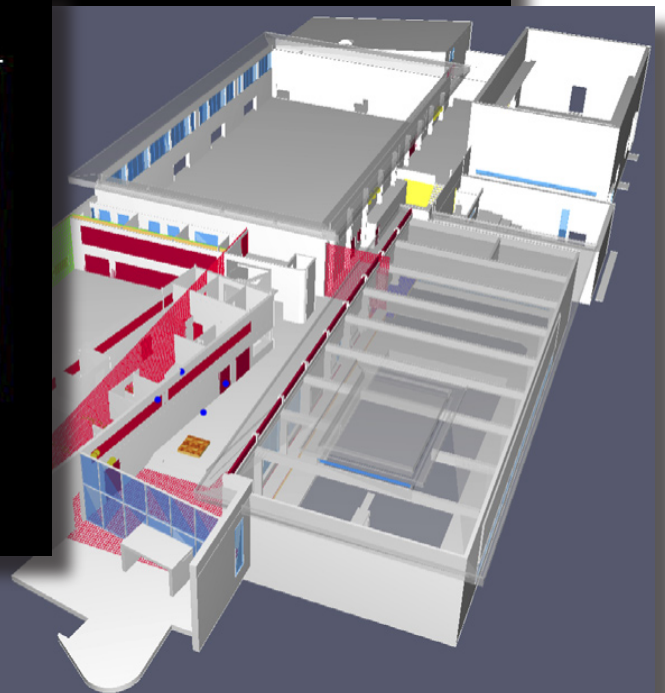
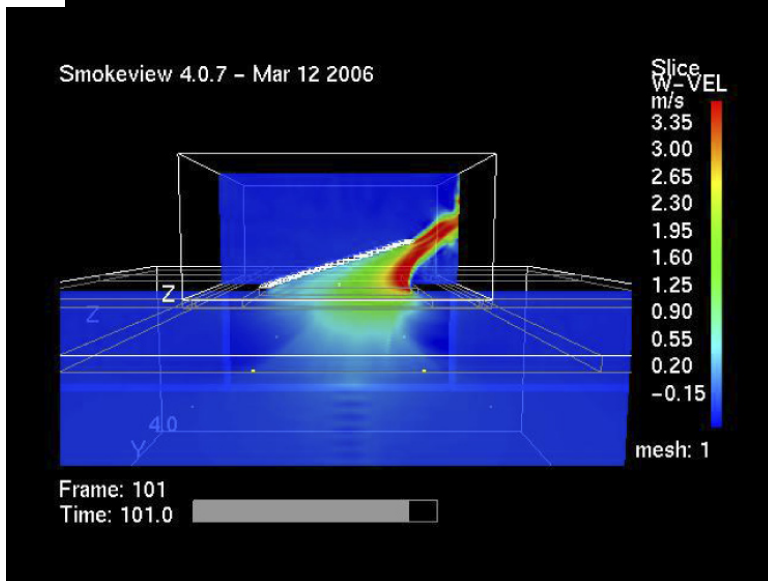
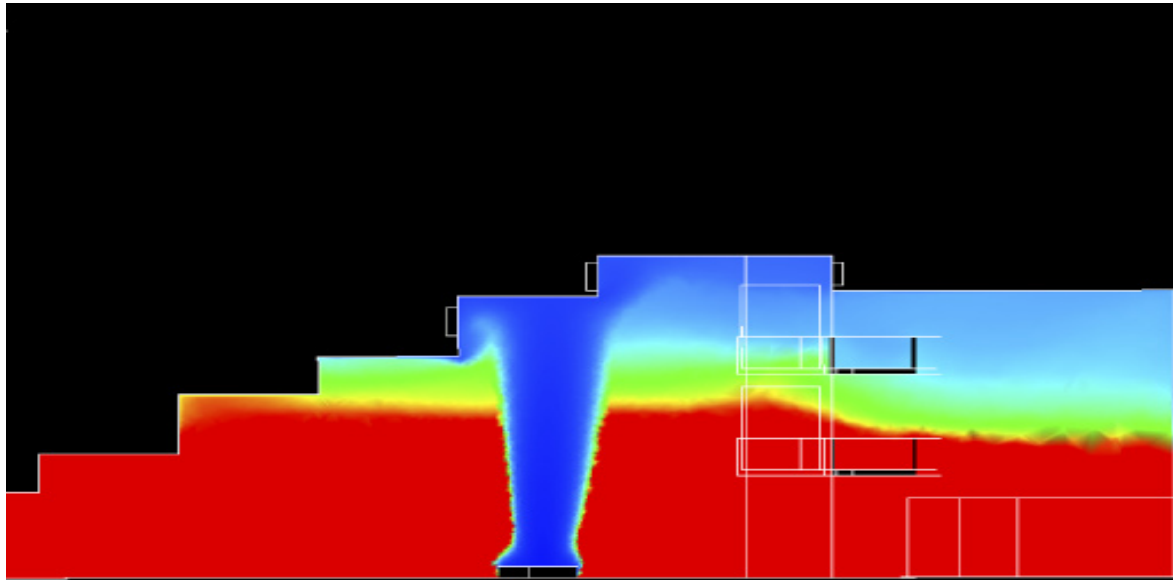


CFD Best Practice



Best Practice gruppen
November 2009

Best Practice gruppen

CFD Best Practice

November 2009

Deltagende parter

Alex Jakobsen, Alectia

Morten Birk Sabroe Valkvist, Niras Safety

Jens Christian Bennetsen, Rambøll

Rolf Ehlert Carstensen, Cowi

Gustav Lanng Madsen, Cowi

Kim Sommerlund-Thorsen, DBI

Carsten Strüwing Hansen, Fredericia Brandvæsen

Hovedstadens Beredskab

Sune Nygaard, Grontmij | Carl Bro

Lars Schiøtt Sørensen, Det Norske Veritas

The logo for Alectia, featuring the word "ALECTIA" in a bold, green, sans-serif font.The logo for Niras Safety, featuring the word "NIRAS" in red and "Safety" in black, with a red flame-like graphic above the "S".The logo for Rambøll, featuring the word "RAMBOLL" in white, uppercase letters inside a blue rounded rectangle.The logo for Cowi, featuring the word "COWI" in a large, teal, serif font.The logo for Managing Risk DNV, featuring the text "MANAGING RISK" in black and "DNV" in white on a green background, with a blue square containing a white anchor icon above the "DNV".The logo for Grontmij | Carl Bro, featuring a stylized blue and red "G" icon followed by the text "Grontmij | Carl Bro" in blue.

KØBENHAVNS BRANDVÆSEN



FREDERICIAKOMMUNE
Brandvæsenet

Indholdsfortegnelse

1	Indhold/formål, Software, Operatøren, Dokumentation, Verificering og Vurdering	4
1.1	Indledning og formål	4
1.2	Software	5
1.3	Operatøren	6
1.4	Dokumentation	6
1.5	Verificering	7
1.6	Vurdering af CFD simuleringer	8
2	Beregningsdomæne, Modeltid, Grid, Randbetingelser, Ventilation, Turbulensmodel	9
2.1	Trin vedrørende den modelmæssige gennemførelse af en CFD beregning	9
2.2	Beregningsdomæne	10
2.3	Modeltid	13
2.4	Fysiske modeller i CFD-programmer	15
2.5	Beregningsgrid	19
2.6	Modellering af brandventilationsåbninger, indløb og væg	24
2.7	Indflydelsen af ventilation på røgspredningen og temperaturen	32
2.8	Eksempler på fejlkilder ved CFD modellering af brand	34
3	Branden, røgpotentiale, C-factor mv.	36
4	Anvendelse af aktive systemer i simuleringer	41
4.1	Brandventilation	41
4.2	Sprinkling	43
4.3	Anvendelse af røgdetektor og sprinkler i FDS	43
5	Konstruktioner og brand	46
5.1	Normer	46
5.2	Overordnede betragtninger om model input	48
5.3	Beregningsprocedure	50
6	Referencer	53

Forord

Nærværende "Best Practice" er udarbejdet ud fra, hvad forfatterne, med den viden og de erfaringer vi samlet set besidder i dag vurderer, er "Best Practice" for, hvorledes simulering af brand under anvendelse af Computational Fluid Dynamics (CFD) bør foretages for at opnå tilstrækkeligt troværdige resultater til, at de reelt kan benyttes som dokumentation. Vi er naturligvis vidende om, at der konstant sker en udvikling, og at anvendelsen af CFD bliver mere og mere almindelig, og som værktøj teknisk set bliver mere og mere troværdigt. Hvis det bruges rigtigt. Håbet er, at over tid vil nærværende "Best Practice" være en naturlig forudsætning for, hvorledes CFD anvendes, og at brandtekniske rådgivere og kommunale myndigheder vil benytte den som grundlaget for anvendelsen af CFD.

Det er ikke vores intention til stadighed at sikre, at nærværende "Best Practice" er opdateret. Den er alene et udtryk for, hvorledes vi i skrivende stund, november 2009, ser "Best Practice". Men det er vores håb, at vi med års mellemrum om nødvendigt kan finde tid og lejlighed til at opdatere "Best Practice", hvis vi mener, det kan tjene et formål.

1 Indhold/formål, Software, Operatøren, Dokumentation, Verificering og Vurdering

1.1 Indledning og formål

Kravene til en bygnings sikkerhed i relation til brand fremgår af [BR08, 2008] kapitel 5, som skal iagttages, uanset hvorledes sikkerheden ønskes dokumenteret. Byggesager hvor sikkerheden i relation til brand ikke kan, eller ønskes, dokumenteret med baggrund i de præaccepterede løsninger i [Eksempelsamlingen, 2006], udføres derfor helt eller delvis med baggrund i [Information, 2004]. Denne type sager, er ofte kendetegnet ved store byggerier, med stor grad af kompleksitet i form af åbenhed mellem bygningsafsnit i forskellige anvendelseskategorier, mange mennesker, store rumhøjder og en brandstrategi, som ikke følger bygningsreglementets umiddelbare krav om brandtekniske installationer i henhold til [BR08, 2008] kapitel 5.4. Den brandtekniske rådgiver ønsker ofte at benytte muligheden for, i henhold til [BR08, 2008] kapitel 5.4 stk. 18, at anvende andre løsninger til at opnå den krævede sikkerhed. I denne type sager kan sikkerheden typisk ikke dokumenteres ved "sund fornuft", simple håndberegninger eller to-zone modeller. Det er derfor nødvendigt at anvende et dokumentationsværktøj, som kan give et validt estimat for, hvorledes de fysiske forhold som røgspredning, røgkoncentrationer, varmestråling og temperaturer ændres over tid i bygningen. Til dette formål anvendes i stadig stigende grad CFD som dokumentations værktøj. Da antallet af parametre som bidrager til det endelige estimat for de fysiske forhold i bygningen er stort, har erfaringen gennem de sidste års brug af CFD medført, at der blandt myndigheder og rådgivere er opstået et behov for en ensartet fremgangsmåde ved benyttelsen af CFD.

Formålet med denne "Best Practice" er derfor at skabe en standard som beskriver, hvorledes man udfører og dokumenterer simuleringer med CFD, således at den brandtekniske dokumentation udføres på en faglig forsvarlig, hensigtsmæssig og ensartet måde. Samtidig er det målet, at "Best Practice" bliver et produkt, som accepteres og iagttages af såvel rådgivere som myndigheder.

1.2 Software

For at et CFD program kan anvendes til simulering af brand skal det være designet til simulering af brand. Der findes flere CFD-programmer med et forbrændingsmodul, som kan simulere de fysiske forhold, som man i forbindelse med udarbejdelsen af den brandtekniske dokumentation er interesseret i at få overblik over.

I henhold til [BR08, 2008] kapitel 1.3 stk. 2, kan myndighederne stille krav om, at kunne læse den modtagne elektroniske dokumentation. Det er således særdeles vigtigt, at bygherre og dennes brandtekniske rådgiver tager initiativ til afholdelse af den i [BR08, 2008] kap. 1.9 stk. 1 omtalte forhåndsdiallog. Dette blandt andet for at få afklaret, om kommunen er i stand til at læse det CFD-program, som den brandtekniske rådgiver ønsker at anvende, eller få oplyst hvilket program kommunen kan læse, i fald den konkrete byggesag nødvendiggøre anvendelse af CFD i forbindelse med udarbejdelse af den brandtekniske dokumentation.

Som oftest er dette dog ikke et reelt problem, idet der er en udbredt tradition blandt såvel brandtekniske rådgivere som kommunerne for anvendelse af det af National Institute of Standards and Technology (NIST) udviklede shareware program "Fire Dynamics Simulator" (FDS). Programmet kan hentes hos NIST på www.nist.gov. Programmet anvendes verden over og opdateres jævnligt.

På følgende links kan findes relevante diskussionsgrupper, hvor erfaringer og spørgsmål vedrørende programmet tages op.

www.cfd-online.com/Forum

<http://groups.google.com/group/fds-smv>

<http://www.fire.nist.gov/fds/>

<http://www.f-sim.de>

1.3 Operatøren

For at opnå det bedst mulige estimat for de fysiske forhold i bygningen er det vigtigt, at den person, som genererer inddatafilen, har et så stort kendskab til bygningen og til den planlagte brandstrategi som muligt. Ligeledes er det særdeles vigtigt, at personen besidder de nødvendige brand- og strømningsmæssige kundskaber, der skal til for at kunne opbygge modellen, således at uddata giver et så realistisk billede af forholdene, som det på det foreliggende grundlag er muligt at opnå.

