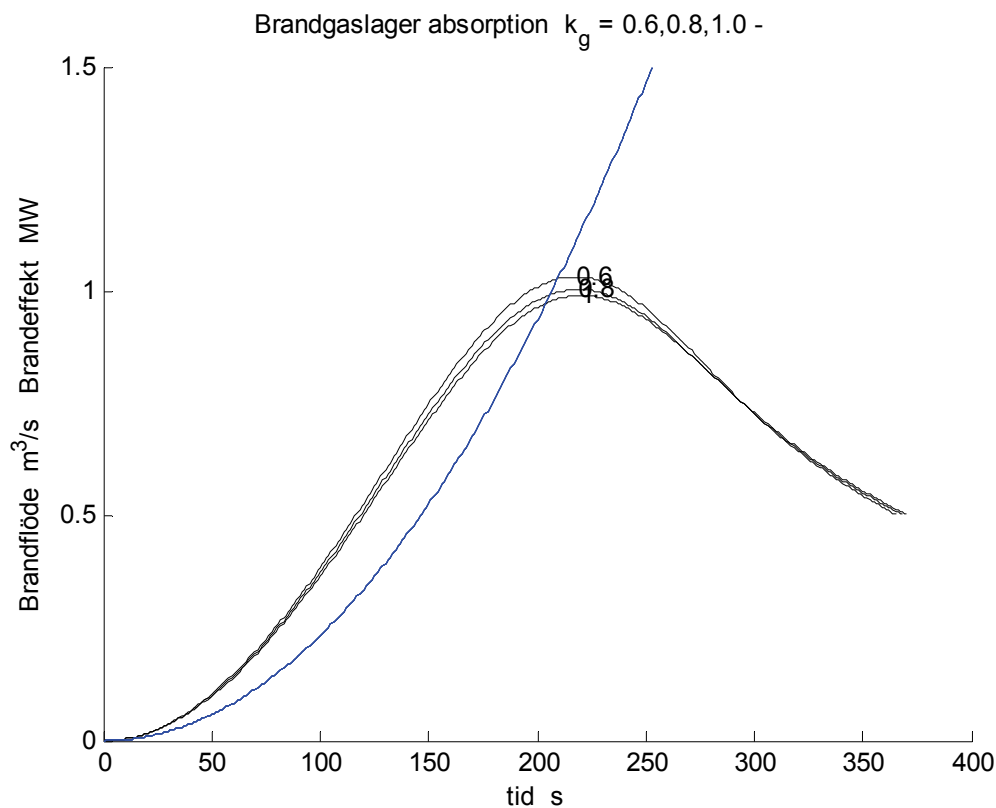
Figur 3.10 Brandflöde och brandeffekt för olika strålningsandel $f = 0.0, 0.2$ och 0.4 .

3.11 Parameter gasabsorptionskoefficient

Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med gasabsorptionskoefficient 0.6, 0.8 och 1.0. Strålningsutbytet mellan brandgaslagret och rumsytorna ökar med ökande gasabsorptionskoefficient, men minskar strålningsutbytet mellan rumsytorna. Detta ökar troligen värmeförlusterna och därmed minskar brandflödet. De tre fallen i Figur 3.11 visar att denna parameter har en liten betydelse för det dimensionerande brandflödet.

Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	k_g	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	0.6	1.03	0.93
bas	0.8	1.00	0.89
max	1.0	0.99	0.87



