Aalborg Universitet

Dimensionering af Brandventilation

Nielsen, Peter V.

Publication date:
2010

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Link to publication from Aalborg University

Citation for published version (APA):
Nielsen, P. V. (2010). *Dimensionering af Brandventilation*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Lecture notes Nr. 22

General rights
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 -

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from vbn.aau.dk on: July 07, 2025

Dimensionering af Brandventilation

Peter V. Nielsen

ISSN 1901-7286
DCE Lecture Notes No. 22

AALBORG UNIVERSITET
Institut for Byggeri og Anlæg

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Architectural Engineering

DCE Lecture Notes No. 22

Dimensionering af Brandventilation

Peter V. Nielsen

Februar 2010

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2010 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sohngårdsholmsvej 57,
DK-9000 Aalborg, Danmark

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

ISSN 1901-7286
DCE Lecture Notes No. 22

Dimensionering af Brandventilation

Peter V. Nielsen

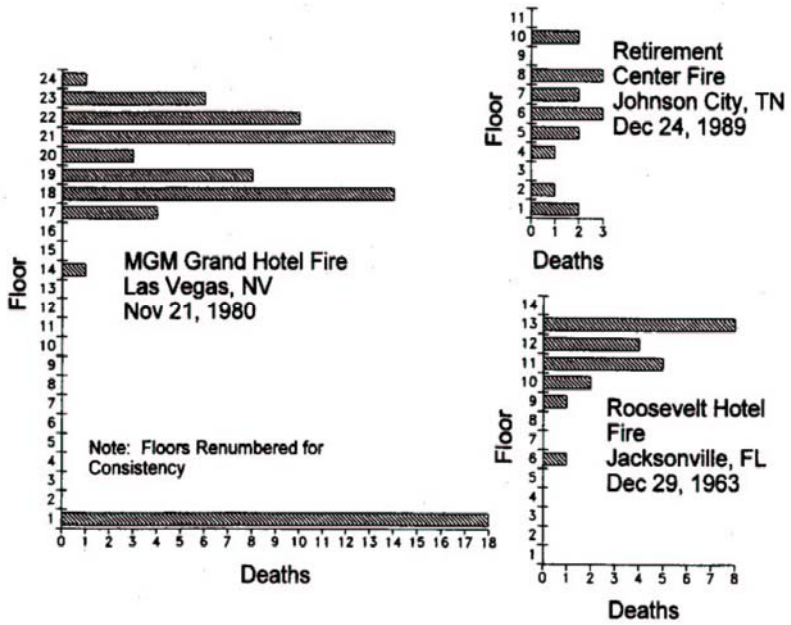
1 Indledning

I et gammelt kinesisk ordsprog hedder det, /1/:

Ilden er en god tjener men en streng herre

Det er ilden som den *gode tjener*, der er en vigtig del af vort liv med dens varme, energi og hjælp ved tilberedning af mad, og det er ilden som den *strenge herre*, der ødelægger huse, byer, skove, enten ved uheld, naturkatastrofer eller under krig. Det er ilden og dens flammer, der fortærer en bygning, men det er nødvendigvis ikke ilden men derimod ofte giftig røggas og varme, der er farlige for de mennesker, der er i bygningen.

Figur 1 viser som eksempler resultatet af tre hotelbrande i USA, /2/. De tre brande har alle fundet sted i højhuse i henholdsvis Jacksonville, Las Vegas og Johnson City. Branden har i alle tre tilfælde været begrænset til stueetagen, men det er meget karakteristisk, at det store antal dødsfald forekommer i de øverste etager, hvor giftig røggas er blevet ført op via ventilationskanaler, elevator- og trappeskakter mm. I en enkelt af brandene har der slet ikke været tab af menneskeliv i stueetagen.



Figur 1 Fordeling af omkomne ved tre hotelbrande i højhuse.

Det årlige antal omkomne ved brande i Danmark er 80-100 personer, og derudover invalideres yderligere 400-500 personer ved brande. Ud over menneskeliv er der også store samfundsmæssige omkostninger ved brande. Det skønnes, at 1 pct. af bruttonationalproduktet tabes årligt ved brande. Det svarer til 10-12 mia. kroner, og heraf er 2,5 mia. kroner direkte skadesudbetalinger.

Det ses således, at det er vigtigt at anvende en ventilation, der kan transportere røg og varme ud af en brændende bygning så hurtigt som muligt uden gener for de personer, der skal evakueres. Denne ventilation kaldes brandventilation (engelsk: smoke management), og den har til formål at:

- øge personsikkerheden
- lette indsatsmulighed for brandvæsenet
- mindske skader på bygninger
- mindske brand- og røgudbredelsen.

Det er især de to første punkter, som beskriver brandventilationens primære formål. Derfor er brandventilation en ventilationsform, som er relateret til brandens første forløb.

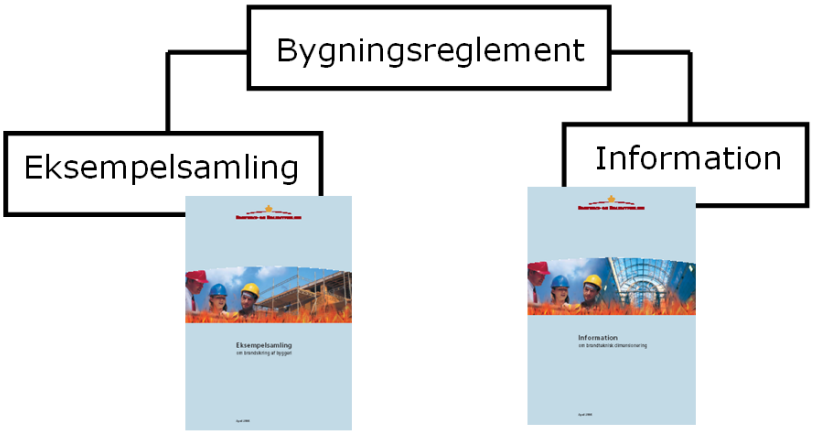
Dimensionering af brandventilation, samt andre tiltag i forbindelse med brand og brandsikkerhed, er beskrevet i det gældende bygningsreglement.

2 Bygningsreglementet

Det er bygningsreglementet, der formulerer kravet til brandventilation og til dokumentation af brandventilation, /3/. Den brandtekniske dimensionering formuleres i kapitel 5. Brandforhold. Kapitlet indeholder følgende afsnit:

5.1 Generelt
5.2 Flugtveje og redningsforhold
5.3 Konstruktive forhold
5.4 Brandtekniske installationer
5.5 Brand og røgspredning
5.6 Redningsberedskabets indsatsmulighed.

Det er muligt at dimensionere en traditionel bygning og dens installationer ud fra de krav, der er formuleret i bygningsreglementet ved at følge alle de relevante punkter i dette reglement (normbaseret dimensionering). Det har i tidens løb vist sig, at disse krav kan medføre en begrænsning af bygningers layout og arkitektur, så derfor er der givet en mulighed for at fravige visse punkter, hvis det kan dokumenteres, at det grundlæggende sikkerhedsniveau er opnået ved en funktionsbaseret dimensionering.



Figur 2 Bygningsreglement, Eksempelsamling og Information.

Hele denne omlægning af Bygningsreglementet blev gennemført i 2004, og den betød, at den tidligere gode erfaring med den nye normbaserede dimensionering blev samlet i en eksempelsamling, /4/, medens den funktionsbaserede metode blev beskrevet i en information om brandteknisk dimensionering, /5/, se figur 2. Da den normbaserede brandventilation er baseret på mange års erfaring med mange traditionelle bygningstyper, kan den stadig spille en væsentlig rolle ved dimensionering i forbindelse med det almene byggeri. Omvendt er den funktionsbaserede brandventilation især egnet til byggeri, som man ikke tidligere har haft erfaring med. Det kan være

en ny arkitektur, et nyt layout af byggeriet, og det kan være i forbindelse med nye utraditionelle anvendelser af bygninger.

Forskellen imellem normbaseret dimensionering og funktionsbaseret dimensionering kan illustreres med det følgende eksempel, der vedrører en flugtvej: Ved normbaseret dimensionering skal døre i flugtveje have en bredde på mindst 10 mm for hver person, der skal passere den pågældende flugtvej for at komme til en udgang. En funktionsbaseret dimensionering kræver, at flugtveje udformes med en sådan rummelighed og fremkommelighed, at de kan betjene det antal personer, som skal benytte disse. I det første tilfælde taler vi om samfundets ansvar, fordi løsningen er relateret til valgte normer, medens der i det funktionsbestemte tilfælde er tale om ejerens ansvar.

Bebyggelser som for eksempel beboelse, hoteller, plejehjem, skoler, industri og lager, garageanlæg, osv. opdeles efter anvendelseskategori specificeret ud fra:

- mobilitet
- dag-/natophold
- stedkendt
- personbelastning.

Tabet 1 viser opdelingen af anvendelseskategorierne. Der tages udgangspunkt i personers mobilitet. Ikke selvhjulpne personer placerer en bygning i anvendelseskategori 6. Blandt selvhjulpne personer skelnes imellem dagophold og dag/natophold. Disse grupper opdeles igen i stedkendt og ikke stedkendt, og til slut opdeles lokalerne i kategorien færre end 50 personer og flere end 50 personer. Dette giver alt i alt 5 kategorier. Herefter indplaceres de forskellige bygningsfunktioner som beboelse, hoteller, plejehjem, skoler, industri og lager, garageanlæg og så videre i disse kategorier, se tabel 1.

Tabel 1. Anvendelseskategorier.