1.4 Dokumentation

I forbindelse med samarbejdet mellem brandteknisk rådgiver og den eller de personer i kommunen, som varetager byggemyndighedens brandmæssige interesser, typisk brandvæsenet, er det vigtigt på et passende tidligt tidspunkt i forløbet at aftale, hvilke forhold der er interessant at vise, og hvorledes og i hvilket omfang disse forhold skal vises. Som udgangspunkt bør dokumentationen indeholde en systematisk opbygget og oplysende input data fil, indeholdende alle anvendte grunddata, samt alle resultatfiler, herunder Smokeview-filen (FDS). Desuden kan det være hensigtsmæssigt at vise billeder og/eller filmklip fra Smokeview-filen for at synliggøre konkrete forhold.

Generelt vil det ofte være interessant, at den del af dokumentationen som genereres i CFD, viser følgende:

- Det eller de anvendte grid
- Graf-output af effektudviklingen som funktion af tiden
- Bevarelsen af masse

- Diverse flows, typisk ifm naturlig og/eller mekanisk ventilation
- Billeder som i passende omfang dækker hele det betragtede bygningsafsnit og som viser såvel sigtbarhed som temperaturer
- Røggastemperaturer til dimensionering af f.eks. mekanisk ventilation
- Kontrol af brandventilation
- Hvis kommunen, på grund af problemstillingens karakter, på trods af manglende mulighed for at kunne læse programmets data filer, som ønskes anvendt, vil acceptere anvendelsen af et andet program, er det særdeles vigtigt, at det på forhånd aftales, hvorledes den brandtekniske rådgiver skal fremlægge sin dokumentation.

Under alle omstændigheder skal rådgiver i forbindelse med fremsendelse af dokumentationen vedlægge resultater i aftalt digital form til eventuel senere brug.

For at sikre at anvendte parametre, som reelt er forudsætninger for, at opnå den ønskede sikkerhed bliver synliggjort, er det vigtigt, at disse overføres til Brandstrategirapporten, og fremgår eksplicit af denne. Her tænkes eksempelvis på RTI-værdier, valg af detektortyper og deres følsomhed, brandventilationsåbningers og/eller tilluftsåbningers åbningshastighed, og hvilke røggastemperaturer mekanisk brandventilation skal kunne modstå, afhængig af deres placering i bygningen.

1.5 Verificering

De resultater, som anvendelse af CFD giver, er i bedste fald et meget fornuftigt estimat for de fysiske forhold, som over tid optræder i det betragtede bygningsafsnit, og kan dermed ikke betragtes som værende udtryk for et faktum. Omvendt er der på grund af de relativt mange parametre som kan bringes i spil, relativ stor risiko for indtastningsfejl eller forglemmelser. Det forudsættes i øvrigt, at rådgiveren udfører relevant intern egenkontrol. I erkendelse heraf, er det fagligt set meget fornuftigt,

hvis rådgiver, ud over sin kontrol af rigtigheden af CFD-beregningerne, gennem andre beregningsmetoder, f.eks. håndberegning, og/eller andre anerkendte programmer, forsøg eller lignende, sandsynliggør, at de med CFD opnåede estimater er troværdige. En sådan verificering vil bestyrke tilliden til, at de opnåede estimater med rette kan benyttes som dokumentation for opnåelse af den ønskede sikkerhed i relation til brand. Desuden vil det være naturligt at kontrollere, at eksempelvis brandforløbet har haft det ønskede forløb.

1.6 Vurdering af CFD simuleringer

De opnåede resultater fra CFD modeller bør vurderes i forhold til kendte resultater fra eksempelvis fysiske brandtests eller håndberegningsformler.

Et komplet overblik over mulige benchmark tests er ikke muligt at give i nærværende dokument. [Salley & Kassawara, 2007] giver en grundig indføring i mulige benchmark tests, og viser anvendelsen af disse på en specifik CFD model.

[Valkvist, 2007] foreslår inddeling af beregningsgriddet i områder med karakteristiske flow, hvorefter de fundne delløsninger kan sammenholdes med kendte håndberegningsformler med henblik på en vurdering af den fundne løsning.

Konkrete metoder til at fastslå den nødvendige opløsning og model-specifikke anbefalinger med hensyn til gridopløsning kan findes i [DiNunno, 2003], [Ma & Quintiere, 2003], [Bounagui et al., 2003] og [Valkvist, 2007].

2 Beregningsdomæne, Modeltid, Grid, Randbetingelser, Ventilation, Turbulensmodel

Dette afsnit giver et overblik over, hvilke forhold der skal medtages og defineres i en CFD-model for at gennemføre en brandanalyse. Disse er generelle anbefalinger, som vil dække de overordnede forhold omkring en CFD analyse.

2.1 Trin vedrørende den modelmæssige gennemførelse af en CFD beregning

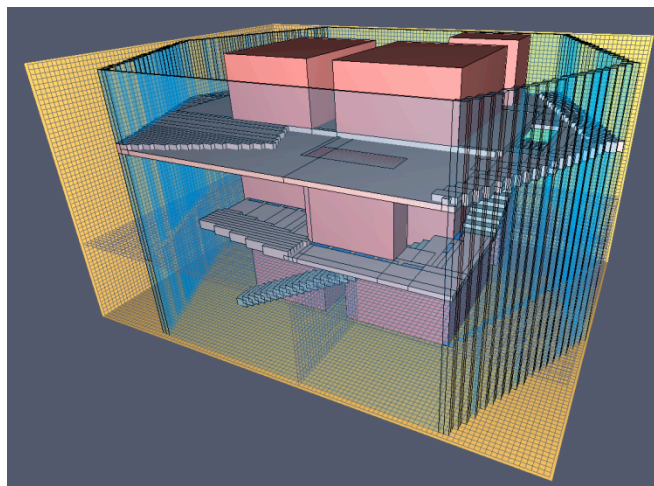
1. Definerings af beregningsdomænet
2. Valg af modeltid
3. Valg af modeller for forbrænding, turbulens, stråling
4. Valg af beregningsgrid
5. Valg af randbetingelser – indløbs-, udløbstemperatur, åbninger og væg – og initialbetingelser
6. Kontrol af konvergens og tidsskridt efter beregning

2.2 Beregningsdomæne

Simulering af røgbevægelser i en bygning er grundlæggende en 3D strømning, og kan kun i mindre grad simplificeres til en 2D strømning. Derfor bør der som regel benyttes en 3D model til at simulere en brand og dens røgspredning. 2D modeller kan i mindre grad anvendes til at lave parameter-varationer for at klarlægge et funktionsområde. Disse bør dog ikke bruges i den endelige beregning, idet fysikken og turbulensen ændres fra en 2D til en 3D model.

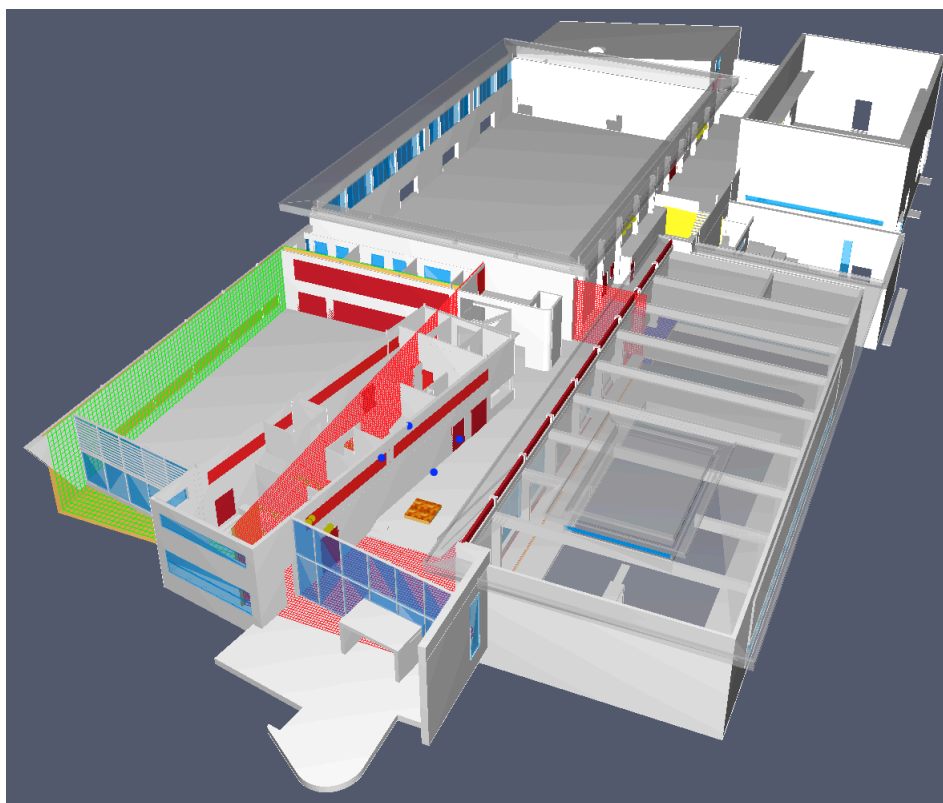
Ligeledes bør der anvendes forsigtighed ved anvendelse af symmetrivægge. Årsagen hertil er, at en symmetrivæg introducerer en begrænsning i forhold til strømninger, således at der ikke tillades fuld 3D bevægelse indeni domænet.

Såfremt der anvendes en symmetrivæg, bør der som kontrol gennemføres én simulering med en fuld 3D model for at sikre, at bevægelse af røgfanen ikke bliver begrænset af symmetri væggen.



Figur 2-1: Beregningsdomænet omfatter den ydre rand af bygning, som skal undersøges mht. røgspredning. Beregningsdomænet inddeles herefter i et beregningsgrid.

Detaljeringsgraden i modellen skal omfatte de objekter eller elementer, som har væsentlig indflydelse på røgspredningen. Dette betyder, at alle etager i en bygning, hvor røgen kan spredes til, skal medtages. Ligeledes kan gelændere have en væsentlig indflydelse på, hvor meget røg der spredes ind på en etage. Endvidere skal røgskørter indbygges i en model, idet røgskørternes funktion er at begrænse røgspredningen til et område.



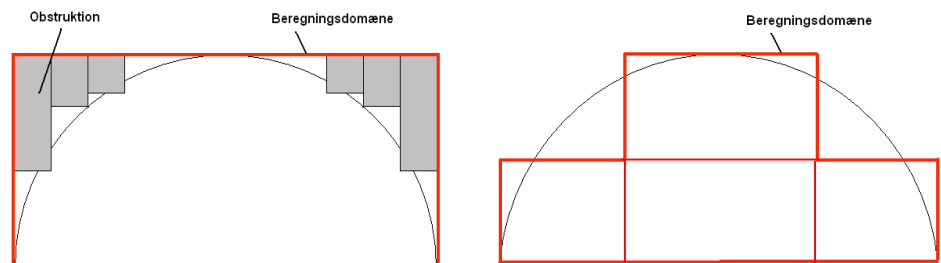
Figur 2-2 Eksempel på en kompleks bygning med mange rum, der er forbundne.

En krum eller buet væg i bygningen kan være svær at modellere på en visuel korrekt måde. Hvor et kompromis med overfladens repræsentation udføres, skal følgende parametre vægtes i nævnte rækkefølge:

- Volumen i bygningen
- Loftshøjde i bygningen
- Vandrette afstande mellem vægge.

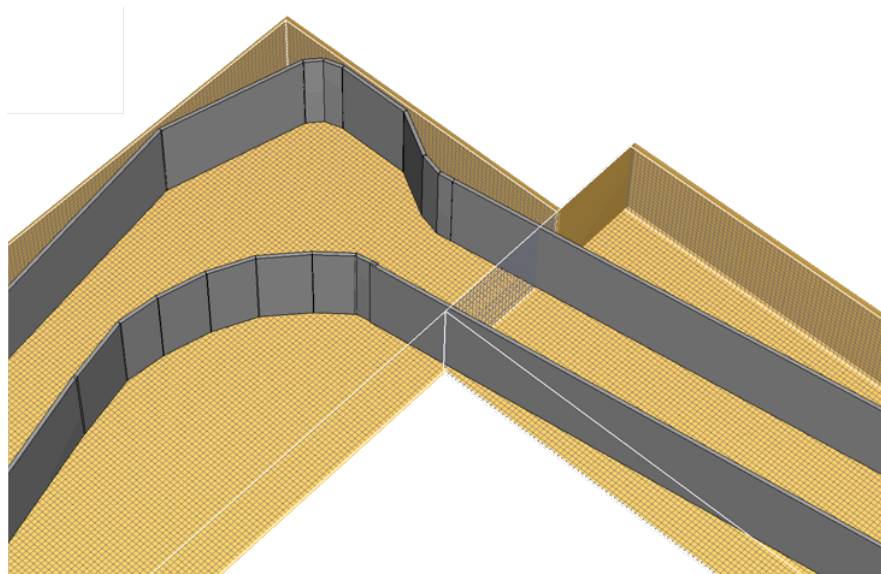
Computermodellen bør som udgangspunkt være så korrekt som muligt i forhold til den fysiske bygningsgeometri. Såfremt det anvendte program ikke giver mulighed for at repræsentere komplekse flader, bør det tilstræbes, at der ved "stair-stepping" forsøges at eliminere dennes kunstige restriktion på flowet ved randen. Der skal ved vurderingen tages hensyn til, at flowet ikke er korrekt modelleret ved "stair-stepping".

Et tænkt eksempel kunne være en kuppel simuleret i et rektangulært grid:



Figur 2-3: To forskellige principper, der kan bruges til opbygning af kupler. Enten via en stor fælles blok med forhindringer i eller som flere forskellige blokke, der er linket sammen (multi-blok).

Et andet eksempel kunne være et gangområde som snor sig, simuleret i et rektangulært net:



Figur 2-4 Snoet gang med rektangulært grid.

Hvis der indlægges grænseflader i en model af en virkelig bygning, skal randbetingelserne ved grænsefladen være kendte. Dermed kan de ind sættes på den korrekte placering. Endvidere bør snitflader, som kan afgrænse modellens størrelse, placeres i et område, hvor der ikke sker væsentlige strømningsvariationer. Specielt må der ikke ligge recirkulerende strømninger over en rand eller en snitflade.