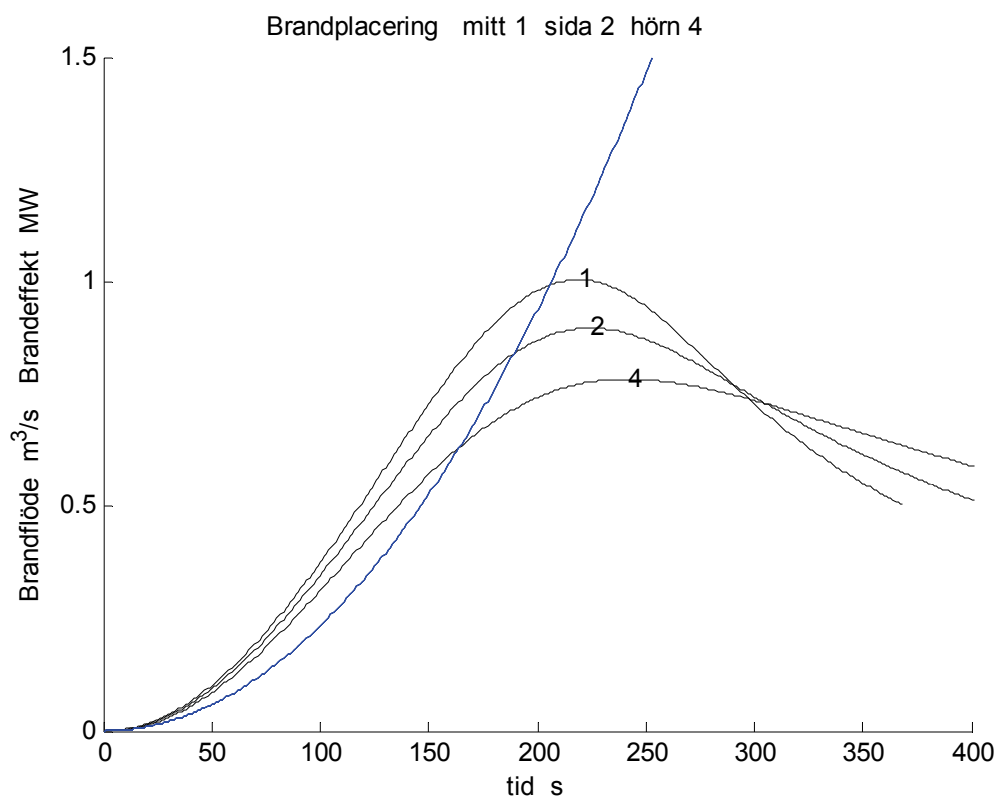
Figur 3.11 Brandflöde och brandeffekt för gasabsorptionskoefficient $k_g = 0.6, 0.8$ och 1.0 .

3.12 Brandens placering

Brandplymen påverkas av brandens placering i förhållande till väggar. En brand intill en vägg beräknas genom att spegla branden i väggen och dubbla effekten för att beräkna ett plymflöde, vilket därefter halveras. En hörnplacerad brand innebär två speglingar. Brandeffekten ökas med en faktor 4 och en fjärdedel av det erhållna plymflödet är det sökta plymflödet för en hörnplacerad brand. Plymflödet för vägg- och hörnplacering reduceras med en faktor $0.63 (2^{-2/3})$ respektive $0.40 (4^{-2/3})$. Detta innebär att plymflödet har högre temperatur för fallen med sida- eller hörnplacering jämfört med mittplacering. En högre brandgaslager-temperatur medför att brandflödet minskar, eftersom värmeförlusterna ökar. De tre fallen i Figur 3.12 visar att brandens placering har rätt stor betydelse för det dimensionerande brandflödet.

Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	m	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
mitt	1	1.00	0.89
sida	2	0.90	0.76
hörn	4	0.78	0.57



Figur 3.12 Brandflöde och brandeffekt för olika brandplacering mitt, sida och hörn med motsvarande plymparameter $m = 1, 2$ och 4 .