Anvendelses-kategori	**Beskrivelse**	**Eksempler**
1	Dagophold med sporadisk personophold.	Kontorer, garager, visse industri- bygninger, lagerbygninger, avls- og driftsbygninger, udhuse.
2	Dagophold, hvor de personer, som opholder sig i afsnittet, har kendskab til bygningens flugtveje og er i stand til selv at bringe sig i sikkerhed.	Skoler, visse daginstitutioner, skolefritidsordninger, dagcentre, visse industribygninger. Alle lokaler med højst 50 personer.
3	Dagophold, hvor de personer, som opholder sig i afsnittet, ikke har kendskab til bygningens flugtveje men er i stand til selv at bringe sig i sikkerhed.	Butikker, forsamlingslokaler, biografer, restauranter, selskabslokaler, idrætshaller, kirker, diskoteker. Alle lokaler beregnet til mere end 50 personer.
4	Natophold, hvor de personer, som opholder sig i afsnittet, har kendskab til bygningens flugtveje	Etageboligbyggeri, kollegier. Enfamiliehuse, dobbelthuse,

	og udgange og er i stand til selv at bringe sig i sikkerhed.	kædehuse, gruppehuse, sommerhuse.
5	Natophold, hvor de personer, som opholder sig i afsnittet, ikke har kendskab til bygningens flugtveje men er i stand til selv at bringe sig i sikkerhed.	Hoteller, kollegier, vandrehjem, kroer, pensionater.
6	Dag- og natophold, hvor de personer, som opholder sig i afsnittet, ikke har kendskab til bygningens flugtveje og ikke er i stand til selv at bringe sig i sikkerhed.	Ældreboliger til plejekrævende ældre, sengeafsnit på hospitaler, fængsler, institutioner til fysisk og psykisk handicappede, vuggestuer, børnehaver.

Det er ikke alle, der umiddelbart kan arbejde med brandteknisk dimensionering. Med det nuværende brandtekniske vidensniveau og de nuværende muligheder for at modellere brandforløb og menneskelig adfærd kræver det en brandteknisk indsigt for at kunne vurdere, om metoderne er anvendelige i det konkrete tilfælde. Det påhviler ejeren (den projekterende) at sikre, at der anvendes de bedst egnede metoder og procedurer for det projekt, der dimensioneres, /3/.

3 Funktionsbaseret brandteknisk beregning

Funktionsbaserede brandkrav forudsætter acceptkriterier. I bygningsreglementet kapitel 6.1 stk. 1 formuleres følgende kriterium:

Bygninger skal opføres og indrettes, så der opnås tilfredsstillende tryghed mod brand og mod brandspredning til andre bygninger på egen eller omkringliggende grunde. Der skal være forsvarlige muligheder for redning af personer og for slukningsarbejder.

For at gøre acceptkriterierne operative er der i Information om Brandteknisk Dimensionering, /5/ listet en række forhold, der anses for at være kritiske for personer, der opholder sig i en bygning, der brænder. Det drejer sig om sigtbarhed, strålingsniveau, temperaturniveau og højde til underside af røglag. Ud fra disse kritiske forhold kan man blandt andet opstille følgende acceptkriterier:

- inhaleret luft skal have en temperatur, der er mindre end 80 ^{o}C
- strålingsniveau ved gulv skal være mindre end 1 kW/m^2
- højde fra gulv til røglag skal være større end $y_{st} > 1{,}6 + 0{,}1\ H$ (m).

hvor y_{st} er højden til røglaget i m, og H er lokalehøjden i m.

Langt de fleste dødsfald ved en brand skyldes røgforgiftning. Da der i virkeligheden ofte er tale om kvælning på grund af for lavt iltniveau, kan man også opstille et acceptkriterium, som udtrykker, at iltkoncentrationen skal være større end fx 15 %.

Der kan også opstilles andre acceptkriterier som for eksempel nødvendig driftstid for ventilatorer, der udsættes for høj temperatur i mekanisk røgventilation.

En brandteknisk beregning kan herefter bestå af følgende punkter, /5/:

1. Identifikation af brandscenarier.

2. Bestemmelse af den dimensionerende brands effektudvikling og røgproduktion. Der kan eventuelt arbejdes med flere forskellige dimensionerende brande.

3. Hvis bygningen er udført med sprinkling eller brandventilation, bør brandens effektudvikling vurderes og eventuelt modificeres. Tid til aktivering af sprinklere og/eller brandventilation beregnes, og en ny effektudvikling fastlægges.

4. Tid til kritiske forhold ($t_{kritisk}$) kan bestemmes ud fra beregninger af røg- og temperaturfordeling i bygningen.

5. Antal personer i bygningen/rummet fastlægges. Placering i bygningen, kendskab til flugtveje, mobilitet og andre relevante inddata til brug ved dimensionering af flugtveje fastlægges.

6. Evakueringstid (t_{evak}) beregnes.

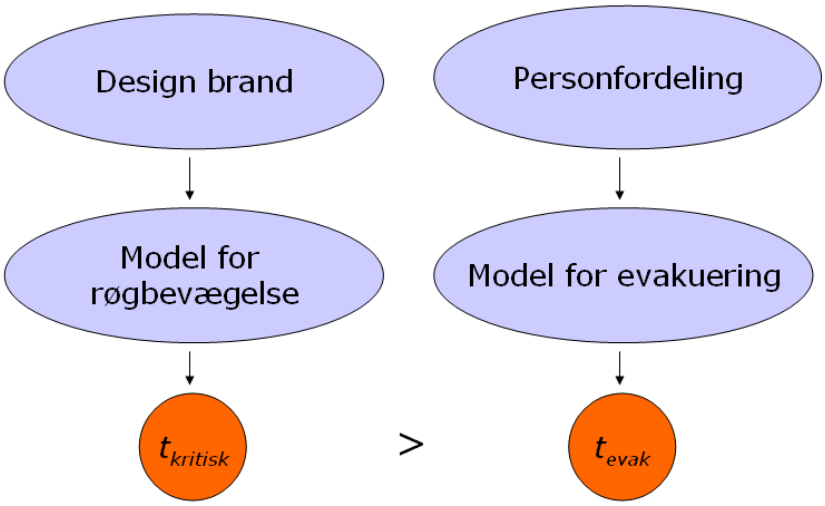
7. Tid til kritiske forhold ($t_{kritisk}$) vurderes i forhold til evakueringstiden (t_{evak}).

8. En følsomhedsanalyse gennemføres.

9. En risikoanalyse kan gennemføres for det meget komplekse og anderledes byggeri, hvis en sådan skønnes at kunne bidrage til afklaring af specielle forhold.

10. En analyse udføres for hele brandforløbet til eftervisning af konstruktioners brandmodstandsevne og brandspredning til andre bygninger.

Figur 3 viser et mere skematisk forløb af en brandteknisk beregning. Først opstiller man en designbrand, det vil sige en brand, som man forestiller sig kan være typisk for det aktuelle byggeri. Derefter gennemfører man en beregning af røgventilationen (model for røgbevægelse). Denne beregning kan være baseret på nogle simple analytiske formler, men det kan også være en beregning ved hjælp af en dynamisk to-zone model, en CFD-model, et forsøg i modelskala eller et feltforsøg. Det røgventilationssystem, der designes ved den brandtekniske beregning, kan enten være baseret på naturlig ventilation (termisk røgventilation) eller på mekanisk udsugning af røgen. Resultatet af en beregning efter en funktionsbestemt metode er bestemmelsen af den kritiske tid for branden $t_{kritisk}$, det vil sige det tidsrum, hvor acceptkriterierne stadig er opfyldt, se figur 3.



Figur 3. Skematisk forløb af en brandteknisk beregning.

Højre side af figur 3 viser beregningen af evakueringstiden. Denne beregning indledes med at fastlægge det maksimale antal personer og deres fordeling i bygningen. Derefter bestemmes evakueringstiden ved hjælp af en håndberegning, /5/, eller man kan anvende diverse

computerbaserede programmer. Den brandtekniske beregning afsluttes som nævnt ved at sikre, at evakueringstiden t_{evak} er mindre end den kritiske tid $t_{kritisk}$.

De trin, der er beskrevet i figur 3, er ligeledes den opdeling i afsnit, som vælges i det følgende.

4 Designbrand

En designbrand er en brand, som skal danne grundlag for dimensionering af det brandventilationsanlæg, man arbejder med. Dermed er valg af designbrand udslagsgivende for alle resultater inklusive den kritiske tid $t_{kritisk}$. Det er vigtigt, at man vælger flere forskellige brande for at få en tilstrækkelig belysning af de mange situationer, der kan opstå. De dimensionerende brandscenarier skal være relevante og repræsentative for bygningen og skal ligeledes kunne udfordre brandsikringen, uden at brandscenarierne bliver urimelige. Bygningen bør nødvendigvis ikke dimensioneres for de værst tænkelige brande men kun for de forventelige brande.

Ved valg af brandscenarier skal man vælge de brande, der f.eks.:

- hurtigt vil fylde en flugtvej med røg
- direkte vil påvirke mange mennesker
- har mulighed for at vokse i det skjulte og producere store mængder af røg og varme, inden den opdages.

Der er to udgangspunkter for en designbrand. Man kan enten vælge at arbejde med en standardbrand, som kan være relateret til bygningstype og brug af bygningen, eller man kan tage udgangspunkt i det, der kan brænde i et rum. I det første tilfælde kan det være tale om både en statisk brand, eller det kan være en dynamisk brand, en såkaldt αt^2 brand.

4.1 Statisk brand

Standardbrande blev tidligere anvendt ved dimensionering af brandventilation. De er enkle at anvende, men de giver en usikker beskrivelse af, hvad der virkelig kan hænde i en bygning. Som eksempel skal nævnes nogle data, som har været anbefalet af Fire Research Station i England.

Tabel 2 Eksempler på standardbrande.

Butik 3 × 3 m	P_f = 12 m	Q = 5 MW
Personbil	P_f = 12 m	Q = 2,5 MW
Traktor, Van	P_f = 15 m	Q = 7 MW

P_f i tabel 2 er brandens omkreds, og Q er den afgivne effekt.

4.2 αt^2 brand

En αt^2 brand er en dynamisk brand. Modellen bygger på den antagelse, at branden dækker en cirkulær flade, og at den breder sig med en konstant hastighed.

$r = \text{konst} \cdot t$

$Q(t) = \text{konst} \cdot \pi r^2$

$$Q(t) = \alpha t^2 \qquad (1)$$

hvor r (m) er radius i branden, t (s) tiden, $Q(t)$ (kW) brandens effekt, og α (kW/s^2) er brandtilvækstfaktoren. Den første ligning udtrykker, hvorledes flammefronten breder sig med konstant hastighed, medens den anden ligning viser, hvordan effekten er proportional med brandens areal. Tilsammen giver de ligning (1). Brandtilvækstfaktoren α har forskellige værdier alt efter de miljøer, hvor branden udvikler sig, og tabel 3 viser nogle typiske eksempler, /6/. Betegnelserne: langsom, medium, hurtig og meget hurtig er international standard, /2/.