Det er ofte vanskeligt at fastlægge hvilken strømningsbetingelse, der eksisterer i en snitflade. Det kan derfor være nødvendigt at undersøge om den fundne løsning er følsom overfor de valgte randbetingelser ved snitfladen.

2.3 Modeltid

I forbindelse med fastlæggelsen af modeltiden sondres mellem forskellige tilgange til løsning af den matematiske model;

Beregning af branden og røgspredningen skal foretages, så længe at det anses for nødvendigt med hensyn til at vurdere personsikkerheden i bygningen.

Endvidere kan der undersøges, hvordan branden udvikler sig, indtil brandvæsenet har mulighed for at være ved bygningen.

Og endeligt kan udviklingen undersøges med hensyn til værdibevarelse eller konstruktionssikkerhed i bygningen.

Normalt fastlægges selve brandudviklingen ud fra en αt^2 – brand. Dette svarer til en parabolisk brandudvikling, indtil den maksimale brandeffekt er opnået. For nærmere information se [Information, 2004].

Opbygningsfasen af branden har ofte betydning for personsikkerheden i bygning. Det er derfor nødvendigt at undersøge røgspredningen transient, - dvs at CFD simuleringen beregner den tidsafhængige udvikling. Det er således muligt at undersøge dynamikken i strømmingen samt finde røgspredningen til forskellige tidspunkter.

Transient (Dynamisk) løsning (løsningen er tidsafhængig):

Den dynamiske model anvendes til at undersøge, om der indtræder kritiske forhold, inden personer og/eller værdier er i sikkerhed. Modeltiden skal således som minimum afspejle:

Tiden det tager at bringe personer i sikkerhed (evakueringstiden t_{evak}),

Eller redningsberedskabets forventede ankomst-/indtrængningstid (indsatstiden t_{inds}) inkl. tid til alarmering.

Eller tiden hvorigennem brandmodstandsevnen for et konstruktionselement skal opretholdes (klassifikationstiden t_{klas}).

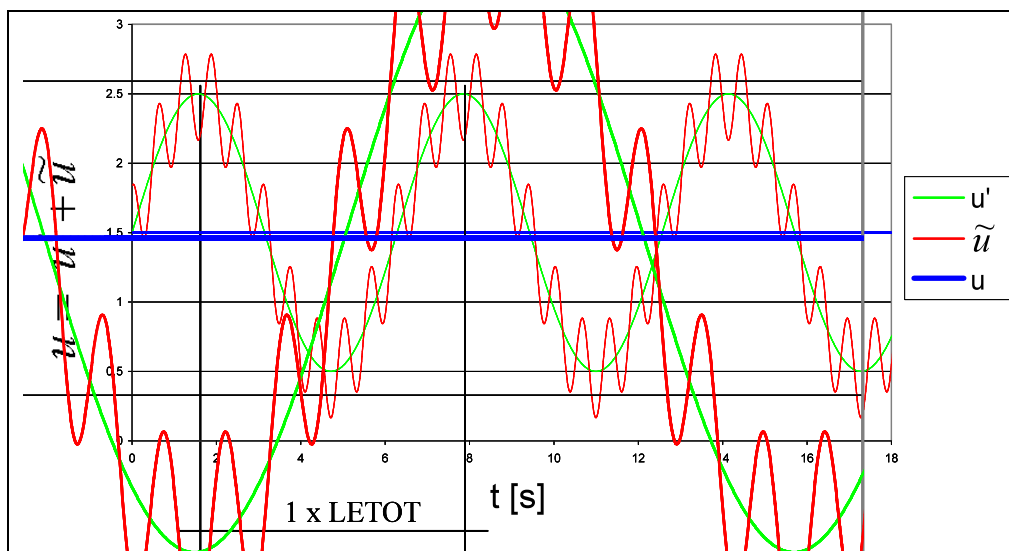
Det er muligt at beregne punkt 1)-3) ved hjælp af transiente modeller. Som oftest kræves dog en lang beregningstid, og dermed computertid, for at undersøge disse forhold. For punkt 2) og 3) vil det være muligt at undersøge modellen med en stationær simulering.

Stationær løsning (Simuleringen finder en løsning, som er stationær, og ændres dermed ikke over tid):

Såfremt der eksisterer en stationær løsning til CFD modellen, vil programmet vise en løsning. Løsningen vil være slutresultat. Dvs. at der ikke sker yderligere røgspredning, og temperaturniveauet i bygningen holdes konstant. Såfremt denne løsning findes, vil der være en balance mellem brandudviklingen, røgspredning og brandventilationen i bygningen, hvorved der indtræder en ligevægt.

For at kunne sammenligne resultater fra en stationær løsning og en transient løsning, er det nødvendigt at lave en middelværdi af de transiente resultater over tid. Herved skal det sikres, at den midlede løsning er uafhængig af fluktuationer i den transiente strømning. Dette kan eksempelvis sikres ved at midle over et passende tidsinterval i den dynamiske løsning. Dette interval kan beregnes ud fra "Large-Eddy-Turn-Over-Time (LETOT)", som viser, hvor hurtigt de energirige hvirvler be-

væger sig rundt i bygningen. Et passende antal LETOT til at beregne midling ligger mellem 5 og 25. Simuleringstiden skal være tilpas lang til at tilvejebringe et tilstrækkeligt antal repeterede perioder, hvorover midelværdien kan findes.



Figur 2-4: Principskitse af LETOT, lufthastigheden er defineret som $u = \tilde{u} + u'$; en middelværdi u' (blå linie) og en fluktuation \tilde{u} .

2.4 Fysiske modeller i CFD-programmer

2.4.1 Termisk opdrift

Mange CFD-programmer har to forskellige modeller for at kunne håndtere den termiske opdrift fra en varme eller brandkilde. Enten benyttes en Boussinesq approximation, hvor bidraget fra den termiske opdrift i form af varm røg styres via en fælles densitet i de styrende ligninger. Dog gælder denne approximation kun for mindre temperaturforskelle - typiske mindre end 20 C.

Derfor bør en formulering være baseret på ideal gas model, hvor densitetsforskellen mellem luften og røggassen modelleres direkte, benyttes ved beregning af røgspredningen.

2.4.2 Turbulens model

Ved modelleringen af røgbevægelser er turbulens modellen en af de modeller, som spiller en afgørende betydning for udbredelsen af røgen.

Generelt kan turbulensmodellerne opdeles i hhv. dem, der benyttes sammen med de såkaldte RANS-modeller, og dem der benyttes i forbindelse med Large Eddy Simulering (LES) modeller.

Forkortelsen RANS står for Reynolds Average Navier Stokes simulering, og henviser til, hvordan turbulensen modelleres. I RANS-modellen gøres dette ved, at strømmingen opdeles i en middelværdi og en fluktuerende værdi ud fra middelværdien i den turbulente strømning.

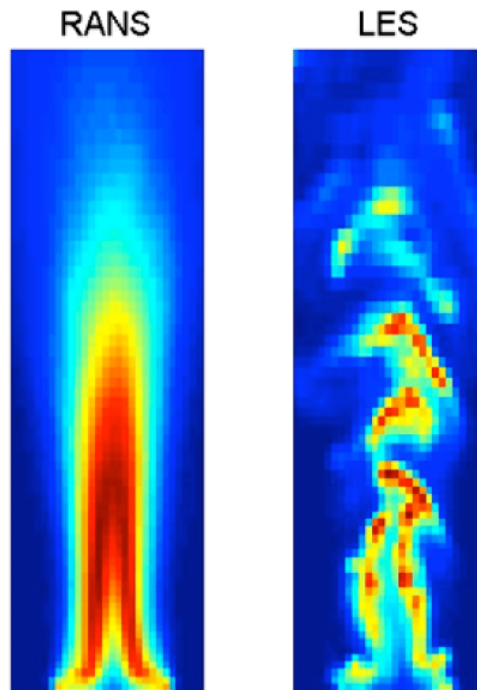
Turbulensmodellerne til RANS består typisk af 2-ligningsmodeller, som oftest k - ϵ model. Men mange andre såsom RNG, SST eller lignende kan bruges til brandsimuleringer. 2-ligningsmodeller vil være et minimumskrav i forbindelse med røgspredning.

Ligeledes anbefales det, at sætte det turbulente Schmidt tal lige med 1 for at forbedre den termiske stratificering i røglaget, idet den turbulente opblanding normalt dæmpes i stratificeret strømning langs et loft. Ved røgspredning vil de øgede termiske kræfter forårsage en forøgelse af den turbulente opblanding.

En LES model bygger på, at strukturerne i strømmingen, som er større end gridcellerne, beregnes direkte ud fra de grundlæggende ligninger, mens en ofte relativ simpel empirisk model anvendes for at beskrive turbulensen for de hvirvler, som er mindre end griddet. Ved korrekt anvendelse af LES modeller kræves et ekstremt fint beregningsgrid, for at kunne modellere alle strømningsstrukturerne.

Turbulensmodellen i FDS bygger på LES-metoden, og anvender en Smagorinsky model for beregning af påvirkningen fra turbulensen, der er mindre end beregningscellen.

Et eksempel på forskellen mellem de to typer turbulensmodeller ses i nedenstående figur.

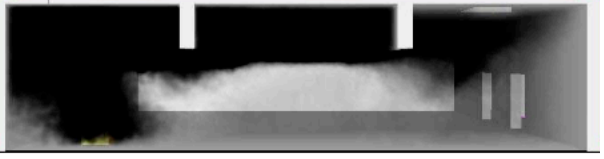






Figur 2-5 Forskellen mellem en RANS simulering med $k-\epsilon$ model (til venstre) og en LES model (til højre) i temperaturfordelingen i flamme området af branden [Hostikka, 2008].

Ved anvendelse af Smagorinsky-modellen i LES skal der være en konstant C_s , som giver udtryk for diffusiviteten i den turbulente strømning.

I nedenstående ses røgspredning ved forskellige C_s

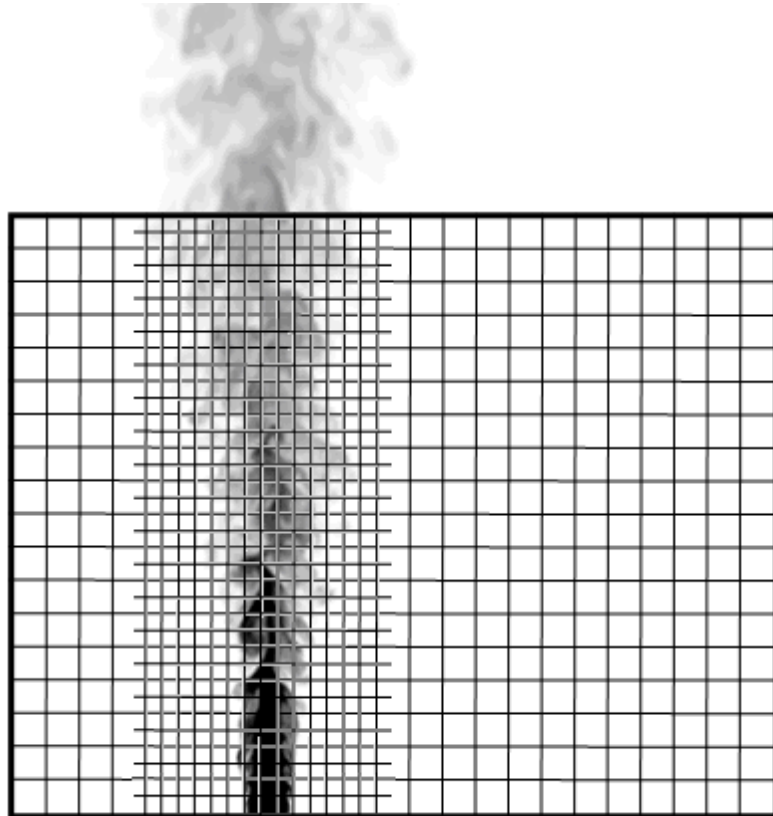
I FDS skal C_s vælges til 0.2, hvilken er en gennemsnitsværdi fundet ved sammenligning med forsøg.

Smagorinsky Konstant C_s	Røgspredning efter 300 sek (Beregningsgrid: 0.1m)
0.05	 A 3D visualization of smoke spread in a room after 300 seconds with a Smagorinsky constant of 0.05. The smoke is concentrated near the source and shows very little diffusion into the rest of the room.
0.10	 A 3D visualization of smoke spread in a room after 300 seconds with a Smagorinsky constant of 0.10. The smoke plume is slightly more dispersed than in the 0.05 case.
0.20	 A 3D visualization of smoke spread in a room after 300 seconds with a Smagorinsky constant of 0.20. The smoke is more widely distributed across the room.
0.30	 A 3D visualization of smoke spread in a room after 300 seconds with a Smagorinsky constant of 0.30. The smoke fills a significant portion of the room.
0.40	 A 3D visualization of smoke spread in a room after 300 seconds with a Smagorinsky constant of 0.40. The smoke is highly dispersed and fills most of the room.