3.13 Brandens nivå

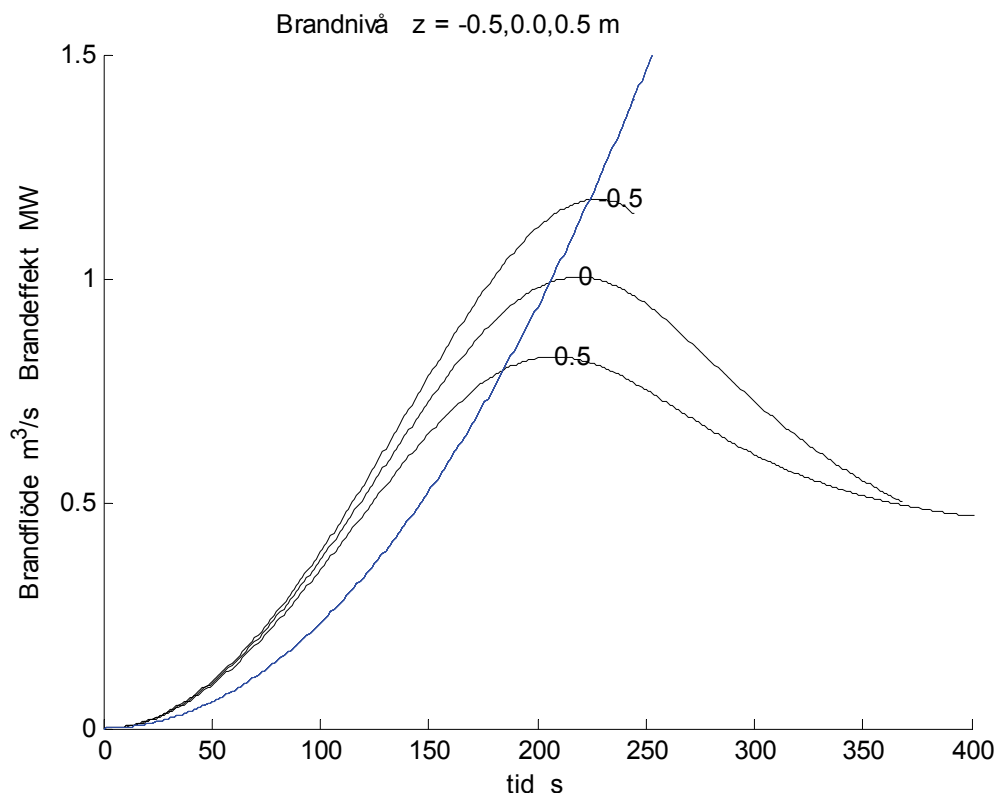
Plymflödet ökar med höjden. En högt placerad brand ger därför ett mindre plymflöde med hög temperatur till brandgaslagret. En hög brandgaslagertemperatur medför att värmeförlusterna ökar och därmed minskar brandflödet.

Brandens nivå kan användas för att beskriva en brands storlek och inte dess egentliga nivå.

Brandflödet i m^3/s redovisas tillsammans med brandeffekten i MW för en tvåzonsmodell med brandnivåerna -0.5, 0.0 och 0.5 m över golv. De tre fallen i Figur 3.13 visar att brandens nivå har en stor betydelse för det dimensionerande brandflödet.

Siffrvärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	z	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	-0.5	1.18	0.97
bas	0.0	1.00	0.89
max	0.5	0.83	0.82



Figur 3.13 Brandflöde och brandeffekt för olika brandnivå $z = -0.5, 0.0$ och 0.5 m.