Tabel 3 Eksempel på brandtilvækstfaktorer.

Brandtilvækst	**α (kW/s^2)**	**Eksempel**
Langsom	0,003	Specielle tilfælde hvor der f.eks. er begrænsning på de anvendte materialers brændværdi
Medium	0,012	Boliger
Hurtig	0,047	Hoteller, plejehjem
Meget hurtig	0,19	Butikker, forsamlingslokaler

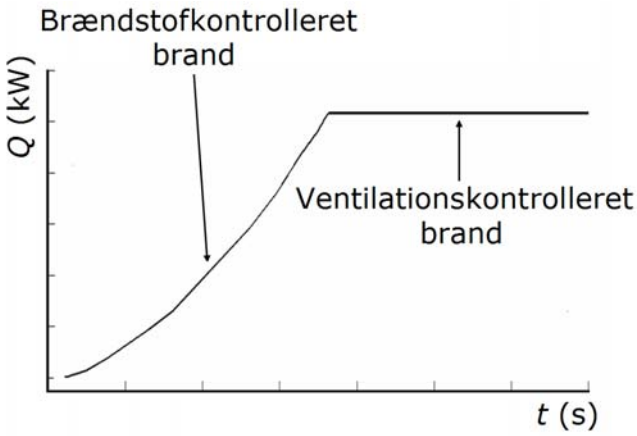
En brand kan ikke vedblive at vokse efter ligning (1). Den maksimale effekt bliver enten begrænset af ilttilførslen til lokalet (ventilationskontrolleret brand) eller også af den mængde brændbart materiale, der indgår i forbrændingen (brændstofkontrolleret brand).

En døråbning kan repræsentere en modstand, som begrænser ventilationen til en brand. Ligning (2) giver et tilnærmet udtryk for begrænsningen i effekt Q (kW) som funktion af dørens areal A (m^2) og dens højde H (m), /7/.

$$Q = 1500\, A\sqrt{H} \qquad (2)$$

Formlen gælder for lokaler udført i sædvanlige konstruktionsmaterialer (træ, gipsplader, beton …), men den kan ikke anvendes for fx skibe (stålplader), og den er ikke sikker at anvende for rum større end 30 m^2.

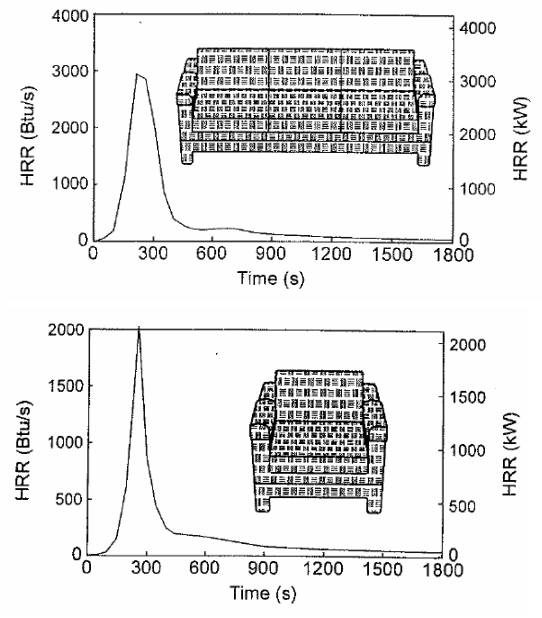
Den maksimale effekt vurderes eller beregnes for både den ventilationskontrollerede brand og for den brændstofkontrollerede brand, og den mindste af de to maksimale effekter anvendes som den dimensionerende brands maksimale effekt. Figur 4 viser det resulterende forløb for en designbrand, hvor branden ender med at blive ventilationskontrolleret. I praksis vil der være en høj temperatur i lokalet, når branden bliver ventilationskontrolleret, og overtænding kan have fundet sted. Det er derfor designbrandens første forløb, der er interessant i forbindelse med evakuering af personer fra det aktuelle rum.



Figur 4 Designbrand hvor branden bliver ventilationskontrolleret efter tiden t_v.

4.3 Detaljeret designbrand

Man opnår den bedste fastlæggelse af en designbrand, hvis man kender møbleringen og placeringen af andet brændbart indhold i lokalet. Ud fra effektudvikling af de forskellige objekter kan man beregne selve brandforløbet i lokalet. Grundlaget for denne beregning er kendte effektudviklingskurver for brand af alle typer af objekter (brændselspakker), og to eksempler er vist i figur 5, /2/.



Figur 5 To eksempler på effektudvikling af brand i henholdsvis en sofa og en stol.

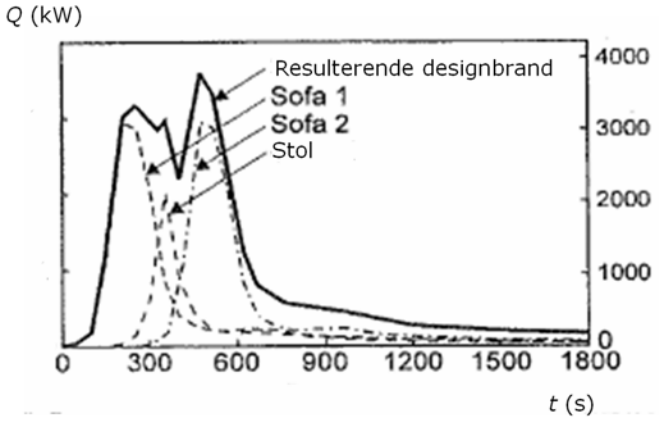
Fremgangsmåden ved opstilling af en detaljeret designbrand er følgende. Der indledes med at fastlægge de brændbare objekter, der er i rummet. Derefter vælger man et objekt, hvor branden kan starte (kar med dieselolie, sofa, computer på bord, TV …).

Branden kan spredes til et nærliggende objekt, hvis afstanden til dette er mindre end en kritisk afstand, der kan findes ved hjælp af følgende ligning (3), /2/

$$R = \sqrt{\frac{Q}{4\pi\, q_{r,i}}} \qquad (3)$$

R (m) er kritisk afstand fra antændt brændselspakke til næste objekt, som kan antændes, Q (kW) er effektniveauet i brændselspakken, og $q_{r,i}$ er den kritiske varmeflux. Den kritiske varmeflux sættes til 10 kW/m^2 for tyndt letantændeligt materiale og til 20 kW/m^2 for tykt materiale.

Det undersøges, om effekten ved afbrænding af det valgte objekt når så højt et niveau, at det næste objekt kommer inden for den kritiske afstand. Derefter adderes de to effektkurver (med den fundne tidsforskydning), og det undersøges, om der er nye objekter inden for den nye kritiske afstand. Figur 6 viser en detaljeret designbrand, der består af to stole og en sofa, udviklet ud fra data i figur 5 og ligning (3). Det viste forløb er således en brændstofkontrolleret brand. Branden vil sandsynligvis have en fortsat udvikling, og den kan gå over i en ventilationsstyret form i det senere forløb.



Figur 6 Første del af en designbrand bestående af to stole og en sofa.

Hvis der anvendes sprinkleranlæg i byggeriet, antages det, at effektudviklingen er konstant efter aktivering af sprinklerne, og designbranden får et forløb, der svarer til det, der er vist i figur 4.

Man bør regne med en brand af størrelsen 1000 kW uanset resultatet af en beregnet detaljeret designbrand. Selv om der er meget lidt brændbart materiale til stede, vil man altid kunne risikere, at der midlertidigt er oplagret større mængder brandbart materiale.

Man designer normalt ikke brandventilation ud fra pyromanbrande, men det ville måske være rimeligt, da 33 % af alle brande i en by som København er påsatte brande. En designbrand kunne bestå af 5 til 10 l benzin, /8/.

5 Beregning af røgventilation

Figur 3 illustrerer gangen i en brandteknisk beregning. På baggrund af en designbrand gennemføres en beregning af røgventilationen. Beregningen skal i det statiske tilfælde vise, at acceptkriterierne er opfyldt, og i det dynamiske tilfælde skal den fastlægge det tidsrum $t_{kritisk}$, hvori acceptkriterierne er opfyldt. Afsnittet indledes med modeller for brand og røgudvikling, derefter gennemgås eksempler på termisk- og mekanisk brandventilation, og det afsluttes med computerbaserede modeller og modelforsøg.

De forskellige beregningsmodeller har alle nogle udvalgte kvaliteter, som det fremgår af det følgende:

- Håndberegningsmetoder (to-zone modeller) giver hurtige og gode resultater. Metoden er velegnet til at belyse alle problemstillinger, også nogle af dem der er forbundet med dynamiske modeller og CFD.

- Dynamisk to-zone modeller belyser tidsmæssige forhold.

- CFD kan give detaljerede resultater og mulighed for et fleksibelt bygningsdesign.

Man skal dog huske at

- Resultaterne er ikke bedre end de antagelser, der ligger til grund for den valgte beregningsmetode.

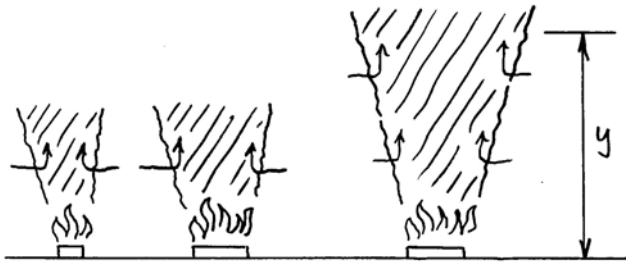
5.1 Modeller for flammehøjde, røgfane og røgudvikling

Flammehøjden i en brand L (m) er koblet til brandens diameter D (m) via følgende udtryk, /9/

$$L = 0{,}235\, Q^{2/5} - 1{,}02\, D \qquad (4)$$

hvor Q er brandens afgivne effekt.