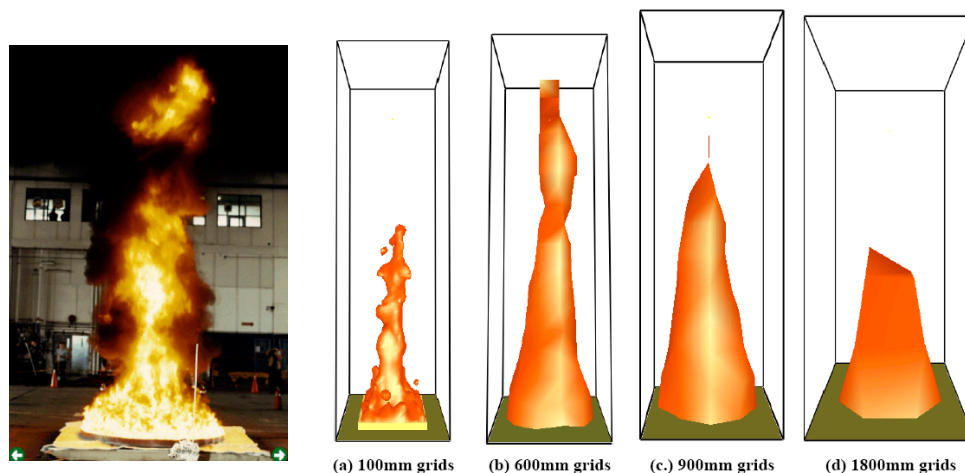
Figur 2-6 Røgspredning i et rum med forskellige Smagorinsky konstanter i LES modellen.

2.5 Beregningsgrid

Som beskrevet ovenfor relaterer kvaliteten af den numeriske løsning sig i høj grad til kvaliteten af det anvendte beregningsgrid. Problemstillinger ved design af beregningsgrid er beskrevet i bl.a. [Ferziger & Peric, 2002], [DiNenno, 2003] og [Valkvist, 2007].



Figur 2-5: Beregningsnet og den numeriske opløsning af plumen.



Figur 2-6: Beregningsgriddets indflydelse på den numeriske opløsning af branden samt flammerne.

Det skal til enhver tid tilstræbes at finde den gridafhængige løsning af hensyn til minimering af fejlkilden i forbindelse med den numeriske løsning af ligningssystemet. Den gridafhængige løsning kan anses for nået, når der ved en systematisk forfining af beregningsgriddet ikke kan registreres nogen kvantitativ eller kvalitativ ændring i løsningen i forhold til et passende konvergenzkriterium. Der vil i praksis være en forskel på den gridafhængige og den acceptable løsning. Den acceptable løsning skal repræsentere en acceptabel afvigelse, eksempelvis i forhold til kapaciteten på brandventilationsanlægget.

Af hensyn til nøjagtigheden af diskretiseringen vil store gradienter (eks. store hastighedsændringer og temperaturændringer) kræve en høj opløsning af beregningsgriddet. Da det ofte vil være uhåndterligt og resourcespild at anvende en høj opløsning af hele beregningsgriddet bør der anvendes et griddesign, hvor områder med store gradienter søges opløst med et stort antal beregningspunkter (celler). Beregningsdomænet vil dermed ikke nødvendigvis være ækvivalent diskretiseret.

Anlægges den ovenfor beskrevne tilgang til opløsning af beregningsdomænet, vil det være nærliggende at fokusere på områder i bereg-

ningsdomænet, hvor flowet har samme karakteristik, altså områder hvor flowprofilerne kvalitativt er tilnærmelsesvis identiske. Erfaring med branddynamik kan medføre en god forståelse af områder med samme flow-karakteristik, alternativt kan litteraturen til en vis grad bistå. [DiNenno, 2003] og [Valkvist, 2007] indeholder overordnede beskrivelser af karakteristiske flows.

I nærværende dokument skal følgende karakteristiske flows fremhæves:

- Aksesymmetrisk plume
- Linie plume
- Ceiling jet
- Rotation af flow
- Spill plume
- Wall jet
- Flow igennem ventilationsåbninger
- Flow igennem mekaniske ventilatorer
- Flow omkring konstruktionselementer

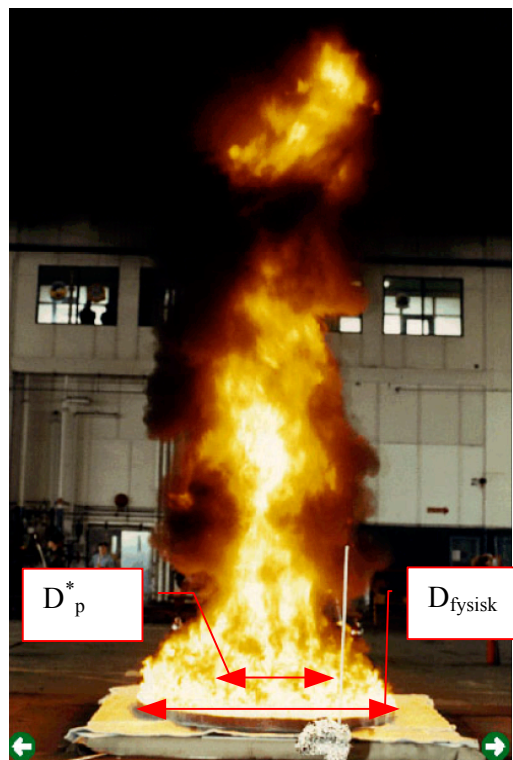
Ovenstående liste er ikke udtømmende, men repræsenterer blot typiske karakteristiske flow i ingeniørmæssig CFD brandmodellering.

Matematisk betragtes designbrände som kilder i beregningsdomænet, hvor der skildres mellem punkt- og liniekilder. I begge tilfælde har kildens styrke (brandeffekten) og den karakteristiske længde af flowet (bålets diameter eller anden karakteristisk længde) betydning for de resulterende flowprofiler. Man taler derfor om en designbrands karakteristiske længde/diameter $D_i^* [m]$ for hhv. aksesymmetrisk og linie plume

som funktion af den påtrykte konvektive brandeffekt $\dot{Q}_c [kW]$, se eks. [Drysdale, 2002], [Zukoski et al., 1981] og [Zukoski, 1995]:

$$D_p^* = \left(\frac{\dot{Q}_c}{\rho_\infty T_\infty c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad D_l^* = \left(\frac{\dot{Q}_c / L_l}{\rho_\infty T_\infty c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

hvor $L_l [m]$ er længden af linie-plumen, $\rho_\infty [kg/m^3]$ er densiteten af den omgivende luft, $T_\infty [K]$ er temperaturen af den omgivende luft, $c_p [kJ/(kg \cdot K)]$ er den specifikke varmekapacitet af den omgivende luft og $g [m/s^2]$ er tyngdeaccelerationen.



Figur 2-7: Illustration af forskel på fysisk båldiameter og karakteristisk båldiameter

Den karakteristiske længde kan ikke nødvendigvis knyttes til brandeffekten som angivet ovenfor. Det kommer eksempelvis til udtryk ved flowet omkring et givent konstruktionselement, der ikke nødvendigvis har en karakteristisk længde knyttet til brandeffekten, men i stedet relateret til en bygningskomponent som eksempelvis en ventilationsåbning. Det

samme gør sig også gældende for en ceiling jet, hvor dybden i højere grad er baseret på rumhøjden som angivet i [Klote & Milke, 2002].

Antallet af beregningspunkter (gridceller), der opløser den karakteristiske længde for et karakteristisk flow benævnes $n_i^* [-]$:

$$n_i^* = \frac{D_i^*}{\Delta x_i}$$

hvor $\Delta x_i^* [m]$ angiver den karakteristiske cellestørrelse. Vurderingen af den nødvendige opløsning kan ske ved at afbillede den løsning, der søges som funktion af n_i^* . Den afbillede løsning bør beskrive en integreret eller midlet løsning, for at undertrykke tidlige fluktuationer. Antallet af nødvendige gridceller findes som tidligere beskrevet, hvor løsningen ikke længere ændres (under hensyn til et givent konvergenzkriterium) ved en fortsat forfining af beregningsgriddet.

Bestemmelsen af den nødvendige gridopløsning vil altid være model-specifik, og det er således op til operatøren at sikre sig, at den anvendte opløsning er tilstrækkelig for den søgte konklusion og for den anvendte CFD-model. Konkrete metoder til at fastslå den nødvendige opløsning og model-specifikke anbefalinger med hensyn til gridopløsning kan findes i [DiNenno, 2003], [Ma & Quintiere, 2003], [Bounagui et al., 2003] og [Valkvist, 2007].

2.5.1 Gridforfining

Af hensyn til at sikre en tilstrækkelig opløsning af flowet omkring de karakteristiske flows kan det være nødvendigt at anvende grovere hhv. finere grids i bestemte regioner af beregningsdomænet. Opdriftsstyrede flows som eksempelvis bygningsbrande er primært matematisk paraboliske af natur, hvilket betyder, at der ikke overføres information om flowet opstrøms. Ved overførsel af flow fra et fint grid til et grovere mistes information om flowets detaljering (herunder hastigheds-, temperatur- og turbulensprofil). Det betyder, at man ikke kan forfine griddet igen ned-

strøms og genskabe en detaljeringsgrad svarende til forholdene før det grove grid. Overgangen til et groft grid forudsætter således, at det kan accepteres, at der mistes information om flowets detaljering.

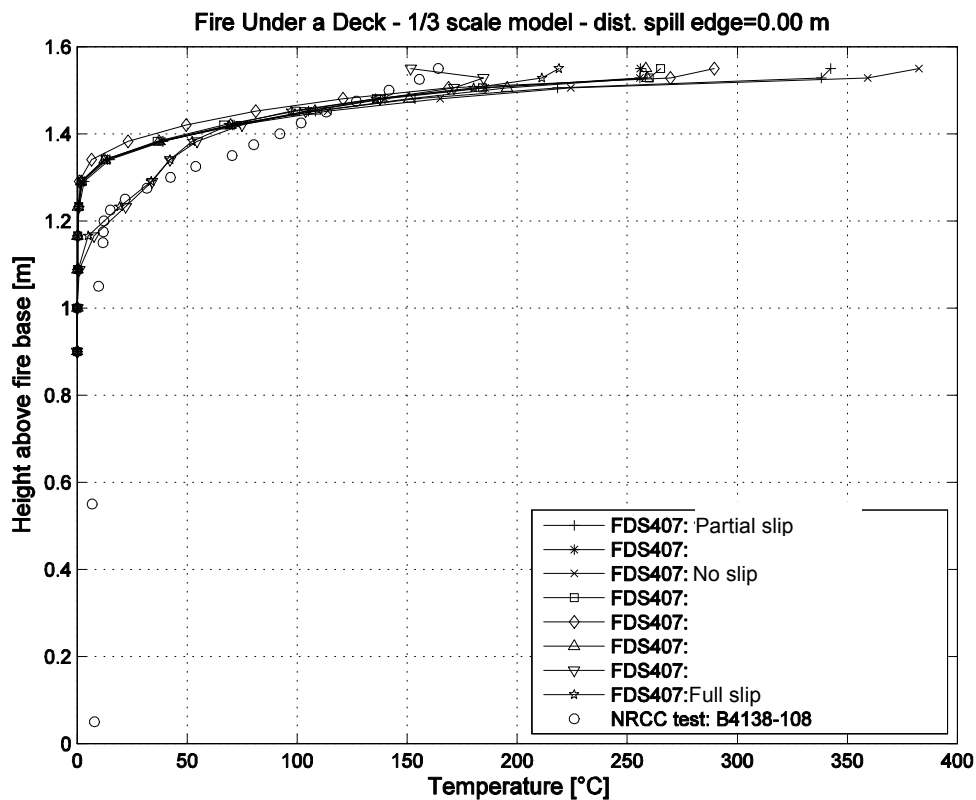
Afhængig af måden gridforfining håndteres på i den konkrete CFD-model, så kan det være relevant at sikre, at overførslen af information fra et fint til et grovere grid (og vice versa) er tilstrækkelig nøjagtig, således at flowprofilet ikke forstyrres unødvendigt. Nogle CFD-modeller anvender interpolation i gridinterfacet (eks. FDS), som introducerer en numerisk fejl nedstrøms i flowet samt i massestrømmen. Af den grund skal man være omhyggelig med placering af sine gridinterfaces og anerkende, at der ved enhver beregning af flowet vil introduceres en mindre numerisk fejl i interfacets gridpunkter. Et flow parallelt med interfacet vil således blive påvirket af mange numeriske fejl, mens et flow vinkelret på interfacet vil blive udsat for et minimum af interpolation. Generelt bør interfaces ikke placeres i områder, hvor store gradienter kan forventes.

2.6 Modellering af brandventilationsåbninger, indløb og væg

2.6.1 Randbetingelser for hastigheden på en væg

De fleste CFD programmer benytter en form for vægloven til beregning af friktionen ved væggen. Dog anvender nogle programmer ikke vægloven, og det vil derfor være nødvendigt, at dette overvejes, når luft eller røg bevæger sig langs loftet. Specielt kan friktionen påvirke, hvorledes der sker separationen af en væg-nær luftstråle eller en plumeluftstråle ved loftet, samt hvordan de 3-dimensionale strømninger sker i rummet, efter separationen fra loftet.

Nedenstående figur viser forskellen mellem en slip randbetingelse (ingen friktion ved væggen) og en no-slip randbetingelse (friktion i form af væglov).



Figur 2-8: Forskelle i et temperaturprofil ved anvendelse af en no-slip og slip betingelser ved vægge i CFD beregning.

Der skal tilnærmes en no-slip randbetingelse for hastigheden på væggen i overensstemmelse med strømningsmekaniklære.

Det bemærkes, at randbetingelser aldrig er kendt i virkeligheden samt at de ændres over tid. Der er specielt behov for at overveje om modellen og randbetingelsen er realistisk i forhold til:

- Detektorudløsning
- Køling af røggas under loft
- Separation af røggaslag
- Sammenligning m. måling

Ved placeringen af detektorer bør der benyttes en no-slip betingelse for at opnå den mest konservative løsning, med mindre andet kan dokumenteres.