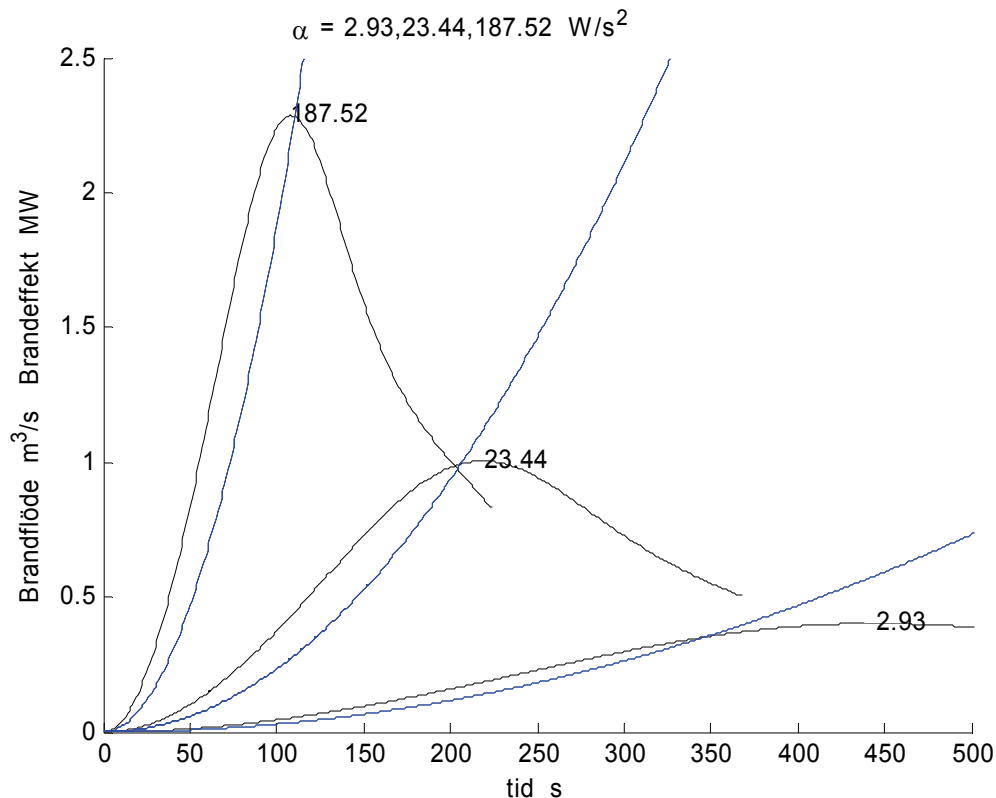
3.14 Brandeffekt enligt t^2 -brandförlopp

En brand som tillväxer snabbt kan uppnå en högre effekt innan rummets luftvolym är förbrukad. Detta visas med basfallets tillväxthastighet 23.44 W/s^2 , minfallets 2.93 W/s^2 för brandförloppet slow och maxfallets 187.52 W/s^2 för brandförloppet ultra fast. De tre tillväxthastigheterna skiljer en faktor 8. De teoretiska brandtiderna enligt (3.4) och Tabell 3.2 för de tre fallen är 986, 493 och 246 s och de förhåller sig som 4:2:1.

Notera att maximalt brandflöde uppnås på mindre än halva den möjliga brandtiden. Detta innebär att mindre än 1/8 av syremängden har förbrukats. Förbränningen borde därför vara ganska ren fram till när största brandgasflöde inträffar.

De tre fallen i Figur 3.14 visar att brandflödet beror mycket starkt på tillväxthastigheten och motsvarande effektkurvor visar att effekten för de tre fallen är den samma siffermässigt i MW. Siffervärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	$\alpha_2 \text{ W/s}^2$	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	2.93	0.40	0.69
bas	23.44	1.00	0.89
max	187.52	2.28	1.04



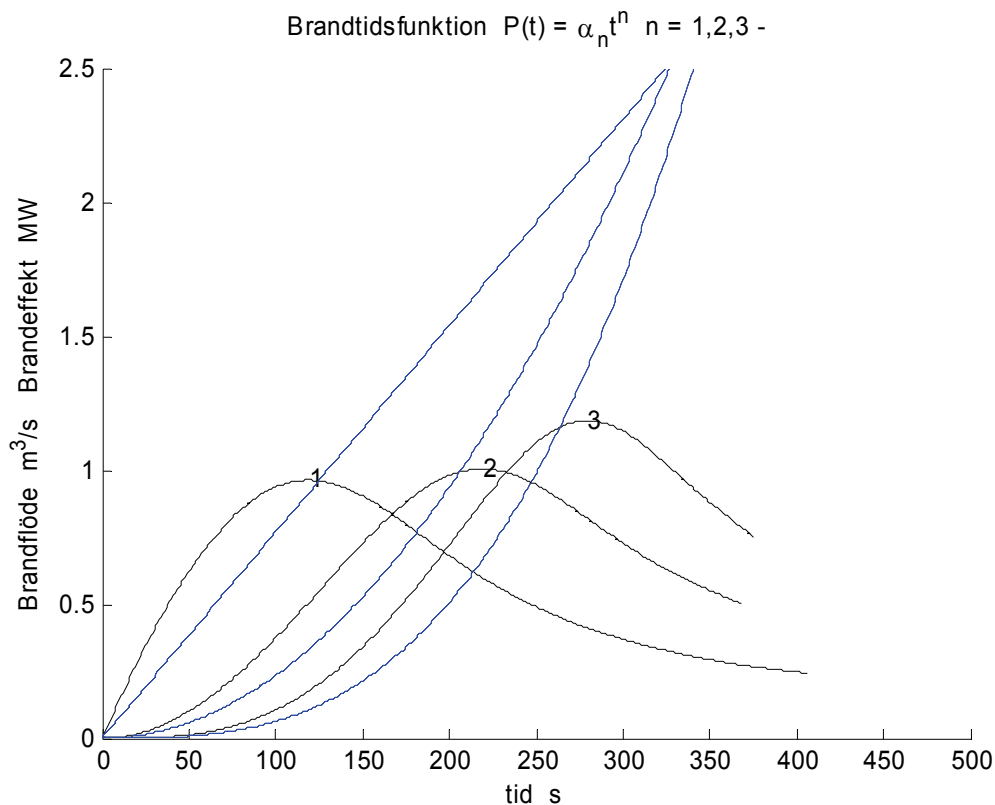
Figur 3.14 Brandflöde och brandeffekt för olika brandförlopp slow (2.93), medium/fast (23.44) och ultra fast (187.52).