For at beskrive røgudvikling er det vigtigt at tage udgangspunkt i, at røg består af sodpartikler, forbrændte og uforbrændte gasser, og at det er opblandingen med luft, der giver røgvoluminet. Mængden af sodpartikler og gasser er konstant. Røgen udtyndes ved opblanding, men det har ingen praktisk betydning, den vil altid være farlig i flugtområder, hvor den nedsætter synsfeltet.



Figur 7 Dannelse af røg ved opblanding af luft i en røgfane. Figurerne illustrerer fra venstre til højre, hvorledes forøget omkreds af branden giver forøget opblanding, samt at forøget højde ligeledes betyder forøget opblanding.

Figur 7 viser, at en forøgelse af brandens diameter P_f (m) vil forøge røgmængden fra branden, og den viser ligeledes, at røgmængden vokser med højden y (m), fordi der iblandes luft i den opadgående strømning. Processen kan sammenfattes i Thomas' ligning, /9/

$$M_y = 0{,}19\, P_f\, y^{3/2} \qquad (5)$$

hvor M_y (kg/s) er massestrømmen af røg. Det er bemærkelsesværdigt, at effekten Q ikke indgår i dette udtryk. Thomas' ligning kan især anvendes, når flammehøjden L er mindre end diameteren D.

Det antages normalt, at branden har en cirkulær form, når den finder sted i en vis afstand afstand fra vægge eller hjørner. Dens omkreds P_f (m) er forbundet med arealet A_f (m^2) ud fra følgende udtryk

$$P_f = 4\, (A_f)^{0.5} \qquad (6)$$

Hvis branden finder sted tæt ved en væg, er den del af omkredsen, der er åben for medrivning i røgfanen, mindre, og hvis branden er i et hjørne, er der endnu mindre fri areal for opblanding af rumluft i den opadstigende røg.

Brandens effekt Q kan opdeles i en konvektiv del Q_c og en strålingsdel Q_r. Den konvektive del er den del, der afsættes ved ledning og konvektion til luften, og den kan udtrykkes ved

$Q_c = c \cdot Q$ (7)

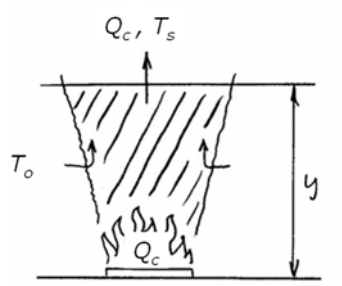
hvor c ligger imellem 0,15 til 0,9. I de fleste tilfælde anvendes størrelsen 0,7.

Gennemsnitstemperaturen T_s (K) i højden y i røgfanen bestemmes ud fra en energibalance. Man betragter rumtemperaturen T_o (K) som reference, og den tilførte konvektive energi Q_c (kW) bevares i røgfanen, se figur 8.

$\Delta T_s = T_s - T_o = Q_c/(M_y \cdot c_p)$ (8)

hvor M_y (kg/s) og c_p (kJ/kgK) er henholdsvis massestrøm i højden y og røgens varmekapacitet. Da c_p har en værdi tæt ved 1 kJ/kgK, anvender man ofte følgende udtryk ved overslagsberegning

$\Delta T_s = Q_c/M_y$

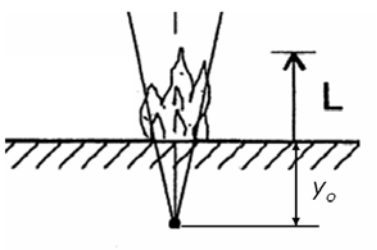


Figur 8 Varmebalance for røgfane.

Heskestads ligning kan anvendes, når der er tale om en mere koncentreret brand, og den giver en detaljeret information om processen tæt ved selve branden, /10/. I denne ligning anvendes der et udtryk for placering af brandens pol, og der skelnes imellem røggenerering under flammehøjden og over flammehøjden. Flammens og røgfanens pol er det punkt, som er det tilsyneladende udgangspunkt for strømningen i en vis højde over branden, dvs. polen bliver ligeledes et udgangspunkt for de ligedannede transportprocesser, som beskrives i formlerne. Denne pol kan befinde sig både over og under branden i en afstand y_o til brandens placering, se figur 9. y_o bestemmes af følgende ligning

$$y_o = 0{,}083 \cdot Q^{2/5} - 1{,}02 \cdot D \quad (9)$$

Afstanden y_o regnes for negativ under brandens niveau og for positiv over dette niveau. Hvis man for eksempel betragter højden y = 5 m over branden, og brandens pol ligger 1 m under niveau, så er afstanden (y-y_o) derfor lig med 6 m.



Figur 9 Placering af brandens pol samt flammehøjde.

Massestrømmen i en røgfane M_y er en funktion af den konvektive effekt Q_c og af højderne L, y_o og y med to forskellige udtryk for røgfanen under flammehøjden L og over flammehøjden L.

$$y > L\,;\, M_y = 0{,}071 Q_c^{1/3} \cdot (y - y_o)^{5/3} + 0{,}00192 Q_c \qquad (10)$$

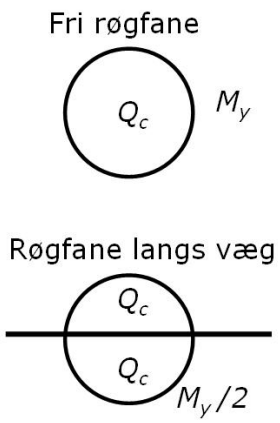
$$y < L\,;\, M_y = 0{,}0056 Q_c \frac{y}{L} \qquad (11)$$

De to følgende udtryk gælder for henholdsvis temperatur ΔT_y og hastighed u_y i røgfanens symmetrilinje

$$\Delta T_y = 25 \left(\frac{Q_c^{2/5}}{y - y_o} \right)^{5/3} \qquad (12)$$

$$u_y = 1{,}0 \left(\frac{Q_c}{y - y_o} \right)^{1/3} \qquad (13)$$

Formlerne (10 og 11) gælder for brande, der er frie. Det betyder, at der er så stor afstand fra lodrette vægflader, at der er medrivning fra den omgivende luft langs hele omkredsen. Hvis brandstedet befinder sig tæt ved en vægflade, vil røgfanen blive tiltrukket til denne flade på grund af Coandaeffekten, og det videre strømningsforløb vil svare til strømningen fra en fri brand med den dobbelte effekt ($2Q$) og den halve medrivning ($M_y/2$). Figur 10 illustrerer denne antagelse. Det ses, at strømningen af symmetrigrunde vil forløbe, som om den kom fra en brand af den dobbelte størrelse, men der vil kun være medrivning af rumluft langs den frie flade svarende til $M_y/2$ fra en fri brand med effekten $2Q_c$. På tilsvarende vis vil massestrømmen i en brand i et hjørne kunne bestemmes som $M_y/4$ i en fri brand af størrelsen $4Q_c$.



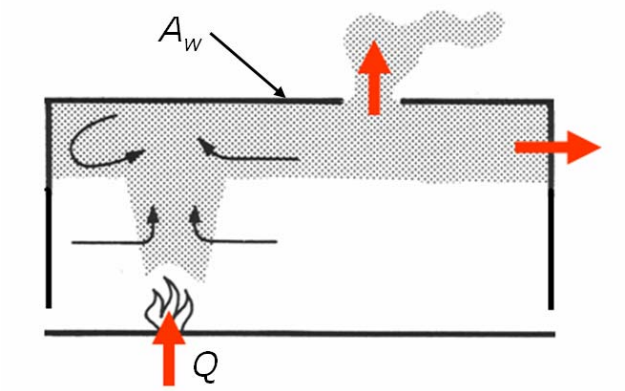
Figur 10 Røgfane fra en fri brand af størrelsen Q_c og plansymmetrisk røgfane fra en brand af størrelsen Q_c (svarende til en fri brand på $2Q_c$).

Ved en stor brand kan den beregnede frie flammehøjde L, ligning 4, være højere end lokalehøjden H. I dette tilfælde bestemmes den radius r_f, som flammen når ind over loftfladen, ved følgende udtryk, /1/.

$$\frac{r_f}{D} = 0{,}5 \cdot \left(\frac{L-H}{D} \right)^{0{,}96} \qquad (14)$$

D er brandens diameter.

Ligningerne (8) og (12) gælder primært for røgtemperaturen i røgfanen. Varmeledning til de flader, der er omgivet af røg, vil resultere i en sænkning af røgtemperaturen, i mange tilfælde hvor bygningskonstruktionen har en stor varmekapacitet og en stor varmeledningsevne. Som eksempler kan nævnes en tunnel eller en parkeringskælder.



Figur 11 Varmebalance for et lokale med brand og lagdeling af røg.

Figur 11 viser, hvordan man kan opstille et simpelt udtryk for en stationær varmebalance af røgvoluminet. Ligning 15 udtrykker, at man sætter den totale udviklede effekt Q (kW) lig med den varmemængde, der fjernes igennem tagåbninger, plus den mængde der fjernes ved ledning til den del af bygningskonstruktionen, der er i kontakt med røglaget.

$$Q = M_{st} c_p \left(T_s - T_o\right) + hA_w \left(T_s - T_o\right) / 1000 \qquad (15)$$

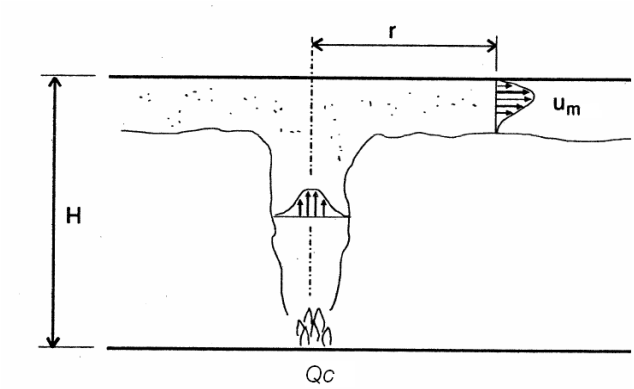
M_{st} (kg/s) er massestrømmen af røg igennem brandventilationens åbninger, c_p (kJ/kgK) er varmekapaciteten, h (J/(m^2·K·s)) er et gennemsnitlig varmeovergangstal, og A_w er overfladearealet.