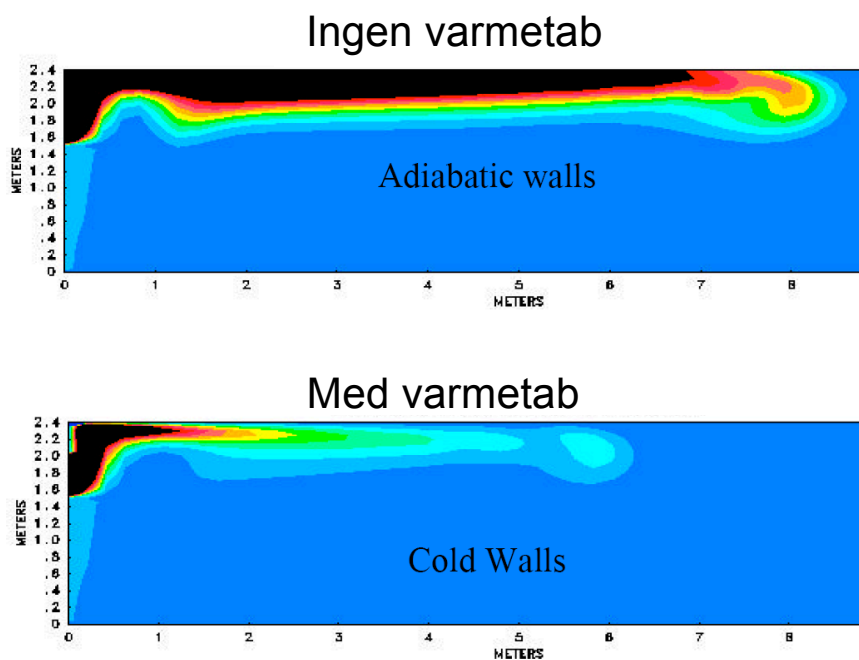
2.6.2 Randbetingelser for temperatur

Når CFD-simuleringer benyttes til røgspredning, er det vigtigt, at randbetingelser på vægge og loft sættes, således de svarer til de fysiske forhold.

Såfremt det antages, at vægge og loft er adiabatisk - dvs. at der ingen varmetab er igennem konstruktionen, vil røgen bevare sin termiske energi længere, og dermed vil opdriftskræfterne i strømningen være stærkere.

Modsat, hvis væggene sættes til en fast temperatur, vil røg blive afkølet for hurtigt og dermed miste opdriften.

Der bør derfor overvejs, hvorledes varmetabet til konstruktionen kan medtages i modellen.



Figur 2-9: Forskellen på temperaturen i røglaget ved anvendelse af en adiabatisk væg (øverst) og en væg med fast temperatur (nederst) på temperaturen i røglaget.

Som det tydeligt fremgår af figur 2-9, så har temperatur-randbetingelsen stor effekt, hvorfor denne skal modelleres så tæt på aktuelle forhold som muligt.

Hvis der laves beregninger af en stationær løsning, kan stationære forhold fremskyndes ved at ændre på parametre for randbetingelsen. Fx kan varmeledningsevnen øges, hvorved konstruktioner hurtigere opnår deres sluttemperatur. Eksempelvis er dette nyttigt, når der skal undersøges, om der er risiko for overtænding.

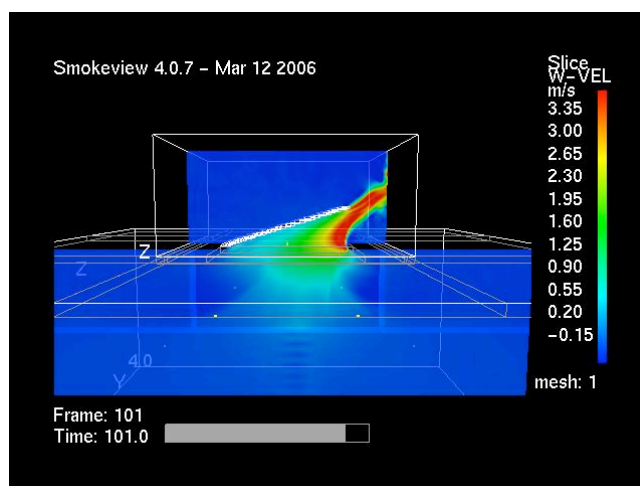
2.6.3 Naturlige brandventilationsåbninger

Naturlige brandventilationsåbninger er styret af opdriften og kompressionen af strømmen igennem ventilationsåbningen. Ved passage igennem ventilationsåbningen vil strømmen blive presset sammen, se figur 2-10. Konsekvensen af denne indsnævring er dannelsen af "vena contracta" nedstrøms, og dermed definitionen af det aerodynamiske areal (det mindste tværsnitsareal i strømmen igennem ventilationsåbningen). Det er tydeligt, at det aerodynamiske areal er med til at definere effektiviteten af en naturlig ventilationsåbning. Af denne grund er det af største vigtighed, at "vena contracta" tages i betragtning.

Som udgangspunkt er der tre metoder til ingeniørmæssig modellering af flow igennem naturlige ventilationsåbninger beskrevet i det følgende.

Fuld modellering

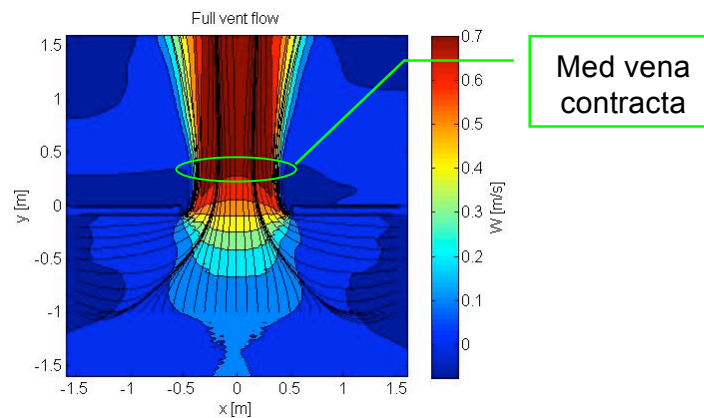
Den fulde ventilationsåbning modelleres med en opløsning tilstrækkelig høj til at definere størrelsen og placeringen af vena contracta. Dette vil kræve, at beregningsdomænet er udstrakt tilstrækkeligt nedstrøms til at dannelsen af vena contracta sker inde i beregningsdomænet.



Figur 2-10: Fuld modellering af flow igennem naturlig ventilationsåbning.

Modellering af blænde

Der modelleres en blænde-åbning med komplet tilstrækkeligt opløst flow igennem åbningen og med beregningsdomænet udstrakt nedstrøms, så vena contracta dannes i beregningsdomænet. Ved en korrekt opløsning af flowet kendes kontraktionskoefficienten for en blænde som typisk $c_v \approx 0,6$ for en horisontal åbning og $c_v \approx 0,68$ for en vertikal åbning, se [Emmons, 1997], hvorved det nødvendige aerodynamiske areal A_a findes på baggrund af det i CFD-modellen fastlagte geometriske areal A_g .

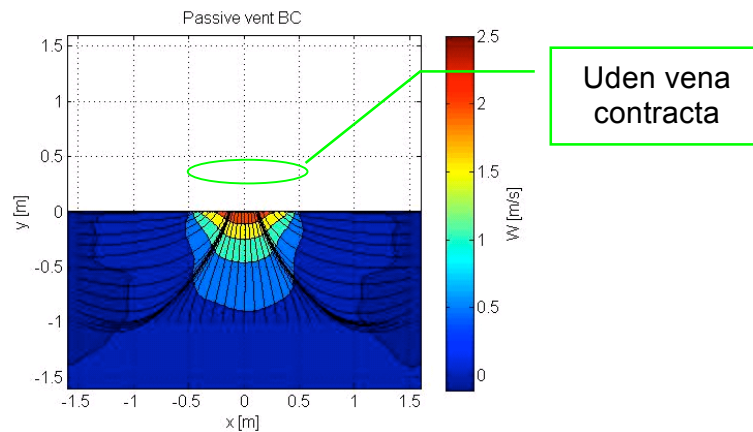


Figur 2-11: Modellering af blænde til flow gennem naturlig ventilationsåbning.

Simpel modellering

Ved en simpel modellering af ventilationsåbningen modelleres åbningen som en blænde, men nedstrømsflowet, i.e. flowet når det har passeret blænden, inkluderes ikke i beregningsgriddet. Herved introduceres en fejl, idet dannelsen af vena contracta ikke tages i regning. Under bevarelse af masseflowet igennem åbningen skaleres det simulerede geometriske areal igennem en korrektionsfaktor $c_{i,cfid}$, således at det tilsvarende geometriske areal A_g , der er påkrævet ved et tilsvarende masseflow igennem vena contracta findes. Herefter er det trivielt at omregne til det aerodynamiske areal A_a , idet kontraktionskoefficienten for en

blænde kendes som typisk $c_v \approx 0,6$ for en horisontal åbning og $c_v \approx 0,68$ for en vertikal åbning, se [Emmons, 1997]. En model-specifik fremgangsmåde er beskrevet i [Valkvist, 2007].



Figur 2-11: Simple modellering af flow igennem naturlig ventilationsåbning.

2.6.4 Mekanisk brandventilation

Mekaniske brandventilatorer modelleres under hensyn til bemærkningerne i det følgende.

Impulsventilation:

Ved impulsventilation sættes luften i bevægelse, og det er således vigtigt at sikre at luften tilføres den rette impuls. I den forbindelse er retning og opløsning af flowfeltet før og efter impulsventilatoren af største vigtighed for flowets karakteristik, herunder hastighed og udstrækning. For dårlig opløsning af flowfeltet vil typisk resultere i en stor numerisk diffusion og dermed for lav hastighed og for stor udstrækning, i.e. lav impuls. Modellering af impulsventilatorer kræver et særskilt studie af ventilatorens hastighedsfelt, så det kan sandsynliggøres, at det er i overensstemmelse med leverandørens målinger.

Udsugningspunkter:

Modellering af udsugningspunkter fra eksempelvis aksial og centrifugal ventilatorer medfører, at det som minimum er indsugningsflowet, der skal opløses tilstrækkeligt. Konsekvensen kan være, at plugholing ikke vil kunne iagttages. Vælger operatøren at anvende en lav opløsning i inflowet, skal det ad anden vej sikres, at der ikke suges hul i røggaslaget med frisk luft fra den nedre zone, kendt som plugholing, eksempelvis ved at foretage en vurdering ved brug af håndberegningsformlerne for sikring mod plugholing, se [Klote & Milke, 2002]:

$$\dot{V}_{maks} = 0,00887 \beta d^{5/2} \sqrt{T_0 (T_s - T_0)}$$

hvor \dot{V}_{maks} [m^3/s] er den maksimale udsugningsmængde tilladelig for at undgå plugholing, β [-] er en korrektionsfaktor for placering af udsugningspunktet (se [Klote & Milke, 2002]), d [m] er røggaslagets tykkelse, T_0 [K] er omgivelsernes temperatur og T_s [K] er røggaslagets temperatur.

2.6.5 Hastigheder og C_v -faktorer for erstatningsluftåbninger

Hastigheden over erstatningsluftåbninger bør vurderes i forhold til at undgå øget røgproduktion ved en hældende plume, brandspredning ved ophvirvling af brændsel og modvind for evakuerer. [DS/EN-12101-5, 2005] anbefaler begrænsninger i lufthastigheden på mellem 1 m/s (sikring mod øget røgproduktion) og op til 5 m/s (sikring mod ukomfortabel modvind). Begrænsningen i forhold til forøget røgproduktion skal ses i forhold til placeringen af røggaslaget og plumen, idet store afstande selvfølgelig giver mulighed for en lokal højere hastighed.

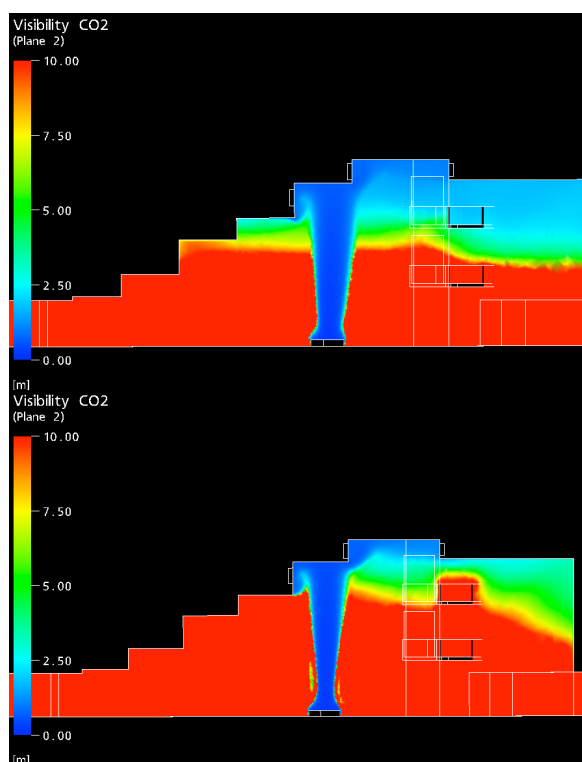
Effektivitetsfaktoren c_v sættes jf. [DBI-27, 2007] til 0,7 (0,68 er mere korrekt, se afsnit 2.6.3) for åbninger, der har en åbningsvinkel på mere end 90 °.

Jf. [DS/EN-12101-5, 2005] kan en åbning med en åbningsvinkel på 45 ° eller mere, sættes til 0,6.

2.7 Indflydelsen af ventilation på røgspredningen og temperaturen

Det bør overvejs, om det er nødvendigt at beregne ventilationen i bygningen før der foretages en brandsimulering. Specielt når der anvendes naturlig ventilation, kan der opstå forøgede lufthastigheder i bygningen, som kan påvirke spredningen af røgen samt temperatur niveauet i røggaslaget.