3.15 Brandeffekt enligt t^n -brandförlopp

Tre olika brandfunktioner med olika tidsexponent n och konstant α_n har provats. Tidsexponenterna 1, 2 och 3 har använts och konstanten α_n har anpassats så att den teoretiska brandtiden blir lika med basfallets.

De tre fallen i Figur 3.15 visar att brandflödet inte skiljer mycket för brandförlopp med samma teoretiska brandtid. Siffrvärden för brandflödet och tumregel eller kvoten mellan brandflöde och brandeffekt redovisas nedan.

fall	tidsexponent n -	konstant α_n W/s ⁿ	brandflöde m ³ /s	tumregel m ³ /sMW
min	1	7702.360	0.96	1.05
bas	2	23.440	1.00	0.89
max	3	0.063	1.19	0.86



Figur 3.15 Brandflöde och brandeffekt för olika brandfunktioner $P(t) = \alpha_n t^n$ för $n = 1, 2$ och 3 och med samma maximala brandtid.

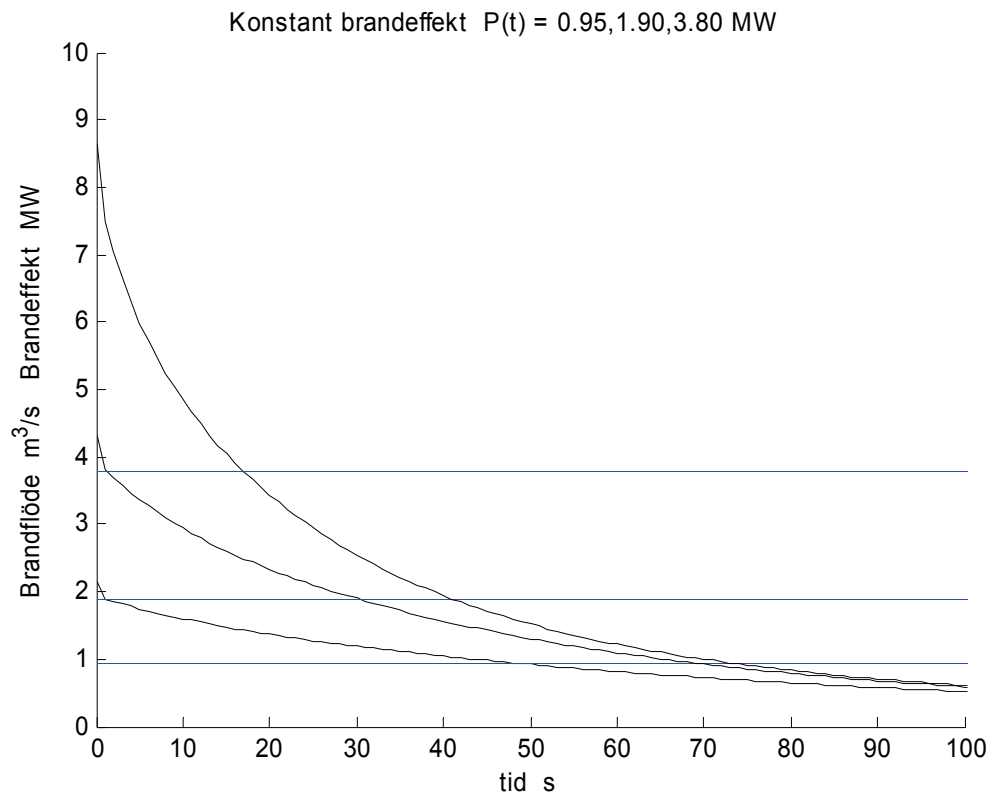
3.16 Brandeffekt enligt t^0 -brandförlopp