Der kan opstilles et dynamisk forløb af røgtemperaturen ved at arbejde med et varmeovergangstal, der er tidsafhængigt. Dette varmeovergangstal skal udtrykke den gennemsnitlige værdi over et tidsforløb og inkludere betydningen af konstruktionens temperaturstigning.

Den lagdelte røg under en loftflade vil bevæge sig i en radial strømning ud fra det punkt, der er lodret over røgfanen. Hastigheden i denne bevægelse vil være omtrent omvendt proportional med radius i den radiale strømning, da der ikke er nogen opblanding af luft ind i den vandrette bevægelse af røglaget, se figur 12. Maksimalhastigheden u_m (m/s) kan bestemmes ud fra udtrykket, /11/

$$u_m = \frac{0{,}195 \cdot Q^{1/3} \cdot H^{1/2}}{r^{5/6}} \qquad (16)$$

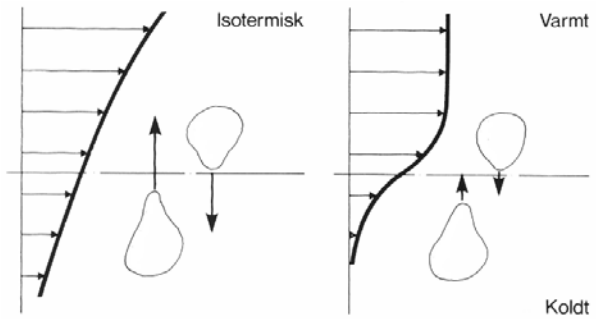
Q_c (kW), H (m), r (m) er henholdsvis den konvektive effekt, lokalehøjde og afstand i den radiale strømning ($r/H > 0{,}15$). Hastigheden u_m siger lidt om den hastighed, hvormed den øverste røgfyldte zone udvikler sig, selv om den er lidt forskellig fra selve hastigheden af fronten i det første forløb af branden.



Figur 12 Lagdelt radial strømning under en loftflade.

5.2 Termisk brandventilation, statisk to-zone model

Termisk brandventilation udnytter samme princip som naturlig ventilation, blot med effekter der er mere end tusinde gange større. Røgen dannes i den opadstigende røgfane ved opblanding med rumluft som beskrevet i (5, 10 og 11). Den fortsætter i en vandret bevægelse under loftfladen, hvorfra den forlader bygningen igennem brandventilationsåbninger. Der dannes således to zoner i det lokale, hvor der er brand. En nedre zone, hvor ren luft føres frem til branden, og en øvre zone som er fyldt med røg. I den vandrette stratificerede strømning imellem de to zoner foregår der kun en meget lille opblanding imellem røg og luft, fordi temperaturgradienten dæmper den turbulens, der ellers giver opblanding. Figur 13 viser, hvordan den underliggende kolde luft vil modvirke en opblanding op i den varmere zone på grund af tyngdens virkning, og ligeledes vil den varme røg i det øverste røglag ikke kunne bevæge sig ned i den kolde zone på grund af opdrift. Figuren viser også, hvorledes der vil finde en opblanding sted ved isotermisk strømning.



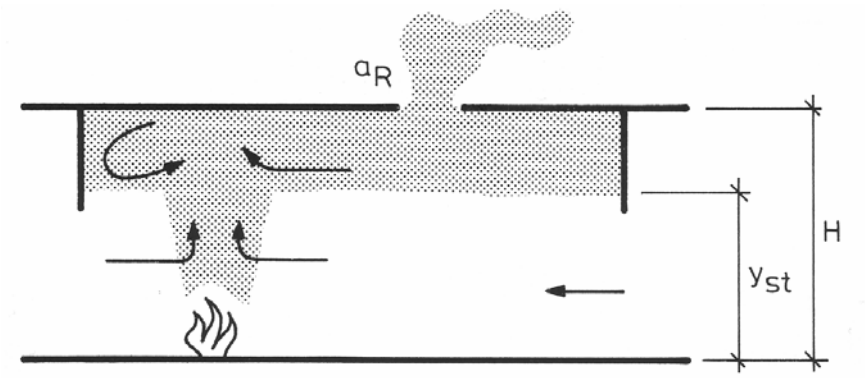
Figur 13 Turbulent opblanding i en isotermisk strømning og i et stratificeret lag.

Ved dimensionering af termisk brandventilation ud fra en stationær model er det højden til røglaget y_{st}, som skal bibeholdes ved en designbrand, og højden må ikke blive lavere inden for evakueringstiden t_{evak}.

Stationær termisk brandventilation beskrives i det følgende ud fra figur 14. Figuren viser en fabrikshal med brandsektionering ved hjælp af brandgardiner. Røglaget samles under loftflader, og det har en tykkelse på $H - y_{st}$. Laget er påvirket af en opdrift på grund af røgens temperatur, og der dannes et overtryk Δp i forhold til omgivelserne på

$$\Delta p = (\rho_o - \rho_s)\, g\, (H - y_{st}) = \frac{T_s - T_o}{T_s} \rho_o\, g\, (H - y_{st}) \qquad (17)$$

hvor ρ, g, H, T og y_{st} er henholdsvis massefylde, tyngdekraft, lokalehøjde, temperatur og højde op til røglaget. Indeks *"s"* gælder for røg, og indeks *"o"* er for luft med stuetemperatur.



Figur 14 Termisk brandventilation i en fabrikshal med brandsektionering.

Trykforskellen Δp omsættes til hastighed igennem åbningen i taget efter

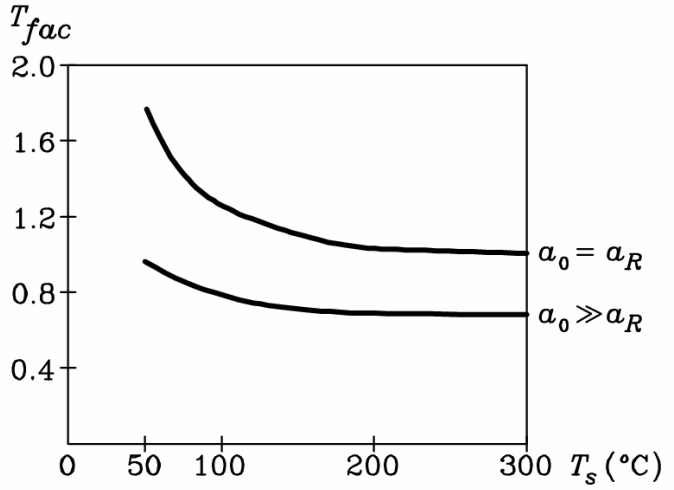
$$\Delta p_R = \frac{1}{2}\rho_s \left[\frac{M_{st}/\rho_s}{a_R}\right]^2 \qquad (18)$$

hvor M_{st}/ρ_s er volumenstrømmen igennem åbningen. a_R er det aerodynamiske areal. Dette areal er lig med det geometriske areal a (karmlysningsareal) ganget med strømningens C_d faktor.

Da der ikke foregår nogen opblanding i de vandrette bevægelser, er M_{st} netop lig med massestrømmen i røgvoluminet i lagdelingshøjden y_{st}. Hvis man indsætter Thomas' ligning (5), og ligning (17) i (18) får man følgende udtryk til bestemmelse af tagåbningernes samlede areal

$$\frac{a_R}{P_f} = 0{,}096 \cdot T_{fac}\sqrt{\frac{y_{st}^3}{H - y_{st}}} \qquad (19)$$

hvor T_{fac} er en korrektionsfaktor, der er afhængig af røgens temperatur. Ligning (19) kan både anvendes for en fabrikshal, hvor åbningsarealet i den nederste zone er meget stort i forhold til a_R, og i andre bygninger, hvor åbningsarealet a_o har en anden størrelse. Figur 15 viser værdierne for T_{fac}, når $a_o = a_R$, og $a_o >> a_R$.

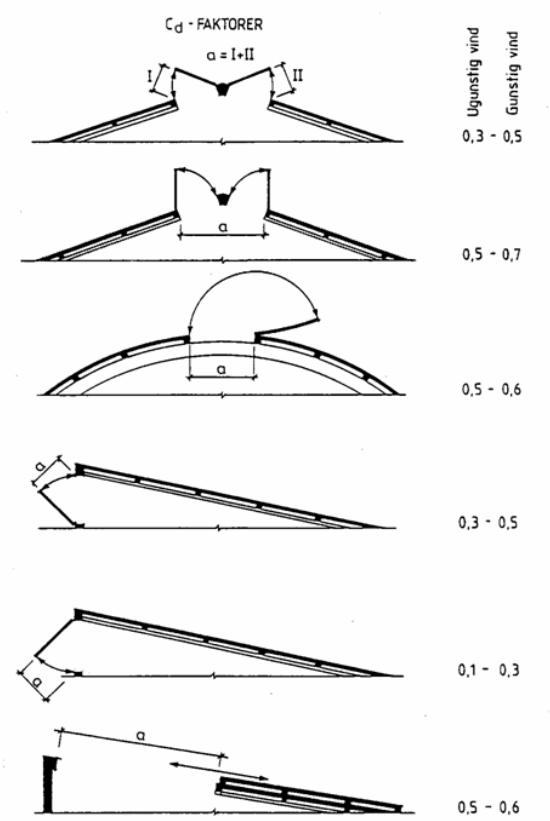


Figur 15 Korrektionsfaktoren T_{fac} som funktion af røgtemperaturen T_s.

Det er karakteristisk, at røgtemperaturen ikke spiller en stor rolle for røgens massestrøm eller lagdelingshøjde, når røgtemperaturen er over 150 ^{o}C. En høj røgtemperatur vil give en stor trykdifferens, se ligning (17), men den vil også give en stor volumenstrøm, der skal igennem åbningerne, se ligning (18), da den varme røg har en lille massefylde. I et højt atrium kan der være tale om at arbejde med en stor højde til lagdelingen og dermed en lav røgtemperatur. Dette har betydning for korrektionsfaktoren, og figur 15 viser, at den stiger meget for temperaturer under 100 ^{o}C. I denne situation kan der opstå det problem, at drivtrykket Δp bliver så lavt, at vindforhold nedbryder hele røgbevægelsen. Der kan også blive tale om, at koldt nedfald og andre lokale strømningsforhold giver en uhensigtsmæssig spredning af røgen.