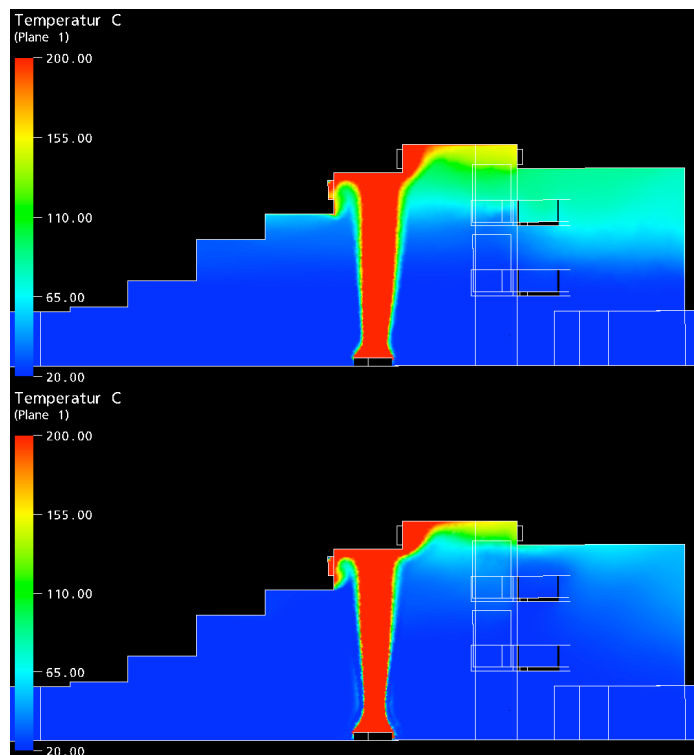
I nedenstående eksempel er der hhv. med og uden den naturlige ventilation i atriet i bygningen. Resultat vises for hhv. sigtbarhed og temperatur niveauer i et snitplan.



Figur 2-13. Betydning for sigtbarheden om naturlig ventilation er medtaget eller ej som begyndelsesbetingelse for luftstrømningen i atriet. Øverste figur: Med naturlig ventilation. Nederste figur: Uden naturlig ventilation.

Af figur 2-13 og 2-14 ses indflydelsen af den korrekte begyndelsebetingelse i forbindelse med simulering af brandudviklingen og røg og temperatur spredning i et mindre atrium. Luftstrømninger påvirker røgspred-

ning og derved gøre mere diffus, og dermed sænker sigtbarheden i et større volumen, end når der ikke er nogen ventilation medtaget i modeleringen. Påvirkning kan være væsentlig, idet en gangbro øverst kan som i ovenstående tilfælde bliver, påvirker og derved ikke muliggør benyttelse i forbindelse med evakuering. Det vil derfor være væsentligt at der sker en vurdering af indflydelsen af ventilation i bygningen i forbindelse med brandsimuleringerne.



Figur 2-14: Betydning for temperatur fordelingen om naturlig ventilation er medtaget eller ej som begyndelsesbetingelse for luftstrømningen i atriet. Øverste figur: Med naturlig ventilation. Nederste figur: Uden naturlig ventilation.

2.8 Eksempler på fejlkilder ved CFD modellering af brand

En CFD brandmodel er en model af nogle faktiske forhold. At der er tale om en model betyder, at løsningen som udgangspunkt er behæftet med nogle fejl, som i denne sammenhæng kort kan beskrives ved:

Matematisk model:

Den matematiske model bygger på nogle antagelser omkring de matematiske, fysiske og kemiske forhold, som er nødvendige for at kunne beskrive processerne ved et system af matematiske ligninger. Den matematiske model vil altid repræsentere en tilnærmelse til virkeligheden, og dermed introducere en fejl i den løsning sammenholdt med den reelle løsning. Fejlen som begås med den matematiske model kan evalueres ved sammenligning af en griduafhængig løsning (se nedenfor) med fysiske forsøg.

Diskretisering:

Oversættelsen af de analytiske ligninger ovenfor til en numerisk model medfører diskretisering af ligningssystemet, så det kan løses i nogle diskrete punkter. Valget af diskretiseringsmetode har betydning for løsningens stabilitet, nøjagtighed og konvergenshastighed (hastigheden hvormed løsningen nærmer sig den grid-uafhængige løsning). Den numeriske løsning af ligningssystemet er stærkt afhængig af kvaliteten af diskretiseringen, hvilket overordnet set kan tilskrives antallet af diskrete punkter, hvor på løsningen findes. I takt med at antallet af diskrete punkter øges, da vil også nøjagtigheden af den numeriske løsning øges, og den vil nærme sig den reelle løsning til den matematiske model kendt som den griduafhængige løsning. Det skal tilstræbes at finde den griduafhængige løsning ved at anvende tilpas mange diskrete punkter (celler) i løsningsdomænet. Fejlen som begås i forbindelse med diskretiseringen kan evalueres ved at betragte løsningen på et passende antal systematisk forfinede beregningsgrid. Optimalt vil en forsvindende forskel (under hensyn til et tilpas lille konvergenskriterium) imellem to sy-

stematisk forfinede beregningsgrid medføre identifikation af den grid-uafhængige løsning.

Løsningsmetoden:

Metoden hvormed systemet af matematiske ligninger løses numerisk. Løsningsmetoden vælges under hensyn til typen af matematisk ligningssystem, så der kan opnås konvergens.

Konvergenskriteriet:

Sikrer at den numeriske løsning er konvergeret, og dermed at den numeriske løsning er tilstrækkelig tæt på den reelle løsning. Konvergenskriteriet skal sættes tilstrækkeligt lavt til at sikre, at løsningen er konvergeret.

Matematisk modellering handler om at tilnærme en reel løsning (ofte ukendt) med en numerisk løsning. Det er alene op til operatøren at vurdere, i hvilken grad den numeriske løsning er anvendelig til at beskrive den stillede opgave og dermed anvendelig i vurderingen af den givne problemstilling.

3 Branden, røgpotentiale, C-factor mv.

Griddet i branden bør ikke deles, og bør vertikalt gå helt op til domænets afgrænsning eller en obstruktionen over branden.

Branden og griddets størrelse kan kvalitetssikres efter en eller flere af følgende parametre, der er gældende for brande med prædefineret effekt HRRPUA:

- Temperaturen i centeret af en flammebrand bør være mellem 700 og 1.200 grader, mens temperaturen i toppen af en flammebrand bør være omkring 500-600 grader. [Brandskyddshandboken, 2005]
- Flammehøjden, der bør være realistisk, kan f.eks. beregnes ud fra $L = 0,235Q^{2/5} - 1,02D$ [Heskestad, 1995]
- Den dimensionsløse effektudvikling Q^* bør ligge mellem 0,3, og 2,5 [Cox, 2002], hvor værdien på 0,3 er den generelle nedre grænse for formlens gyldighedsområde.

Q^* beregnes ud fra:
$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}}$$

Der kan også benyttes programspecifikke parametre som f.eks. for FDS:

- D^*/dx bør ligge i intervallet 4-16 [User guide 5],

$$\text{hvor } D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

og dx er den største sidelængde på cellerne i meter, og D^* er den karakteristiske diameter af branden.

Arbejdsgruppen anbefaler dog, at kriteriet altid vælges til en værdi større end 10.

For at få ovennævnte parametre til at passe, vil det være nødvendigt at justerer på HRRPUA og griddets størrelse. Det er vigtigt, at HRRPUA vælges realistisk, idet massefløvet i plumen er direkte afhængig af dens størrelse. Derfor skal designbranden nøje vurderes, således at den afspejler det brændende objekt både i størrelse og intensitet. For at simulere udviklingsfasen bør man i FDS benyttes sig af funktionen for "spreadrate", således at branden gennem brandforløbet spreder sig geometrisk over et givet område. HRRPUA vil normalt skulle ligge mellem 500 og 2.500 kW/m² i forhold til gulvarealet. Reference til retningsgivne værdier findes i tabel 3.6 i [EFD]. Dette er en noget højere værdi end angivet i Information om brandteknisk dimensionering [Informationen 2004] for den gennemsnitlige brandeffekt/m², som er en gennemsnitlig intensitet for området, som helhed, mens intensiteten i selve området, hvor branden er, kan være noget større.

I FDS kan der benyttes to fremgangsmåder til simulering af forbrænding - Finite-rate og Mixture Fraction.

Finite-rate, hvor forbrændingskomponenterne og deres reaktioner følges eksplicit, giver mere præcise resultater for stråling ved brandspredningsanalyser, men bør kun benyttes, når FDS kører som en Direct numerical simulation DNS-beregning.

Ved traditionelle analyser af røgspredning vil man normalt benytte den simplificerede forbrændingsmodel (Mixture Fraction), hvor brandstoffet tilsættes færdigblandet, og reagerer, såfremt der er ilt nok tilstede.

I Mixture Fraction modellen er der overordnet to metoder til repræsentation af en brandkilde; enten som en varmekilde af et rent brændstof, hvortil der tilsættes ekstra sod eller ved opbygning af et kombinationsbrændstof. Begge metoder er anvendelige.

I begge tilfælde bør der vælges en sodproduktion, som afspejler afbrænding af de materialer, som der forventeligt kan forefindes.

Til beregning af sodproduktionen kan der tages udgangspunkt i [BPH, 2003].

Hvis der benyttes et kombinationsbrændstof, bør der ydermere argumenteres for materialets brændværdi.

Metode 1: Som et rent brændstof med en kendt brændværdi og sodkoncentration.

Nedenfor er vist et eksempel på FDS kodeparametre for en propanbrand med øget sodproduktion.

```
&REAC ID = 'EXAMPLE SOOT SOURCE'  
    FYI = 'Propan fire with extra soot'  
    SOOT_YIELD = 0.09
```

Metode 2: Som et kombinationsbrændsel

Ved opsætning af brændstoffet på denne måde bør der argumenteres for brændslets sammensætning på basis af de aktuelle materialer i bygningen, f.eks. en blanding af træ og plast. Energiudviklingen for det sammensatte brændstoffet baseres på iltforbruget (EPUMO2) men kan også baseres på heat of combustion SFPE tabel 3.3.4 [SFPE].

Nedenfor er vist et eksempel på FDS kodeparametre for en type træ, en type polyuretan og et fiktivt blandingsprodukt.

&REAC ID = 'WOOD'

FYI = 'Ritchie, et al., 5th IAFSS, C_3.4 H_6.2 O_2.5'

SOOT_YIELD = 0.01

N = 0.0

C = 3.4

H = 6.2

O = 2.5

EPUMO2 = 11020. /

&REAC ID = 'POLYURETHANE'

FYI = 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'

SOOT_YIELD = 0.10

N = 1.0

C = 6.3

H = 7.1

O = 2.1

EPUMO2 = 13100. /

&REAC ID = '80WOOD_20POLYURETHANE'

FYI = 'Mix of 80 % wood and 20 % polyurethane'

SOOT_YIELD = 0.028

N = 0.2

C = 4.0

H = 6.4

O = 2.4

EPUMO2 = 11436. /

Brandens højde over gulv bør vurderes realistisk, men kan normalt placeres konservativt på eller lidt hævet over gulvet.

Brandens placering i forhold til vægge bør vurderes realistisk, hvis branden er tæt på vægge eller hjørner vil det medfører mindre luftind-

trængningen i plumen og en højere røggastemperatur i plumen. Endvidere vil det medføre en højere middelflammehøjde.

Brandens påvirkning af sigtbarheden bør vurderes med udgangspunkt i den i [informationen, 2004] angivne orienteringsgrad på 10 m. I FDS svarer dette til en VISIBILITY_FACTOR på 3 (default), som derfor ikke bør ændres, med mindre der argumenteres særskilt herfor.

4 Anvendelse af aktive systemer i simuleringer

Ved beregning af kritiske forhold for personer og redningsberedskabets indsatsmuligheder i bygningen anvendes i stor udstrækning aktive systemer. De mest anvendte aktive systemer i forbindelse med brandsimulering er termisk og mekanisk brandventilation samt sprinkling. Til fastsættelse af hvornår de aktive systemer træder i kraft, kan forskellige detektorer anvendes, hvilket fremgår sidst i afsnittet.

4.1 Brandventilation

4.1.1 Termisk brandventilation

Ved simulering af termisk brandventilation skal brugeren være opmærksom på, at der er en åbningstid for brandventilationsåbningerne. Åbningstiden for brandventilationsåbningerne fremgår af producentens datablade, men såfremt disse ikke haves kan maksimalværdierne fra DS/EN 12101-2 benyttes [12101, 2003-2005]. Heri angives, at brandventilationsåbningen skal være fuld funktionsdygtig efter maksimalt 60 sekunder. Beskrivelse af hvordan en brandventilationsåbningen kan modelleres fremgår af afsnit 2.5.4.

4.1.2 Mekanisk brandventilation

Ved simulering af mekanisk brandventilation har ventilatorerne en aktiveringstid fra signal til fuld funktionsdygtighed på 30 sekunder jf. DS/EN 12102-3. Typisk kendes "ramp"-karakteristikken for den valgte ventilator ikke på forhånd, så det anbefales at der vælges en "ramp" funktionen, som strækker sig minimum over 5 sekunder (f.eks. fra 25 til 30 sekunder efter aktiveringssignalet af ventilatoren). Det skal kontrolleres, at det pågældende brandventilationssystem som anvendes til den mekaniske brandventilation ikke har en langsommere aktivering end 30 sekunder.

Hvis det samlede anlæg har længere aktiveringstid, skal aktiveringstiden sættes til mindst tiden, som fremgår af producentens datablade. Yderligere beskrivelse af ventilatorer findes under afsnit 2.5.4

4.1.3 Erstatningsluft

Ved benyttelse af enten termisk eller mekanisk erstatningsluft, er der behov for automatisk åbning af erstatningsluft åbninger. Dette er almindeligvis døre, vinduer eller porte i facaderne. Åbningerne i modellen skal være placeret således som de tiltænkes i det faktiske byggeri. Erstatningsluftåbningerne har en maksimal åbningstid fra signal til fuldt åbent på 60 sekunder jf. DBI Vejledning 27 [Vejledning 27, 2007].