Bränder av typen poolbränder kan i det idealiserade fallet ha en konstant brandeffekt. Detta innebär att det dimensionerande brandflödet uppstår direkt och avtar därefter. Detta beror på att i starten finns det inga temperaturskillnader mellan rumsluft och rumsytor. Den konvektiva effekten $(1-f)P$ kan därför räknas om till ett brandflöde q_b enligt (3.5) nedan.

$$q_b = (1-f) P / (\rho_s T_s c_p) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.5)$$

där ρ_s är luftens densitet i kg/m^3 , T_s är dess temperatur i K och c_p är dess specifika värme J/kgK. Notera att produkten $\rho_s T_s$ är konstant, eftersom $\rho \sim 1/T$. Omräkningsfaktorn eller den rättade tumregeln blir i detta fall lika med $2.28 \text{ m}^3/\text{sMW}$ med $f=0.8$, $\rho_s=1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, $T_s=293 \text{ K}$ och $c_p=1000 \text{ J}/\text{kgK}$. Tre konstanta brandeffekter har beräknats för basfallet med samma teoretiska brandtid som för tre t^2 -brandförlopp, slow, medium/fast och ultra fast, redovisade tidigare i avsnitt 3.14 i Figur 3.14. Simuleringsresultatet redovisas i Figur 3.16 och stämmer med det förväntade. Notera att när kurvorna för brandflöde och brandeffekt sammanfaller är den ursprungliga tumregeln uppfylld. Detta sker inom 20, 40 och 60 s för de tre brandeffekterna 3.80, 1.90 respektive 0.95 MW.

fall	brandeffekt MW	brandflöde m^3/s	tumregel m^3/sMW
min	0.95	2.16	2.28
bas	1.90	4.32	2.28
max	3.80	8.64	2.28