Ligning (19) er en traditionel ligning til bestemmelse af termisk brandventilation, som især har vundet indpas i engelsk litteratur. Den bygger på Thomas' udtryk for en røgfane. Det indbefatter, at branden har en diameter D, der er større end dens flammehøjde L. Man kan naturligvis opstille andre udtryk for termisk brandventilation ud fra Heskestads formler for en røgfane.

Forskellige tagåbninger til termisk brandventilation kan have mange forskellige C_d faktorer alt efter deres geometriske udformning og deres placering i en bygning. Figur 16 viser nogle eksempler, som også inkluderer vindforholdene omkring bygningen, /12/.

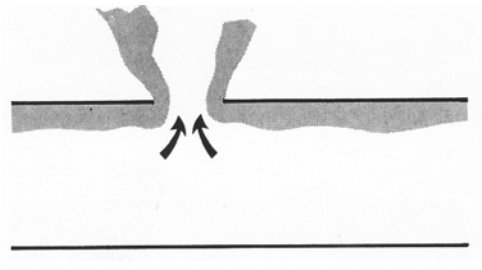


Figur 16 C_d faktorer for forskellige tagåbninger.

Der er grænser for, hvor stor en åbning kan være i forhold til røglagets tykkelse, som det ses i figur 17. Figuren viser, hvorledes der foregår en medrivning af rumluft sammen med røgen, når åbningen er relativ stor. Den kritiske massestrøm M_c (kg/s) udledes af udtrykket, /13/

$$M_c = 3\beta\, h_s^{5/2}\left(\frac{T_s - T_o}{T_s}\right)^{1/2}\left(\frac{T_o}{T_s}\right)^{1/2} \qquad (20)$$

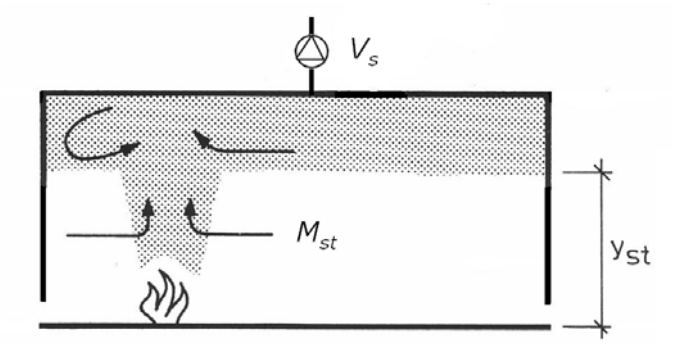
hvor T_s (K), T_o (K), h_s (m) og β er henholdsvis røgtemperatur, rumtemperatur, tykkelse af røglag, og en faktor der er afhængig af loftåbningens placering. β har værdien 2,8 midt på en loftflade og værdien 2,0 tæt ved væggen. Hvis røgventilationens åbning er placeret tæt ved loftet i en sidevæg, skal lagtykkelsen h_s indsættes som den afstand, der er fra underkanten af åbningen ned til røglagshøjden y_{st}. Ligning 20 kan anvendes både ved termisk- og ved mekanisk brandventilation. Fænomenet kaldes på engelsk for ”Plugholing”.



Figur 17 Medrivning af både rumluft og røg igennem en relativt stor loftåbning.

5.3 Mekanisk brandventilation, statisk to-zone model

I den mekaniske brandventilation anvendes der røgventilatorer til udsugning af røg fra forskellige områder i bygningen. Ventilatorerne er af en speciel konstruktion, som kan håndtere høje temperaturer i et længere tidsrum. Figur 18 viser princippet i mekanisk brandventilation. Udgangspunktet for en dimensionering er at fastlægge den røgmængde, der skal udsuges for at opretholde en passende højde y_{st} i lokalerne. Ud fra for eksempel Thomas' ligning findes den tilhørende massestrøm M_{st} samt volumenstrømmen V_s.



Figur 18 Skitse af mekanisk brandventilation.

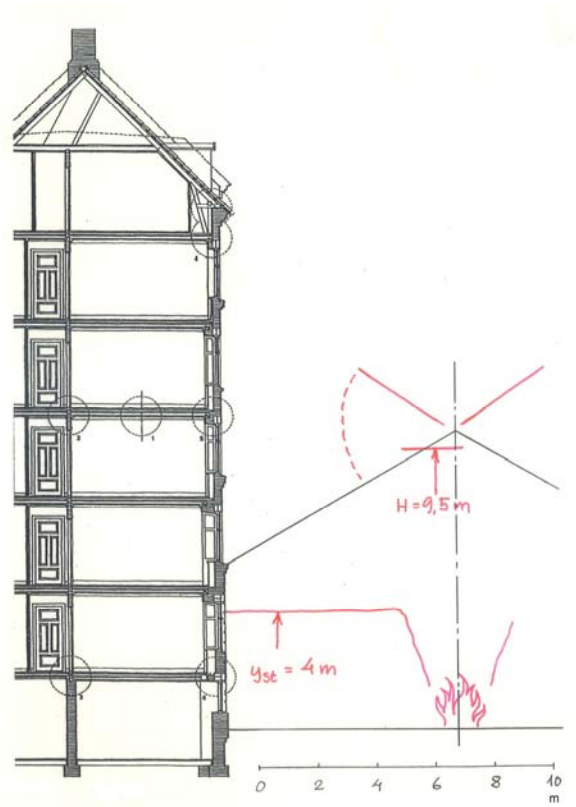
$$M_{st} = 0{,}19\, P_f\, y_{st}^{3/2} \qquad \text{(kg/s)} \qquad (21)$$

$$V_s = M_{st} \frac{T_s}{\rho_o\, T_o} \qquad (\text{m}^3/\text{s}) \qquad (22)$$

Det er vigtigt at bestemme den volumenstrøm V_s, som er knyttet til røgtemperaturen T_s ud fra ligning (22), da en røgventilators kapacitet er baseret på volumenstrømmen. ρ_o er luftens massefylde ved stuetemperatur. Heskestads udtryk for en røgfane, ligning (10) og (11), kan også benyttes som baggrund for dimensionering af mekanisk brandventilation.

Eksempel 1

I et ældre trelænget hotel ønsker man at overdække gården, så der dannes en gårdhave, hvor der kan være ophold og servering i en del af året. Gården har en størrelse på 16 × 35 m, og der regnes med overdækning op til første sals højde, som skitseret i figur 19. Gårdhavens gavlparti ud imod siden uden bygninger bygges som en ren glasgavl, og hele taget er en glaskonstruktion med oplukkelige partier i den form, som er skitseret i figur 16 øverst. Højden fra gulvniveau til tagåbningernes middelhøjde H sættes til 9,5 m.



Figur 19 Vertikal snit igennem gårdhave.

Dimensionering af brandventilationen tager udgangspunkt i en designbrand i gården af størrelsen A_f = 20 m^2. Der regnes med en effekt på Q_c = 14 MW. Q_c er den konvektive del af brandens effekt.

Gennemfør en dimensionering af termisk brandventilation i det tilfælde der regnes med en højde y_{st} op til røglaget på 4 m. Ligning 5 giver:

$$M = 0{,}19 \cdot 25{,}3 \cdot 4^{3/2} = 38{,}5 \text{ kg/s}$$

og af 8 fås:

$$\Delta T_s = 20000/38{,}5 = 519 \text{ K} \qquad T_{røg} = 539^{\circ}\text{C}$$

Figur 15 giver:

T_{fac} = 0,9, og fra ligning (19) fås:

$$a_R = 0{,}096 \cdot 0{,}9 \cdot 25{,}3 \sqrt{\frac{4^3}{9{,}5 - 4}} = 7{,}5 \text{ m}^2$$

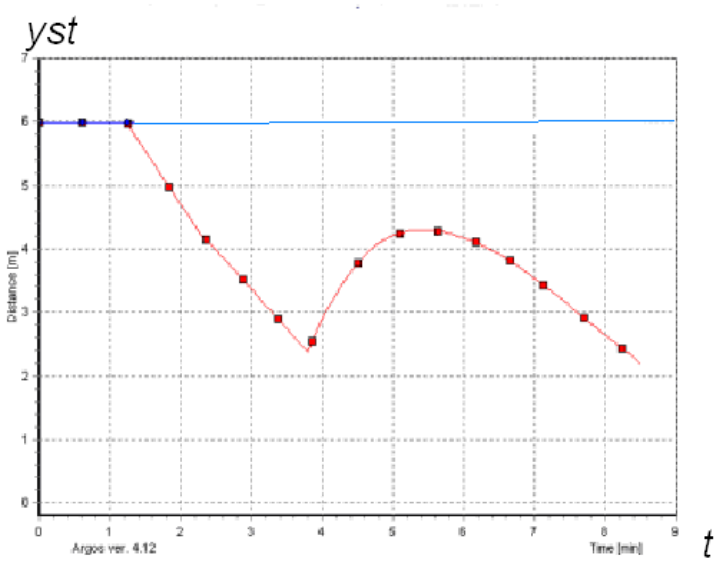
a = 7,5/0,3 = <u>25 m^2</u>

5.4 Dynamisk to-zone model

En dynamisk model er karakteriseret ved, at der regnes med et tidsforløb. Dette giver nogle nye muligheder. Argos er en dynamisk to-zone model, som kan håndtere op til fem rum både med og uden et røglag i rummene, /14/ og /15/. Som udgangspunkt forudsættes det i programmet, at branden er brændstofkontrolleret, men komme ilt-koncentration under 10.5 % reduceres branden og bliver ventilationskontrolleret, /14/. Programmet arbejder med et detaljeret tidsforløb i designbranden, hvor man kan vælge imellem syv forskellige varianter, nemlig brand af fast materiale, brand af materiale der smelter, brand fra et væskebad, brand af en væske som løber ud af en beholder, ulmebrand, en αt^2 brand og en brand, der er bestemt efter metoder beskrevet i afsnit 4.3.

En dynamisk to-zone model er velegnet til at arbejde med reaktionstider for diverse detektorer, styring af brandventilation, styring af sprinklere, betydning af den tid der går, inden slukningskøretøjerne når frem, eller til at arbejde med betydningen af konstruktionens tidslige temperaturpåvirkning.