4.1.4 Placering af åbninger og ventilatorer

Placeringen af ventilatorer samt åbninger i bygningsfacaden skal placeres således de svare til den tiltænkte placering i byggeriet. Såfremt den aktuelle position af komponenterne ikke kendes, bør den mest konservative placering vælges, og det skal sandsynliggøres, at en ændring af placeringen kun vil medføre, at der går længere tid inden der opstår kritiske forhold.

4.1.5 Sammenspil mellem aktive systemer

For at sikre, at de aktive systemer arbejder sammen og ikke hindre hinanden i at fungerer, er det vigtigt bl.a., at sikre at tilluftsåbningerne åbner før den mekaniske brandventilation starter for at undgå at åbningerne i praksis bliver fastholdt i lukket position. Såfremt det ikke ønskes, at udsætte aktiveringen af den mekaniske brandventilation skal det foreskrives, at åbningerne åbner indad således at et opstået undertryk kun vil være til gavn for åbningen af erstatningsluftåbningerne.

Opmærksomheden bør henledes på at forsyningssikkerheden ved en aktivt anlæg skal sikres. Dette bør ske efter enten DBI Vejledning 27

[Vejledning 27, 2007] eller DS/EN 12101 serien [DS/EN 12101, 2002-2005].

4.2 Sprinkling

Ved anvendelse af sprinkling, skal brugeren være opmærksom på, at simuleringen ikke kan benyttes som dimensioneringsgrundlag for projektering af sprinkleranlæg. Ved anvendelse af sprinklere i beregningen kan effekten fra branden fastlåses til den brandeffekt, som er opnået på det tidspunkt hvor sprinkleren udløser. Placering og karakteristikker for sprinklingen fremgår sidst i afsnittet.

Der bør udvises stor forsigtighed ved vurdering af røgbevægelserne efter udløsning af sprinklere.

4.3 Anvendelse af røgdetektor og sprinkler i FDS

4.3.1 Røgdektektor:

Man skal sikre sig at røgdetektorer er placeret der, hvor man vil måle røgtætheden. Samtidig er det vigtigt at placere røgdetektoren på det ugunstigste sted. Ligeledes bør opmærksomheden rettes mod at afstanden fra brandens centrum bør være producentens maksimale r_0 angivelse eller dem som f.eks. kan findes i Forskrift 232 omhandlende Automatiske brandalarmanlæg [*Forskrift 232, 2009*]. I Forskrift 232 angives den maksimale r_0 til 8 meter for vandret loft. Dette sikre, at aktiveringstiden for røgdetektoren bliver den maksimale og derfor bliver løsningen mest konservativ. Røgdetektoren bør ligeledes være placeret i en afstand mellem 5 cm og 15 cm fra loftkonstruktionen af.

Hvis røgdetektortypen ikke kendes, kan man med fordel benytte en "sprinkler" med en aktiveringstemperatur på 33 grader og en RTI værdi på 0,5, jf. [BSI, 7974: 2003].

Eksempel på fds input:

Men sigtbarheden S kan omsættes til "extinction coefficient" K sammen med "VISIBILITY_FACTOR" C som sættes til 3, med følgende formel:

$$S=C/K \quad \blacktriangleright \quad K=C/S = 3/33,333 = 0,090$$

En kodelinie i FDS vil da være følgende:

```
&DEVC XYZ= x,y,z, QUANTITY='extinction coefficient', ID='SD02',
SETPOINT=0.09, INITIAL_STATE=.FALSE. /
```

Ønskes en mere følsom røgdetektor med en optisk røgtæthed på 0,2 dB/m skal SETPOINT ændres til 0,06.

4.3.2 Termometektorer:

Det er ligeledes muligt at benytte termometektorer, disse skal som for røgdetektorerne påfylde kravene angivet i [Forskrift 232,2009]. Ved termometektorerne er det vigtigt at være bekendt med at den maksimale r0 iht. Forskrift 232 maksimalt kan antage 5 meter. Ved benyttelse af termometektorer er det vigtigt at benytte producentens aktiveringstemperatur samt RTI værdi.

Eksempel på fds input:

```
&DEVC ID='HD', PROP_ID='Acme Heat', XYZ=2.3,4.6,3.4 /
```

```
&PROP ID='Acme Heat', QUANTITY='LINK TEMPERATURE',
RTI=100., ACTIVATION_TEMPERATURE=68. /
```

4.3.3 Sprinkler:

Sprinkleren skal placeres i en sådan afstand fra loftet, som er angivet for den virkelige placering af sprinkleren. I henhold til [Forskrift 251/4001, 2009] skal sprinkleren placeres i en afstand fra loftet på mellem 7,5 cm og 15 cm.

Sprinkleren skal ydermere placeres i henhold til den benyttede standarden som sprinkleranlægget dimensioneres efter. Her skal opmærksomheden specielt rettes på om det er i normal risikoklasse (OH1-3) eller høj risikoklasse (HHS), jvf. [5]

Ved normal risikoklasse er dækningsområdet for en sprinkler 12 m² hvor sidelængden maksimalt kan antage 4 m, og ved høj risikoklasse (HHS) 9m² dækningsområde og en sidelængde på maksimalt 3,7 m. For at opnå den mest konservative løsning for bygningen skal sprinkleren placeres længst væk fra brandens centrum.

Eksempel på sprinkler opbygning i FDS med indbygget forsinkelse i:

```
&DEVC XYZ=2,2,3, PROP_ID='Acme Sprinkler_link', QUANTITY='LINK  
TEMPERATURE',
```

```
ID='Spk_1_link', CTRL_ID='sprink' /
```

```
&DEVC XYZ=2,2,3, PROP_ID='Acme Sprinkler',  
QUANTITY='CONTROL', ID='Spk_1',
```

```
CTRL_ID='sprink' /
```

```
&CTRL ID='sprink', FUNCTION_TYPE='TIME_DELAY',  
INPUT_ID='Spk_1_link', DELAY=30. /
```

Sprinkleren aktiveres men har en forsinkelse på 30 sekunder som angivet i sidste linie.

5 Konstruktioner og brand

I dette kapitel opstilles nogle generelle designparametre, der som minimum skal tages i betragtning ved brug af CFD til at bestemme den temperaturkurve, der benyttes som grundlag for dimensionering af konstruktioner udsat for brandpåvirkning.

- I kapitlet vil kun forhold omkring bærende konstruktioner blive behandlet. Forhold der vedrører personsikkerhed og indsatsforhold mht. temperatur og røgspredning er ikke behandlet. Konstruktionernes brandmodstand er en vigtig parameter, der skal medtages, når de samlede indsatsforhold vurderes.
- Som udgangspunkt skal man som ved alle andre modeller overveje, om modellen er brugbar til det formål, man ønsker at anvende den til. Det anbefales derfor, at der opstilles en model for hvert konstruktionselement, der ønskes undersøgt, idet en placering af branden ikke nødvendigvis virker mest ugunstigt for alle konstruktionselementer.

5.1 Normer

Overordnet er der to måder at vurdere, om en bygnings konstruktioners brandmodstandsevne er tilstrækkelig, nemlig

- at følge bygningsreglementet og den hertil hørende eksempelsamling
- at udføre en brandteknisk dimensionering, hvor CFD kan bruges som et værktøj til at bestemme de termiske ændringer i rummet.

Ved at benyttes sig af bygningsreglementet vil man kunne følge de i Eksempelsamlingens [Eksempelsamling, 2006] tabel 3.1 til 3.3 forskrevne brandmodstandsevner for bærende bygningsdele. De tre tabeller gælder dog kun for bygninger, hvor højden til gulv i øverste etage er mindre end eller lig 22 m. Bygninger der er højere end 22 m, vil derfor under alle omstændigheder kræve en nærmere analyse eller vurdering af kravene til de bærende bygningsdele.

Ønsker man i stedet at udføre en brandteknisk dimensionering, ligger normerne op til, at de termiske brandlaster på konstruktioner kan bestemmes vha. CFD-modeller [DS/EN 1991-1-2, 2007].

Ved en brandteknisk dimensionering af bærende konstruktioner skal gældende normer følges. Nedenstående er et uddrag af de normer, der kan benyttes til brandteknisk dimensionering af konstruktioner.

Brandlaster, Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-2: Generelle laster - Brandlast [DS/EN 1991-1-2, 2007]

Betonkonstruktioner, Eurocode 2: Betonkonstruktioner- Del 1-2: Generelle regler - Brandteknisk dimensionering [DS/EN 1992-1-2, 2006]

Stålkonstruktioner, Eurocode 3: Stålkonstruktioner - Del 1-2: Generelle regler - Brandteknisk dimensionering [DS/EN 1993-1-2, 2007]

Trækonstruktioner, Eurocode 5: Trækonstruktioner - Del 1-2: Generelle regler - Brandteknisk dimensionering [DS/EN 1995-1-2, 2007]

I ovenstående standarder beskrives fremgangsmåden ved dimensionering som:

"En fuldstændig analytisk metode til brandteknisk dimensionering skulle principielt tage hensyn til konstruktionssystemets virkemåde ved høje temperaturer, den potentielle varmepåvirkning og de gunstige virkninger af aktive og passive systemer til brandsikring, og til de usikkerheder, der

er forbundet med disse tre forhold, samt til konstruktionens betydning (konsekvenser af svigt)."

Ved at benytte sig af en brandteknisk dimensionering, vil der ikke være behov for, at de enkelte konstruktionselementer er klassificeret til at have en given brandmodstandsevne, idet der i en brandteknisk dimensionering tages udgangspunkt i materialeparametrene for de enkelte konstruktionselementer. Der skal tillige tages hensyn til beredskabets tidskrav til en forsvarlig indsats.

Iht. det nationale anneks skal CFD-modeller være validerede til at bestemme tids-temperaturforløb for den pågældende brandpåvirkning. Der skal for ventilationskontrollerede brande tages højde for forbrænding af uforbrændte gasser, der ikke forbrændes i selve bålet. Det er ikke tilstrækkeligt, at modellen er valideret for bestemmelse af røgbevægelser.

5.2 Overordnede betragtninger om model input

Ved projektering af konstruktioner, hvor konstruktionernes brandmodstandsevne eftervises vha. af en brandteknisk dimensionering, findes to måder til at eftervise, at brandmodstandsevnen er tilstrækkelig. De to måder er:

- Nominelle brandforløb, brandforløb der normalt benyttes til klassifikation eller eftervisning af brandmodstandsevnen, disse er f.eks. standardbrandforløb.
- Parametriske brandforløb, hvor brandforløbet er bestemt ud fra de specifikke parametre og forhold såsom åbningsareal og termiske egenskaber af rummet.

Ved brandteknisk dimensionering vil følgende forhold have indflydelse på modellen:

- De geometriske forhold, eksempelvis afstanden mellem branden og konstruktionselementet. Dette har bl.a. indflydelse på, hvor meget stråling et konstruktionselement vil modtage. Cellestørrelsen der

vælges kan også have indflydelse på bidrag til strålingen og temperaturen.

- Den kemiske sammensætning af røgen, der har indflydelse på, hvor meget røglaget stråler på konstruktionselementet.
- Størrelsen af branden, der har betydning for bl.a. flammestørrelsen, der igen har betydning for strålingsniveauet. I nogle tilfælde har brandens størrelse også betydning for, om konstruktionselementet vil være direkte påvirket af flammerne.
- Sikre at åbningerne i modellen ikke ventilationskontrollerer branden. Det skal sikres, at branden får tilført tilstrækkeligt ilt.
- Valg af målepunkter (punkter i modellen, hvor en parameter noteres for et givet tidsinterval) og parametre, da nogle CFD-modeller, som eksempelvis FDS, kun har en én-dimensional varmeledningsmodel, vil det være nødvendigt, at overveje hvilke input en strukturel model har behov for.
- Valg af de omkringliggende konstruktionselementers materialeparametre. Disse parametre har indflydelse på, hvor meget energi fra branden, der afgives til omgivelserne. Som en generel konservativ antagelse kan man vælge alle overflader som adiabatisk.

Ovenstående forhold er nærmere beskrevet i tidligere kapitler.

For selve designbranden, der benyttes til eftervisning af brandmodstandsevnen for konstruktioner, har nedenstående parametre en væsentlig betydning,

- Brandeffekten
- Brandbelastningen
- Brandtilvæksten

5.2.1 Brandeffekt

Brandeffekten har en stor indflydelse på, hvor meget varme konstruktionerne vil modtage. En lille effekt vil ikke producere de store temperaturer i flammen eller røglaget, og vil deraf ikke give så store konvektions- og strålingsbidrag til konstruktionen.

5.2.2 Brandbelastning

Brandbelastningen bør i videst muligt omfang bestemmes eksakt, det vil dog oftest ikke være muligt at bestemme den i de tidligere designstadier, da bygningens endelige brug ikke altid kendes. I tilfælde hvor bygningens endelige brug ikke kendes, skal det mest konservative tilfælde analyseres.