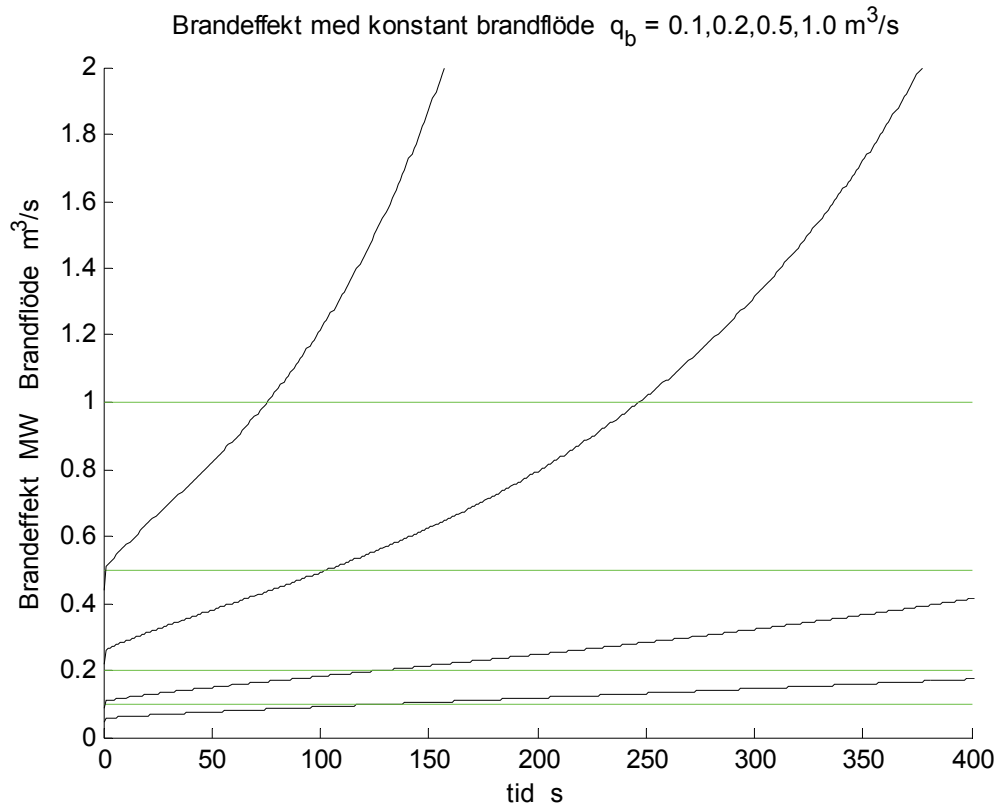
Figur 3.16 Brandflöde och brandeffekt för olika konstanta brandeffekter.

3.17 Brandeffekt med konstant brandflöde

Brandflödet har genomgående ett största värde för alla de fall där brandeffekten ökar. Detta kan förklaras med att tvåzonsmodellens värmeförluster ökar snabbare än vad brandeffekten ökar.

Ett sätt att visa detta att värmeförlusterna växer snabbare än värmetillförseln genom branden är att beräkna den brandeffekt som krävs för att hålla brandflödet konstant. Detta innebär att det åtgår en fast del av brandeffekten för det konstant brandflödet och den resterande brandeffekten täcker tvåzonsmodellens värmeförluster.

Brandeffekten i MW för konstant brandflöde 0.1, 0.2, 0.5 och 1.0 m³/s redovisas för en tvåzonsmodell i Figur 3.17 tillsammans med de fyra brandflödena.



Figur 3.17 Brandeffekt med konstant brandflöde $q_b = 0.1, 0.2, 0.5$ och $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.15 Sammanfattning

Några slutsatser av parameterkänslighetsanalysen är följande:

Brandflödet har ett maximum för alla fall innan övre zonen når ner till golvnivå.

Brandflödet i m^3/s är genomgående större än brandeffekten i MW före brandflödets maxima och tvärtom efter. Tumregeln stämmer ungefär för brandflödets maxima.

Övergången från tvåzonsmodell till enzonsmodell sker långt innan att den teoretiska brandtiden uppnås.

Särskilt för det maximala brandflödet gäller följande:

Brandflödet fördubblas nästan när rumsvolymen fördubblas.

Brandflödet ändras proportionellt till hälften med en ändring av rumshöjd.

Brandflödet minskar obetydligt med ändrad rumsväggfaktor.

Brandflödet avtar något när utluftning sker via den nedre zonen.

Brandflödet ökar något för tunna ytmaterial, men normala väggar kan betraktas som halvoändliga. Det inledande brandförloppet påverkar endast de yttersta delarna.

Brandflödet ökar betydligt för trämaterial jämfört med betong, men detta är inte ett vanligt fall. Rum kan ha lätta väggkonstruktioner, men bjälklag är ofta av betong. Ett fall med termiskt försumbara väggar kan fås med en rumsväggfaktor lika med noll.

Brandflödet avtar betydligt med ökande strålningsandel dock inte proportionellt.

Brandflödet ökar starkt med ökande brandtillväxthastighet för t^2 -brandförlopp.

Brandflödet skiljer något mellan olika t^n -brandförlopp, vilka har samma teoretisk brandtid.

Brandflödet för poolbränder med konstant brandeffekt fås momentant och kan beräknas väl om den konvektiva effekten är given. Brandflödet avtar snabbt under tumregelns värde.