Man kan få et hurtigt overblik over systemet sammen med en klient, og det er velegnet til brug i forbindelse med risikoanalyse.



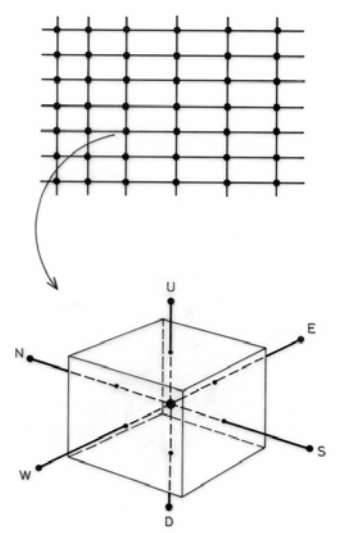
Figur 20. Bestemmelse af det dynamiske tidsforløb af en brand i et lagerlokale.

Figur 20 viser et eksempel på bestemmelsen af højden til røglaget i et rum, der er 6 m høj. Beregningerne er foretaget med programmet Argos. Der regnes med brand i en lageropstilling med en længde, bredde, højde på: 24 × 1 × 4 m. Programmet bestemmer blandt andet højde til røglag, røgtemperatur, varmestråling og sigtbarhed i begge zoner. I det viste eksempel giver røgdetektoren alarm efter 58 s, og brandventilationen aktiveres efter 2 min og 15 s. Efter 3min og 47 s sprænger vinduesglasset øverst i lagerhallen, da røgtemperaturen er større end 140 ^{o}C, og det forårsager den forøgede lagdelingshøjde. Programmet viser, at der opstår et kritisk strålingsniveau på 2,5 kW/m2 efter 4 min og 39 s, og at røglaget når ned til 2,2 m over gulv efter 8 min og 29 s. Programmet arbejder altså dynamisk og beregner den tid, der går $t_{kritisk}$, indtil acceptkriterier bliver overskredet.

5.5 Computersimulering af røgbevægelsen

I dette afsnit beskrives en metode til bestemmelse af røgbevægelsen, som dækker hele det involverede luftvolumen i bygningen. Det er en mere detaljeret beskrivelse end den, der kan opnås ved at kombinere analytiske udtryk for de enkelte strømningselementer som for eksempel en røgfane og en lagdelt strømning. I den engelsksprogede litteratur anvender man ofte betegnelsen CFD (Computational Fluid Dynamics) om denne beregningsmetode.

Strømningsforhold, energiflow og røgbevægelse i et rum bestemmes ved at løse de grundlæggende strømningsligninger. Det komplette ligningssystem for en brand består af kontinuitetsligningen, tre Navier-Stokes ligninger, en energiligning samt en transportligning for røg. Man betragter ofte de tidsmidlede ligninger, hvor den lokale turbulens indgår som en variabel diffusion i form af en turbulent viskositet. Denne størrelse bestemmes ud fra endnu to transportligninger. Den samlede beskrivelse af strømningen består således af otte koblede, ulineære differentialligninger. Disse ligninger kan ikke løses direkte, så der opstilles en metode, hvor de otte differentialligninger erstattes af et stort antal differensligninger fordelt i celler over hele det aktuelle luftvolumen. Disse ligninger løses ved en numerisk metode. Ved LES (Large Eddy Simulation) anvendes der ikke tidsmidlede ligninger, og der foregår en direkte simulering af turbulensen. Computersimulering af luftbevægelse i rum er blandt andet beskrevet i reference, /16/.



Figur 21 Fordeling af celler samt en enkelt celle omkring netpunktet P.

Figur 21 skitserer, hvorledes hele rummets luftvoluminet er beskrevet med et antal celler. I hver celles knudepunkt opstilles de relevante differensligninger. Det er vigtigt med små celler for at reproducere de store gradienter, der kan være i branden eller i røgbevægelsen. Ved LES, hvor der ikke anvendes tidsmidlede ligninger, skal cellerne være mindre, end de der anvendes ved de tidsmidlede ligninger, da de turbulente fluktuationer også skal bestemmes af differensligningerne. En lille cellestørrelse kræver mange celler og derfor mange ligninger og dermed en stor computerkapacitet.

Brugen af computersimuleret røgbevægelse giver en række fordele ved design af brandventilation. Her skal nævnes:

- Det er muligt at gennemføre en detaljeret beregning med stor nøjagtighed.

- Der kan arbejdes med en kompleks arkitektur.

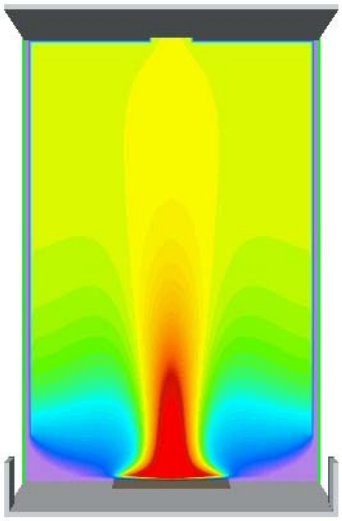
- Der kan tages hensyn til andre luft- og trykfordelinger i rummene, end dem der dannes ved branden og brandventilationen.

- Man kan arbejde med situationer, der strækker sig ud over de validerede områder for de analytiske udtryk.

- Det er enkelt at visualisere den beregnede røgspredning.

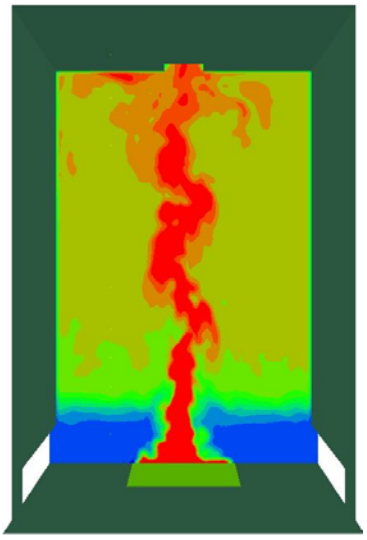
- Man kan optimere bygningsdetaljer, brug af bygning m.m. i forbindelse med brandventilationen og den røgbevægelse, der vil finde sted.

Der findes en række kommercielle CFD-programmer, der kan håndtere en brand og brandventilation. Flovent skal nævnes som et eksempel på et generelt program, der specielt anvendes til bestemmelse af luftbevægelse i rum, /17/. Der er ikke inkluderet en brandmodel i programmet, men det kan bruges til bestemmelse af røgbevægelse, hvis branden simuleres som en varmekilde. Programmet arbejder med tidsmidlede ligninger, og røgen kan enten markeres som det område af luften, der har en temperatur, som er højere end rumtemperaturen, eller som et område der findes ved at løse en separat transportligning for et sporstof, der tilsættes ved varmekilden. Programmet beregner temperaturfordeling og højde y_{st} til røglaget. Figur 22 viser et eksempel på beregnet temperaturfordeling i et scenetårn, /18/.



Figur 22 CFD-simulering af brand i et scenetårn ved hjælp af programmet Flovent.

FDS (Fire Dynamics Simulator) er et program, der er specielt udviklet til brandventilation af NIST i USA, se reference /19/. FDS indeholder en brandmodel samt en model for sprinklere. Programmet er baseret på LES (ikke tidsmidlede ligninger), som kræver en stor regnekapacitet. Programmet beregner blandt andet temperaturfordeling, højde y_{st} til røglaget, stråling fra røglaget og sigtbarhed. Figur 23 viser et eksempel på beregnet temperaturfordeling i et scenetårn, /18/. Bemærk hvorledes figuren viser en øjebliksværdi af røgbevægelsen, medens figur 22 viser midlede værdier.



Figur 23 CFD-simulering af brand i et scenetårn med programmet FDS.

Brandtekniske beregninger er ofte udført med analytiske modeller og dynamiske to-zone modeller, men der er ingen tvivl om, at CFD-modeller i fremtiden vil blive et af de foretrukne værktøjer. Der foregår en stadig udvikling af computerstørrelse og regnehastighed, som vil begunstige denne udvikling. Der er heller ingen tvivl om, at det er vigtigt, at de personer, der har ansvaret for gennemførelse af CFD-simuleringer, har en bred strømningsteknisk og brandteknisk indsigt. I Erhvervs- og Boligstyrelsens publikation ”Information om brandteknisk dimensionering” skriver de i afsnittet om brug af computermodeller blandt andet, /5/:

…. Computersimulering er kun ét blandt flere værktøjer, der kan benyttes ved vurdering af en brandteknisk løsning. Brandtekniske løsninger baseres tillige på brandteknisk faglige vurderinger, praktiske erfaringer og sund fornuft. Computersimuleringer kan ikke alene danne grundlag for den brandtekniske dimensionering og dermed for valget af den brandtekniske løsning.

…. Men for at være sikker på, at det resultat, der frembringes af computersimuleringen, kan benyttes i forbindelse med vurderingen af den brandtekniske løsning, er det vigtigt**,** at nøjagtigheden af de fysiske og matematiske modeller, der ligger til grund for programmet, er eller kan verificeres.

…. Endvidere bør det verificeres, at modellen ikke har matematiske fejl samt, at modellens løsning sammenholdt med eksperimentelle data giver tilfredsstillende resultater. Denne sammenligning kan ikke gøres for alle tænkelige brand- og/eller evakueringsscenarier, men bør omfatte et repræsentativt udsnit af brand- og/eller evakueringsscenarier, der er relevante for det aktuelle projekt. Det er vigtigt at sikre, at computersimuleringen er valideret til brug for den aktuelle problemstilling.

Validering af en computersimulering kan gennemføres på flere forskellige måder. Der kan være tale om at sammenligne dele af simuleringerne med resultatet af analytiske beregninger, og der kan ligeledes være tale om at udføre en tilsvarende beregning med CFD-programmet på en kendt brandsituation. Publicerede benchmark tests kan også være et grundlag for en validering af programmet. Reference /20/ viser en sensitivitetsanalyse der illustrerer de forskellige parametres indflydelse på beregningsresultaterne.

På forsøgssiden kan der være tale om at lave en ”Hot smoke test”, som er fuldskalarøgforsøg, der gennemføres i byggeriet, inden det afleveres. Der er også en nærliggende mulighed at udføre modelforsøg i mindre skala.