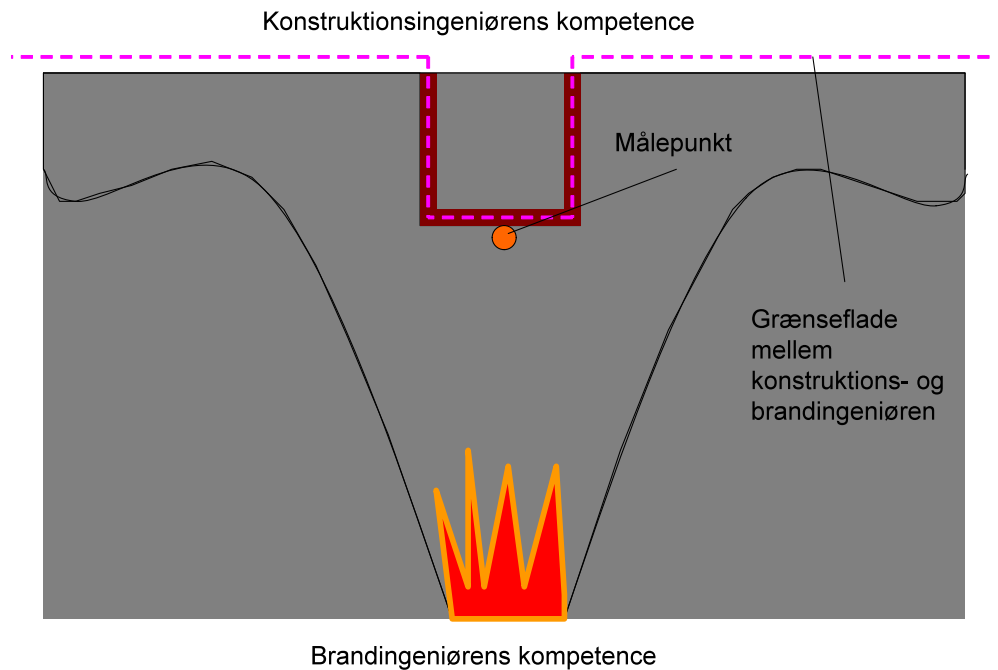
5.2.3 Brandtilvækst

Brandtilvæksten anses for at være af mindre betydning, da man ved dimensionering af konstruktioner antager, at branden vil forløbe i længere tid, og det vil derfor ikke have den helt store betydning, hvor længe branden vil være om at opnå den definerede maksimale brandeffekt.

5.3 Beregningsprocedure

CFD resultaterne skal i forbindelse med eftervisning af konstruktionernes evne til at modstå brand, bruges af en konstruktionsingeniør. Det er forskelligt, hvad konstruktionsingeniøren ønsker at modtage til grundlag for sine beregninger. Den opstillede model skal være brugbar til at levere de output konstruktionsingeniøren ønsker.

Nedenstående figur viser grænsefladen mellem brandingeniøren og konstruktionsingeniøren. Brandingeniøren bør i sine beregninger tage varmetabet med til konstruktionerne, mens konstruktionsingeniøren bør inddrage i sine beregninger, hvordan varmeledningen i konstruktions-elementet sker.



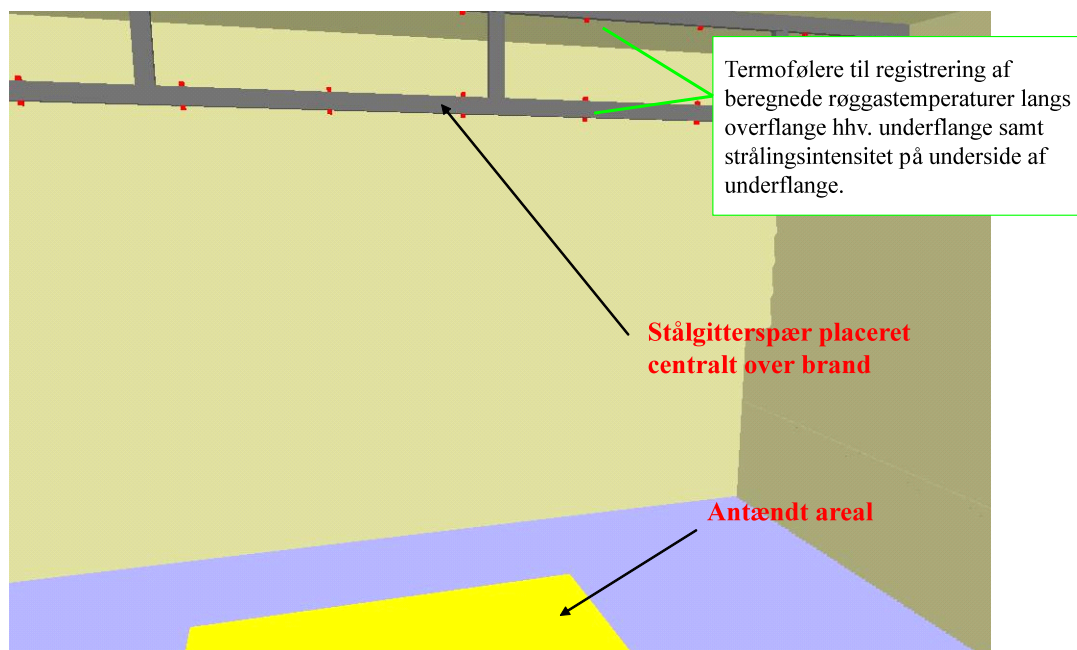
Figur 5-1: Kompetenceskel mellem konstruktionsingeniør og brandingeniør

Normalt vil konstruktionsingeniøren bede om bruttovarmefluxen på en konstruktionselementet. Ved beregning af bruttovarmefluxen skal tre bidrag tages med:

- Varmestrålingen fra røggaslaget
- Konvektionsbidraget fra røggaslaget
- Varmestrålingen fra flammerne

Strålingsintensiteten og røggaslagets temperatur vil kunne bestemmes ved at indsættes målepunkter i CFD modellen. For at opnå et mere retvisende billede anbefales der flere målepunkter. Den værdi der bruges kan eksempelvis være middelværdien af de valgte målepunkter.

De enkelte målepunkter bør placeres så ugunstigt som muligt. Målepunkter der skal registrere stråling, skal placeres, således at stråling fra flammen så vidt muligt ikke reduceres af andre legemer.



Figur 5-2: Placering af målepunkter

Det anbefales, at der ikke benyttes større tidsintervaller end 5 sekunder, idet større intervaller vil kunne give misvisende resultater, da modellerne kan registrere strålingen eller temperaturen i punktet til det tidspunkt, der er defineret. Dette vil kunne resultere i at de udsving, der vil være i målingerne, kan være mere misvisende jo større tidsintervaller, der vælges.

Der bør deslige udføres håndberegninger, som verificerer CFD simuleringens resultater.

Til bestemmelse af den samlede bruttovarmeflux i FDS kan målepunktsparemeten INCIDENT_HEAT_FLUX bruges. Denne parameter giver, i de fleste tilfælde, en konservativ værdi for den energi, der tilføres konstruktionselementet.

6 Referencer

Kapitel 1

[BR08, 2008] *Bygningsreglementet*, Erhvervs- og Byggestyrelsen, februar 2008,

[Eksempelsamling, 2006] *Eksempelsamling om brandsikring af byggeri*, Erhvervs- og Byggestyrelsen, april 2006

[Information, 2004] *Information om Brandteknisk Dimensionering*. Erhvervs- og Boligstyrelsen, 2004.

[Salley & Kassawara, 2007] Salley, M. H., & Kassawara, R. P. 2007 (May). Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application, Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS). Technical Report NUREG-1824 and EPRI 1011999. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES) and Electric Power Research Institute (EPRI), Rockville (MD) and Palo Alto (CA).

[Valkvist, 2007] Valkvist, Morten Birk Sabroe. 2007 (November). New Engineering Principles in Atrium Smoke Management - CFD Grid Quality Control, Approach Flows in Wide Openings, Spill Plumes Emanating from Wide Openings and Area Corrections Coefficients in SHEVS. PhD Thesis, Technical University of Denmark. ISBN: 978-87-7877-242-8, ISSN: 1601-2917, Report no. R-168.

[DiNenno, 2003] DiNenno, Philip J. 2003. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd edn. Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association.

[Ma & Quintiere, 2003] Ma, T. G., & Quintiere, J. G. 2003. Numerical Simulation of Axi-symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations. *Fire Safety Journal*, **38**(5), 467–492.

[Bounagui *et al.*, 2003] Bounagui, A., Bénichou, N., McCartney, C., & Kashef, A. 2003 (December). Optimizing the Grid Size Used in CFD Simulations to Evaluate Fire Safety in Houses. *Pages 1–8 of:3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing and Virtual Reality*. National Research Council Canada.

Kapitel 2

[Bounagui *et al.*, 2003] Bounagui, A., Bénichou, N., McCartney, C., & Kashef, A. 2003 (December). Optimizing the Grid Size Used in CFD Simulations to Evaluate Fire Safety in Houses. *Pages 1–8 of:3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing and Virtual Reality*. National Research Council Canada.

[DBI-27, 2007] DBI-27. 2007 (November). *DBI Vejledning 27 - Brandventilation*. Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut. 3. udgave.

[DiNenno, 2003] DiNenno, Philip J. 2003. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd edn. Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association.

[Drysdale, 2002] Drysdale, Dougal. 2002. *An Introduction to Fire Dynamics*. 2nd edn. John Wiley & Sons.

[DS/EN-12101-5, 2005] DS/EN-12101-5. 2005. Smoke and Heat Control Systems – Part 5: Guidelines on Functional Recommendations and Cal-

ulation Methods for Smoke and Heat Exhaust Ventilation Systems. Danish Standards Association. 1st edition.

[Emmons, 1997] Emmons, H. W. 1997. *Thirteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, March 13-20, 1996 - A Universal Orifice Flow Formula*. Tech. rept. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology. NISTIR 6030.

[Ferziger & Peric, 2002] Ferziger, J. H., & Peric, M. 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.

[Hostikka, 2008] Development of Fire Simulation Models for Radiative Heat Transfer and Probabilistic Risk Assessment, VTT Publications 683, ISSN 1455-0849.

[Information, 2004] Information 2004. *Information om Brandteknisk Dimensionering*. Erhvervs- og Boligstyrelsen.

[Klote & Milke, 2002] Klote, J. H., & Milke, J. A. 2002. *Principles of Smoke Management*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers and Society of Fire Protection Engineers.

[Ma & Quintiere, 2003] Ma, T. G., & Quintiere, J. G. 2003. Numerical Simulation of Axi-symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations. *Fire Safety Journal*, **38**(5), 467–492.

[Salley & Kassawara, 2007] Salley, M. H., & Kassawara, R. P. 2007 (May). Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application, Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS). Technical Report NUREG-1824 and EPRI 1011999. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES) and Electric Power Research Institute (EPRI), Rockville (MD) and Palo Alto (CA).

[Valkvist, 2007] Valkvist, Morten Birk Sabroe. 2007 (November). New Engineering Principles in Atrium Smoke Management - CFD Grid

Quality Control, Approach Flows in Wide Openings, Spill Plumes Emanating from Wide Openings and Area Corrections Coefficients in SHEVS. PhD Thesis, Technical University of Denmark. ISBN: 978-87-7877-242-8, ISSN: 1601-2917, Report no. R-168.

[Zukoski, 1995] Zukoski, E. E. 1995. *Combustion Fundamentals*. Academic Press. Chap. Properties of Fire Plumes, pages 101–219.

[Zukoski *et al.*, 1981] Zukoski, E. E., Kubota, T., & Cetegen, B. 1981. Entrainment in Fire Plumes. *Fire Safety Journal*, **3**, 107–121.

Kapitel 3

[Brandskyddshandboken, 2005] Brandskyddshandboken, Brandskyddslaget och brandteknik ved LTH.

[Heskestad, 1995] Heskestad, G, *Fire Plumes*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, NFPA 1995.

[Cox, 2002] Cox, G., Sumar, K., *Modeling enclosure Fires Using CFD*, section 3, chapter 8, page 3-205—3-207, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd edition, Society of Fire Protection Engineers, 2002.

[Ma 2003] T.G. Ma, J.G. Quintiere, Numerical simulation of axisymmetric fire plumes: accuracy and limitations, *Fire Safety Journal* 38 (2003) 467–492

[User guide 5] Kevin McGrattan, Bryan Klein, Simo Hostikka, Jason FloydKevin. Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide, March 2006

[Informationen, 2004] *Information om brandteknisk dimensionering*, Erhvervs- og boligstyrelsen, 2004.

[EFD] Björn Karlsson, James G. Quintiere Enclosure Fire Dynamics, CRC Press.

[BPH, 2003] Bjarne Paulsen Husted. Optical smoke units and smoke potential of different products. DIFT REPORT 2004:01.

[SFPE] *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd edn. Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association.

Kapitel 4

[DS/EN 12101-2, 2003] CEN Smoke and heat control systems –Part 2: Specification for natural smoke and heat exhaust ventilators, CEN, Editor. 2003.

[DS/EN 12101-3, 2002] CEN Smoke and heat control systems - Part 3: Specification for powered smoke and heat exhaust ventilators, CEN, Editor. 2003.

[Vejledning 27, 2007] DBI, Brandventilation, DBI vejledning 27. 2007, Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut.

[Forskrift 232, 2009] DBI, Automatiske brandalarmanlæg, Forskrift 232. marts 2009, Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut.

[Retningslinie 251/4001] DBI, Automatiske sprinkleranlæg, Forskrift 251. april 2009, Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut.

Kapitel 5

[DS/EN 1991-1-2, 2007] DS/EN 1991-1-2 Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - del 1-2: Generelle laster - Brandlast, 3. Udgave Dansk Standard, 2007-06-21

[DS/EN1992-1-2, 2006] DS/EN 1992-1-2 Eurocode 2: Betonkonstruktioner – Del 1-2: Generelle regler – Brandteknisk dimensionering, 1. udgave, Dansk Standard, 2006-01-12

[DS/EN 1993-1-2, 2007] DS/EN 1993-1-2 Eurocode 2: Stålkonstruktioner – Del 1-2: Generelle regler – Brandteknisk dimensionering, 2. Udgave, Dansk Standard, 2007-08-22

[DS/EN 1995-1-2, 2007] DS/EN 1995-1-2 Eurocode 5: Trækonstruktioner – Del 1-2: Generelle regler – Brandteknisk dimensionering, 2. Udgave, Dansk Standard, 2007-06-11

[Eksempelsamling, 2006] Eksempelsamling om brandsikring af byggeri, Erhvervs- og Byggestyrelsen, april 2006