5.6 Modelforsøg med brandventilation

Modelforsøg har tidligere været anvendt i udstrakt grad ved dimensionering af brandventilation. Det kan stadig blive aktuelt at arbejde med denne metode især i situationer med komplicerede geometrier, hvor den termisk drevne strømning bliver udsat for mange afbøjninger og lagdelingseffekter. Metoden vil være et godt supplement til CFD-beregninger. Modelforsøg udføres i reduceret skala, og der anvendes ofte luft som fluid. Man kan anvende en brand i modellen, men det vil ofte være et varmelegeme, der simulerer branden. En analyse af de grundlæggende ligninger og en praktisk anvendelse af modellovene viser, at strømningsbillederne er en entydig funktion af Froudes tal Fr eller Arkimedes' tal Ar, hvor Fr er lig med $1/\sqrt{Ar}$, se reference /21/. Kritiske parametre som for eksempel højden til røglaget y_{st} bestemmes som funktion af Arkimedes' tal i modellen. Derefter omregner man de fundne værdier til fuld skala.

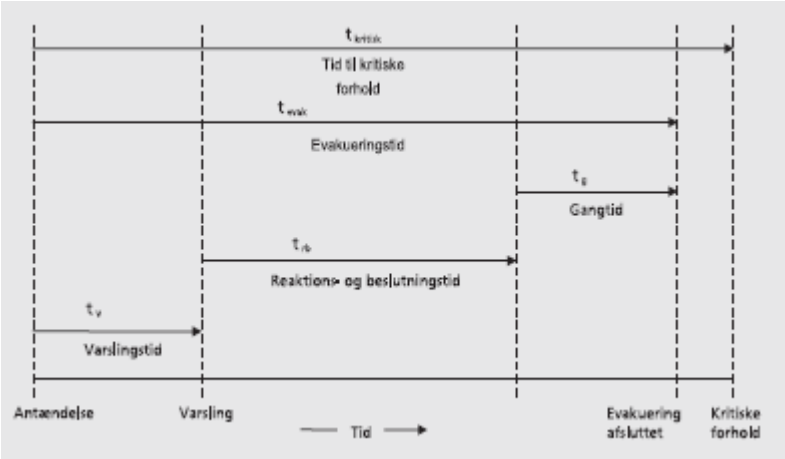
Figur 24 viser et modelforsøg med lagdeling af røg i samme scenetårn, som er simuleret i figurerne 22 og 23, /21/.

Figur 24 Modelforsøg med lagdeling af røg.

6 Evakueringstid

De ovennævnte modeller til beregning af brandventilation har til formål at bestemme kritiske parametre som for eksempel højden til røglaget y_{st} i et evakueringsområde og den kritiske tid $t_{kritisk}$ til overskridelse af de udvalgte acceptkriterier.

En dimensionering af brandventilation vil også indbefatte bestemmelse af evakueringstid t_{evak} for bygningskomplekset og sikre, at t_{evak} er mindre end $t_{kritisk}$, som det diskuteres i forbindelse med figur 3. Det første skridt i denne del af en dimensionering er at fastlægge fordeling og antal af de personer, der vil opholde sig i byggeriet, både med den fordeling og det antal byggeriet er projekteret til, men også med en fordeling der kan opstå ved specielle anvendelser. På baggrund af denne personfordeling er det nu muligt at beregne evakueringstiden.



Figur 25 Tidsforløb af en evakuering.

Figur 25 viser elementerne i evakueringstiden. Evakueringstiden kan udtrykkes som summen af:

- varslingstid
- reaktions- og beslutningstid
- gangtid.

Varslingstiden er den tid, der går fra brandens antændelse, til personerne i bygningen er gjort opmærksomme på branden. Derefter kommer en reaktions- og beslutningstid, som er den tid, der går fra personerne er blevet varslet, til de begynder at bevæge sig til udgangene. Gangtiden er til slut den tid, det tager for folk at rømme bygningen og komme til det fri eller til dele af bygningen, som er sikker, /5/.

Erfaringen viser, at varsling, reaktion og beslutning tager meget længere tid end selve rømningen, og at det sjældent er flugtvejens kapacitet, der har været kritisk. Omvendt er det også vigtigt, at rømningen kan foregå hurtigt, da lange flugtveje kan skabe usikkerhed og tvivl blandt de personer, der forlader området og dermed sænke gangtiden. Det er også en erfaring, at den største del af personerne vælger at flygte igennem den samme vej, som de kom ind i bygningen, /22/.

Analyse af kritiske brande (katastrofebrande) viser, at det ofte er et meget voldsomt og hurtigt brandforløb, dvs. et lille $t_{kritisk}$, der i sig selv er et problem.

Varslings-, reaktions- og beslutningstid må nødvendigvis skønnes, men det er muligt at beregne selve gangtiden, når man kender bygningsgeometri, personfordeling og personernes mobilitet. Gangtiden kan enten beregnes manuelt, eller den kan bestemmes ved hjælp af simuleringsprogrammer som fx Simulex, /23/, eller BuildingEXODUS, /24/.

Ved håndberegning kan man, ved en persontæthed der er mindre end 1 person pr. m^2, regne med en ganghastighed på 1,3 m/s i vandret plan. På trapper regnes med en ganghastighed på 0,7 m/s ned ad en trappe og 0,6 m/s op ad en trappe, /25/ og /26/. Trappelængden måles langs trappeløbet. Hvis der er kø ved en dør, regnes med en kapacitet på 1 person pr. s pr. m effektiv dørbredde. Bredden af flugtveje reduceres med 0,3 m, da det er sjældent, at man anvender hele bredden i en evakueringssituation.

Ovenstående data gælder for almindelig mobilitet, dvs. anvendelseskategori 1 til 5. Ved anvendelseskategori 6, hvor personerne ikke er selvhjulpne, må evakueringstiden beregnes ud fra antal hjælpere, hjælpemidler, flugtvejens udformning og afstand til sikker lokalitet. Ved nedsat mobilitet, som fx på plejehjem, regnes med en ganghastighed på 0,3 til 0,5 m/s, /25/.

7 Afrunding af de brandtekniske beregninger

De brandtekniske beregninger afrundes ved at vurdere tiden til kritiske forhold ($t_{kritisk}$) i forhold til evakueringstiden (t_{evak}). Der gennemføres en følsomhedsanalyse. Man kan også gennemføre en risikoanalyse for det meget komplekse og anderledes byggeri, hvis en sådan skønnes at kunne bidrage til afklaring af specielle forhold. Desuden udføres en analyse for hele brandforløbet til eftervisning af konstruktioners brandmodstandsevne og brandspredning til andre bygninger, /5/.

Litteratur

/1/ Sørensen, L. S., Brandfysik og brandteknisk design af bygninger, Polyteknisk Forlag, Lyngby 2004.

/2/ Klote, J. H. og J. A. Milke, Principle of Smoke Management, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2002.

/3/ Bygningsreglement 2008, Erhvervs- og Byggestyrelsen.

/4/ Eksempelsamling om brandsikring af byggeri, Erhvervs- og Byggestyrelsen, 2006.

/5/ Information om brandteknisk dimensionering, Erhvervs- og Byggestyrelsen, 2006

/6/ Funktionsbestemte brandkrav og teknisk vejledning for beregningsmæssig eftervisning, NBK Utskotts- og arbejdsrapporter 1994:07

/7/ Karlsson, B., og J. G. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, ISBN 0-8493-1300-7.

/8/ Husted, B. P., Privat Kommunikation 2003.

/9/ Thomas et al., Investigations into the flow of hot gases in roof venting, Fire Research Technical Paper No 7, HM Stationery Office, London, 1963.

/10/ Heskestad, G., Fire plumes, SFPE handbook of fire protection engineering, Boston Mass.: Society of Fire Protection Engineers, 2002.

/11/ Alpert, Fire technology 8, 181, 1972.

/12/ Vejledning for brannvern av bygninger med overbygde gårde eller gater, Melding H-1/188, Statens bygningstekniske Etat, Oslo.

/13/ CIBSE, Relationship for smoke control calculations, Technical Memoranda TM19:1995, London.

/14/ Husted, B. P., og T. W. Søring, ARGOS Theory Manual, Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut, Hvidovre, 2003.

/15/ Hjemmesiden: www.argos.dk.

/16/ Nielsen, P. V. (ed.), Francis Allard, Hazim B. Awbi, Lars Davidson, Alois Schälin, Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design. REHVA Guidebook No. 10, ISBN 2-9600468-9-7, Finland, 2007.

/17/ Flovent, Flomerics Group PLC, 81 Bridge Road, Hamton Court, Surrey, United Kingdom.

/18/ Brohus, H., P. V. Nielsen, H. la Cour-Harbo, M. Lykkegaard, M. Dam and B. V. Jensen. Application of Simple CFD Models in Smoke Ventilation Design. Roomvent 2004, 9th International Conference on Air Distribution in Rooms, Coimbra, 2004.

/19/ McGrattan, K (Ed.). 2005. Fire Dynamics Simulator (Version 4) – Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018. National Institute of Standards and Technology, February.

/20/ Brohus, Henrik, Peter V. Nielsen, Arnkell J. Petersen and Kim Sommerlund-Larsen, Sensitivity Analysis of Fire Dynamics Simulation. Roomvent 2007, 10th International Conference on Air Distribution in Rooms, Helsinki 2007.

/21/ Nielsen, P. V., H. Brohus, H. la Cour-Harbo, M. Lykkegaard, M. Dam and B. V. Jensen. The Design of a Fire Source in Scale-Model Experiments on Smoke Ventilation. Roomvent 2004, 9th International Conference on Air Distribution in Rooms, Coimbra, 2004.

/22/ Buus, F., Privat Kommunikation 2003.

/23/ Simulex, Integrated Environmental Solution Ltd., 141 St. James Road, Glasgow.

/24/ EXODUS development Team, Fire Safety Engineering Group, The University of Greenwich.

/25/ DS/ISO/TR 13387:2000: Funktionsbestemte brandkrav (Fire safety engineering).

/26/ Brandskyddshandboken, Brandteknik, Lunds Tekniske Högskola, Lund 2002.

ISSN 1901-7286
DCE Lecture Notes No.22